

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LA CARACTERIZACIÓN  
DE LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE LA TURBULENCIA  
ATMOSFÉRICA A BAJAS ALTURAS EN TRAYECTORIAS HORIZONTALES.**

**MANUEL FERNANDO HERREÑO VANEGAS  
JHONNY VILLAMIZAR CONDE**

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

**2016**

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LA CARACTERIZACIÓN  
DE LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE LA TURBULENCIA  
ATMOSFÉRICA A BAJAS ALTURAS EN TRAYECTORIAS HORIZONTALES.**

**MANUEL FERNANDO HERREÑO VANEGAS  
JHONNY VILLAMIZAR CONDE**

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

**Director**

**OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS**

**Magíster en ingeniería. Ingeniero Electrónico**

**Codirector**

**YEZID TORRES MORENO**

**Doctor en Óptica y Tratamiento de la Señal Físico**

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

**2016**

## **DEDICATORIA**

El autor Jhonny Villamizar Conde expresa sus agradecimientos a:

A Dios que me brindó todo su entendimiento para afrontar un millar de retos. A mis padres y mi hermana que siempre me brindaron su fortaleza. A mi novia y amigos porque siempre estuvieron para aconsejarme en todo momento.

El autor Manuel Fernando Herreño Vanegas expresa sus agradecimientos a:

A mi familia y todos los que me han apoyado en este largo camino

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- Dios, por permitirnos desarrollar y terminar este proyecto.
- Magister Omar Javier Tíjaro Rojas por su colaboración, orientación y dedicación a nuestro proyecto.
- PhD. Yezid Torres Moreno, por su colaboración, orientación y diligencia con el grupo de investigación GOTS.
- A las personas que conforman el GOTS los cuales nos brindaron la oportunidad de la realización del proyecto.
- A Colciencias por el apoyo del proyecto de grado titulado "Uso de la telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia horizontal a baja altura" código 110256933773 del cual forma parte.
- A la UIS por su apoyo a través del proyecto interno código 5707.
- Nuestros padres y amigos que de una manera u otra nos brindaron su colaboración en el desarrollo del proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo General.	20
1.3.2 Objetivos Específicos.	20
1.4 ALCANCES	21
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1 LÁSER Y SUS CARACTERÍSTICAS	22
2.1.1 Definición y funcionamiento del láser.	22
2.1.2 Transmisión y frente de onda	23
2.1.3 Efectos de la cavidad del láser	24
2.2 TURBULENCIA ATMOSFÉRICA	25
2.2.1 La atmósfera y sus generalidades.	26
2.2.2 Parámetros de interés.	26
2.2.3 Humedad absoluta y humedad relativa.].	27
3. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTOS DE DATOS	29
3.1 ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES	29

3.1.1 Cámaras CMOS.	29
3.1.2 Montaje experimental y algoritmo de adquisición.	30
3.1.3 Tratamiento de imágenes digitales RGB.	33
3.1.3.1 Procesamiento de imágenes digitales RGB.	33
3.1.3.2 Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes.	35
3.2 SENSADO DE HUMEDAD.	39
3.2.1 Sensor HTS2030SMD.	39
3.2.2 Acople electrónico.	41
3.2.3 Tarjeta de adquisición, enrutamiento con MATLAB® y algoritmo de adquisición.	46
3.2.4 Caracterización del medio turbulento	48
3.3 SINCRONIZACIÓN	50
3.3.1 Tiempos de registro	50
3.3.2 Verificación por correlación	53
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4.1 SEPARACIÓN DEL EFECTO DEL BANDEO.	55
4.2 ANÁLISIS DE CENTROIDES Y ÁREAS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD.	58
4.2.1 Función estructura.	65
5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS	80

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Amplificación del láser.	22
Figura 2. Componentes del láser.	23
Figura 3. Divisor de haz, en comportamiento clásico.	24
Figura 4. Alineado - Translación - Rotación.	25
Figura 5. Flujo laminar y flujo turbulento.	26
Figura 6. Humedad relativa en diferentes temperaturas.	28
Figura 7. Montaje experimental.	31
Figura 8. Diagrama de flujo.	32
Figura 9. Señal digital.	33
Figura 10. Las imágenes A-B corresponden a las pruebas de ruido con las cámaras selladas y las imágenes C-D corresponden a las pruebas de ruido con las cámaras en ausencia de iluminación.	34
Figura 11. Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes.	35
Figura 12. Ilustración del elemento estructurante.	36
Figura 13. Ejemplo de filtrado, donde A es la imagen sin filtrar y B corresponde al corte transversal de la misma. C es la imagen filtrada y D es el corte transversal de la misma.	37
Figura 14. Binarización para diferentes valores de umbral, donde A corresponde a la imagen en escala de grises, B a una binarización al 13.53% y C corresponde a una binarización al 50% de la intensidad máxima.	38
Figura 15. Elemento estructurante, <i>disk</i> .	38
Figura 16. Relación Humedad vs. Capacitancia.	39
Figura 17. Circuito oscilador con TLC555.	40
Figura 18. Circuitos implementados.	41
Figura 19. Etapas de acople electrónico.	41

Figura 20. Diagrama esquemático del conversor Unipolar a Bipolar.	42
Figura 21. Simulación de la salida del circuito del fabricante (amarilla) y salida del conversor (verde).	43
Figura 22. Diagrama esquemático de conversor de frecuencias a tensiones.	43
Figura 23. Diagrama esquemático de la etapa de Buffer y sumador.	44
Figura 24. Simulación de la ganancia y fase del filtro vs. frecuencia.	45
Figura 25. Diagrama esquemático de la etapa de amplificación y filtro basa bajas.	45
Figura 26. Diagrama de calibración. Fluke (azul) - Sensor (rojo).	46
Figura 27. Tarjetas de desarrollo para controlador Arduino (ATMEGA 2560).	46
Figura 28. Especificaciones técnicas del microcontrolador.	47
Figura 29. Diagrama esquemático del circuito de inicialización de la tarjeta de adquisición.	48
Figura 30. Turbulador.	48
Figura 31. Variación de la humedad relativa a lo largo del turbulador (Distancia medida a partir del extremo izquierdo del turbulador - Amarillo 10cm - Azul 60cm - Rojo 95cm. Con alto de 1cm y ancho 3.5cm en todas las posiciones).	49
Figura 32. Variación de la humedad relativa a lo alto del turbulador (Azul 5cm- Rojo 0cm). Con ancho de 3.5cm y largo 8cm en todas las posiciones.	49
Figura 33. Variación de la humedad relativa a lo ancho del turbulador (Magenta 1cm - Verde 6cm). Con alto de 3.5cm y largo 8cm en todas las posiciones	50
Figura 34. Diferencias encontradas entre los tiempos de captura de los dispositivos.	51
Figura 35. Tiempo de trabajo para los diferentes dispositivos.	52
Figura 36. Correlación de imágenes capturadas por las cámaras, dispuestas simultáneamente a la misma distancia.	53
Figura 37. Correlación de la cámara 3 en la prueba P6.	54
Figura 38. Movimiento proyectado por bandejo (Azul) y movimiento sensado (Rojo) en la cámara 3 de la prueba patrón.	56

Figura 39. Movimiento proyectado por bandeo (Azul) y movimiento sensado (Rojo) en la cámara 3 de la prueba P6.	56
Figura 40. Dispersión del movimiento del centroide total y por bandeo	57
Figura 41. Temperaturas de las pruebas patrón, primer grupo y segundo grupo. Instalado en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.	59
Figura 42. Humedades relativas de las pruebas patrón, primer grupo y segundo grupo. Instalado en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.	60
Figura 43. Diferencial del movimiento del centroide en X en las pruebas patrón, P1 y P6.	61
Figura 44. Diferencial del movimiento del centroide en Y en las pruebas patrón, P1 y P6.	61
Figura 45. Diferencial del área del spot en las pruebas patrón, P1 y P6.	62
Figura 46. Humedades relativas de las pruebas patrón y del tercer grupo. Medidas en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.	63
Figura 47. Temperaturas de las pruebas patrón y del tercer grupo. Medidas en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.	63
Figura 48. Función estructura del movimiento local del centroide en X en las pruebas patrón, p7, p8 y p9.	65
Figura 49. Función estructura del movimiento local del centroide en Y en las pruebas patrón, p7, p8 y p9.	66
Figura 50. Función estructura del cambio local del área en las pruebas patrón, p7, p8 y p9.	66
Figura 51. Fluctuación global del centroide en X respecto a la humedad y temperatura para las pruebas patrón (azul), P7 (rojo), P8 (Magenta) y P9 (Verde).	68
Figura 52. Fluctuación global del centroide en Y respecto a la humedad y temperatura para las pruebas patrón (azul), P7 (rojo), P8 (Magenta) y P9 (Verde).	69

Figura 53. Fluctuación global del área respecto a la humedad y temperatura para las pruebas patrón (azul), P7 (rojo), P8 (Magenta) y P9 (Verde). 69

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones técnicas relevantes del láser usado. ....	23
Tabla 2. Propiedades del sensor CMOS EO-1312 .....	30
Tabla 3. Frecuencias típicas en función de la humedad para el sensor HTS2030SMD. ....	40
Tabla 4. Sincronización en las diferentes pruebas. ....	52
Tabla 5. Clasificación de las pruebas con sus respectivas horas de inicio. ....	59
Tabla 6. Datos estadísticos para la humedad relativa de la prueba patrón y las pruebas del tercer grupo. ....	64
Tabla 7. Datos estadísticos para la temperatura de la prueba patrón y las pruebas del tercer grupo. ....	64
Tabla 8. Fluctuación promedio global de los centroides en X de las pruebas patrón y tercer grupo. ....	67
Tabla 9. Fluctuación promedio global de los centroides en Y de las pruebas patrón y tercer grupo. ....	67
Tabla 10. Fluctuación promedio global del área del spot de las pruebas patrón y tercer grupo. ....	67

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	80
ANEXO B. RUTEO DE LA PCB DEL SENSOR DE HUMEDAD.	82
ANEXO C. ADQUISICIÓN DE DATOS DE HUMEDAD.	83

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA A BAJAS ALTURAS EN TRAYECTORIAS HORIZONTALES<sup>\*</sup>.

**AUTORES:** MANUEL FERNANDO HERREÑO VANEGAS  
JHONNY VILLAMIZAR CONDE<sup>\*\*</sup>

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

### DESCRIPCIÓN:

Este proyecto de grado muestra los efectos sobre el haz láser en una trayectoria horizontal a bajas alturas, causados por la turbulencia atmosférica, donde se analizó como factor variable la humedad relativa presente en el medio. Para generar cambios en la humedad relativa, se utilizó un dispositivo que limitó el medio a un volumen a escala, con el fin de emular un medio turbulento con mayor facilidad.

Para el desarrollo del proyecto se implementó un montaje de laboratorio que permitió capturar información del haz láser y la humedad relativa presente, por medio de una configuración de 3 cámaras CMOS y un sensor de humedad electrónico (HTS2030SMD), lo cual implica la necesidad de que las capturas en los diferentes dispositivos se realicen de forma sincronizada. Para cumplir con tales requerimientos, se utilizó el software de Matlab® con el fin de controlar la adquisición de los dispositivos de video y humedad.

Se realizaron mediciones a diferentes horas del día para tener distintos valores de temperatura (siendo importante evitar cambios significativos en el momento de la medición), debido a que dicho parámetro afecta en gran medida el valor de la humedad tanto relativa como absoluta. Así, se realizaron diez tipos de pruebas que variaron y mantuvieron la humedad relativa de formas distintas durante el desarrollo del proyecto, para observar el comportamiento de los parámetros del frente de onda del haz. Adicionalmente, se utilizó la función estructura en el plano transversal al eje de propagación del haz de las fluctuaciones del área y de los centroides a lo largo de los ejes coordenados.

---

<sup>\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Director MI. Omar Javier Tijero Rojas, Codirector Ph.D. Yezid Torres Moreno

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF THE HUMIDITY EFFECTS ON THE CHARACTERIZATION OF THE SPREAD OF A LASER BEAM PROPAGATING THROUGH AIR TURBULENCE AT GROUND LEVEL HORIZONTAL PATHS

**AUTHORS:** MANUEL FERNANDO HERREÑO VANEGAS  
JHONNY VILLAMIZAR CONDE\*\*

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

### DESCRIPTION:

This end degree work shows the effect on the laser beam propagating in a horizontal path at ground level, caused by atmospheric turbulence, where the relative humidity was analyzed as main factor. To produce controlled changes in relative humidity, a device that confines the medium to a volume scale is used, it orders to emulate a turbulent environment more easily.

We implemented a laboratory assembly to capture information about the wave front model and relative humidity, using three CMOS cameras and a humidity electronic sensor (HTS2030SMD), which implies the need for catches information in the different devices synchronously. To accomplish such requirements, we used the Matlab® software to control the acquisition of video and humidity signals.

Measurements were performed at different day times searching to have different temperature values (It is important to avoid significant changes on measurement time), because this parameter greatly affects the value of relative and absolute humidity. Ten types of tests that modify and keep the relative humidity were done, during the experiments to observe their behavior on the wave front of laser beam. Additionally, the structure function on the transversal plane to propagation wave in terms of fluctuations centroid and area along the coordinate was calculated.

---

\* End degree 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

La comprensión de los fenómenos físicos nos permite crear herramientas para aprovecharlas de la manera más adecuada. Un claro ejemplo es la luz, un fenómeno físico que desde un principio ha fascinado al hombre. Gracias a las diversas investigaciones que se han hecho para entenderla, se ha logrado desarrollar el láser que es una aplicación concreta del conocimiento adquirido en el estudio de la óptica cuántica [1].

Con el fin de ampliar su espectro de aplicaciones, como por ejemplo en comunicaciones en medios turbulentos, agua, aire, etc., formación de imágenes a través de la misma clase de medios, se hace indispensable dilucidar su comportamiento en la atmósfera [2]. En el documento *Free-Space Laser Propagation: Atmospheric Effects* se muestran ventajas y desventajas de los sistemas de comunicación con láser óptico en el espacio libre de alta velocidad, enfocándose en efectos como el centelleo del haz láser [3]. Sin embargo, dicho documento se centra solo en una situación específica, por lo tanto se hace necesario y conveniente realizar diferentes tipos de experimentos donde se modifiquen las condiciones ambientales, así como otras variables de interés, que a futuro permitan profundizar en modelos donde se incluyan los fenómenos analizados [4], [5].

La caracterización de un fenómeno específico suele ser el primer paso para lograr un modelo experimental más completo. Este trabajo de investigación pretende caracterizar el comportamiento de un haz láser que se propagó en una trayectoria horizontal a través de un medio turbulento a bajas alturas, usando un montaje de laboratorio que permitió capturar y analizar la información transportada por el haz

láser, con el objeto de comprender que tipos de efectos tiene la humedad en su frente de onda.

Finalmente, se plantean las bases que a futuro permitirán realizar un modelo matemático fiable del efecto de la humedad en la propagación del haz láser, pero para lograrlo se debe crear un sistema que permita un control puntual de la humedad relativa con un amplio rango de valores.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El desarrollo de la tecnología del haz láser ha marcado un hito en la ciencia llevando a la vida práctica varios conceptos científicos tales como la teoría clásica de ondas y óptica cuántica. Sin embargo, seguirá siendo un ámbito de la ciencia en la que se pueden hacer más avances desarrollando aplicaciones en las áreas de las telecomunicaciones, óptica e instrumentación.

Existen modificaciones en medios turbulentos que afectan directamente la propagación del haz láser como son temperatura, velocidad del aire, presión, humedad, entre otros, lo cual hace que sea de gran importancia su correcta caracterización sobre la propagación en diferentes medios y condiciones, logrando así un modelo óptimo que facilitará en un futuro el diseño de instrumentos y aplicaciones que aprovechen mejor la tecnología láser y sobrepasen los límites actuales. Por lo tanto, este trabajo se centró en caracterizar los efectos de la humedad directamente sobre el haz láser.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Han sido pocas las investigaciones que han abarcado los efectos de la turbulencia atmosférica en la propagación horizontal de un haz láser causados por la humedad. Es un gran reto asumir dicho objetivo y caracterizar las anomalías que existen en el haz láser cuando viaja a través de la atmósfera. Además, a futuro se podría estudiar más efectos para mejorar la operación de los dispositivos que son

afectados por la humedad, en particular para toda clase de haces luminosos que se propagan en largas distancias.

Además, dentro del proyecto de investigación en curso y desarrollado por GOTS (financiado por Colciencias), se tiene previsto estudiar el efecto de algunas variables físicas, dentro de ellas la humedad sobre la propagación de un haz láser a largas distancias horizontales y a baja altura, con el objeto de dilucidar su impacto en la formación de imágenes de alta resolución más allá del límite clásico. También, sobre el uso de la atmosfera como canal de comunicación a alta cadencia de información utilizando diferentes técnicas de codificación.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo General.** Caracterizar los efectos de la humedad en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica a baja altura.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Analizar y comprender el funcionamiento de un láser.
- Identificar los efectos teóricos que produce la humedad en la turbulencia atmosférica.
- Separar por medio de técnicas de bandeado los efectos naturales producidos por la cavidad del láser para medir el cambio de posición del centroide y área del spot por medio de sensores CMOS y algoritmos de procesamiento de imágenes.

- Realizar mediciones a diferentes horas del día para verificar el cambio de la humedad y su efecto sobre la turbulencia atmosférica.
- Comparación de los efectos sufridos por el haz láser al propagarse, con los parámetros de humedad de la turbulencia atmosférica que atraviesa.

#### **1.4 ALCANCES**

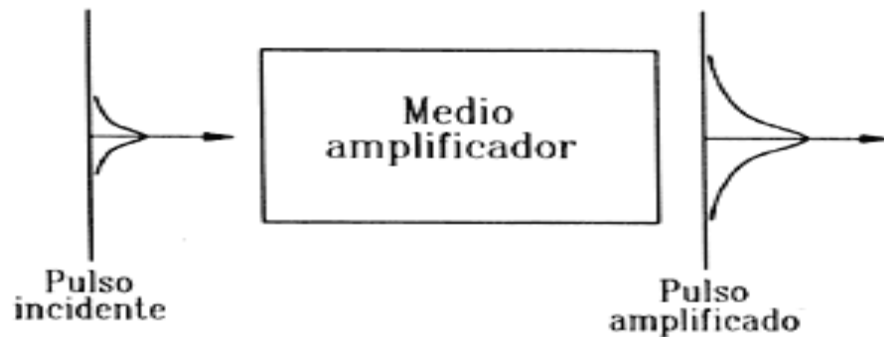
Se caracterizarán las variaciones de los centroides en el haz láser debido a la turbulencia generada por la humedad en el medio, a través de un montaje específico de 3 cámaras CMOS de dos dimensiones y el sensor modelo HTS2030SMD.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 LÁSER Y SUS CARACTERÍSTICAS

**2.1.1 Definición y funcionamiento del láser.** El láser es un haz de luz casi-monocromático (longitud de onda casi única y coherente). Un láser típico consta de cinco elementos básicos de operación como se nota en la figura 2. Una cavidad resonante en la que la luz puede circular, que consta habitualmente de un par de espejos de los cuales uno es de alta reflectancia y el otro es conocido como acoplador (parcialmente reflector), que hace el papel de la salida de la radiación del láser. Dentro de esta cavidad resonante se sitúa un medio activo con ganancia óptica que es el encargado de amplificar la luz como se nota en la figura 1 [1].

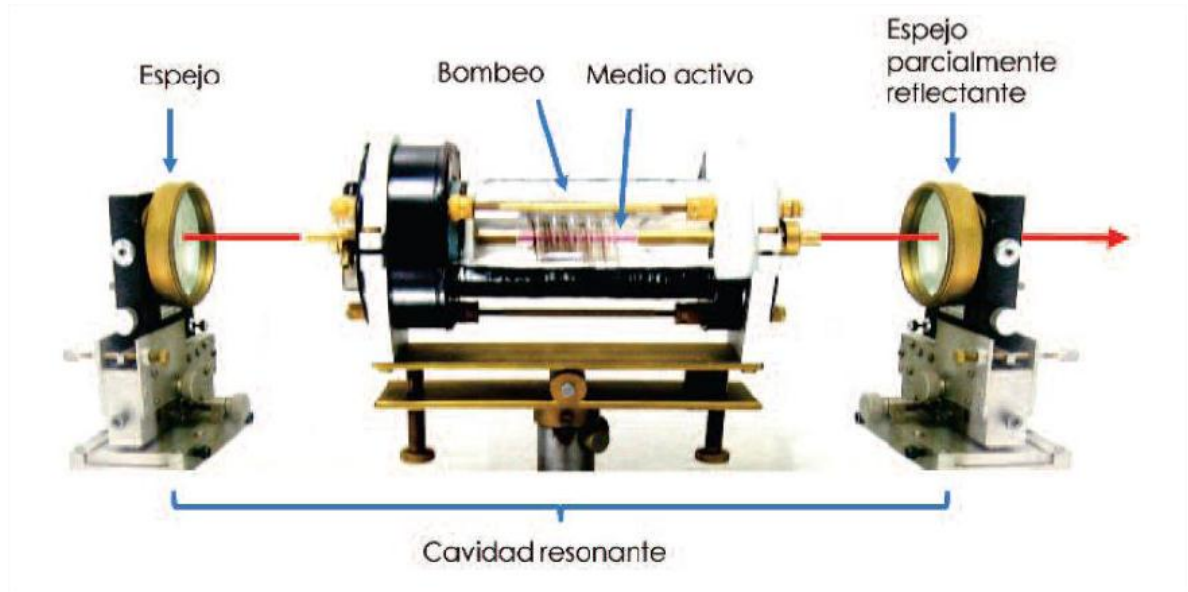
**Figura 1. Amplificación del láser.**



Tomado de la referencia [1].

Para lograr dicha amplificación se necesita de un cierto aporte de energía llamado bombeo, este fenómeno mantiene excitados los átomos logrando así transiciones electrónicas liberando fotones constantemente (inversión de población). Esta última parte se logra a través de un fenómeno llamado emisión estimulada [2].

**Figura 2. Componentes del láser.**



Tomado de la referencia [1].

La tabla 1 muestra las especificaciones técnicas relevantes correspondientes al láser de Helio-Neón utilizado en el desarrollo de este proyecto.

**Tabla 1. Especificaciones técnicas relevantes del láser usado.**

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

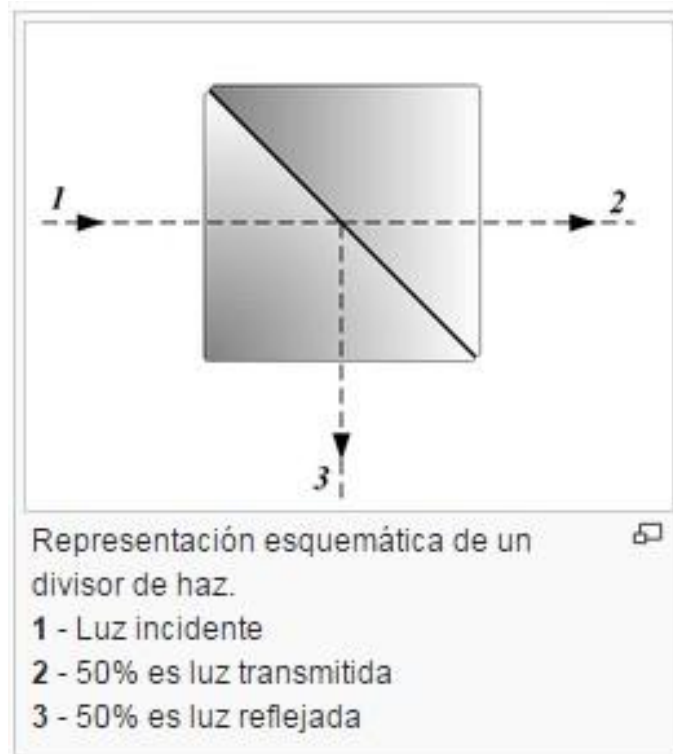
Tomado de la referencia [6].

**2.1.2 Transmisión y frente de onda** La propagación de las ondas en el espacio depende directamente del tipo de fuente que las genera, estas pueden ser planas, esféricas, cilíndricas, entre otras. Se denomina frente de onda a la superficie en la

que en un instante de tiempo, la onda tiene el mismo estado de oscilación y la misma fase [1].

Un divisor de haz (en inglés, *beam splitter*) es un elemento óptico que divide un haz de luz incidente en dos, uno reflejado y otro transmitido como se nota en la figura 3, para el caso de aproximadamente 50% de amplitud transmitida y 50% de amplitud reflejada. Está compuesto por dos prismas de vidrio triangulares que están pegados por la base, donde el grosor de la capa de resina es ajustado para una cierta longitud de onda [7].

**Figura 3. Divisor de haz, en comportamiento clásico.**



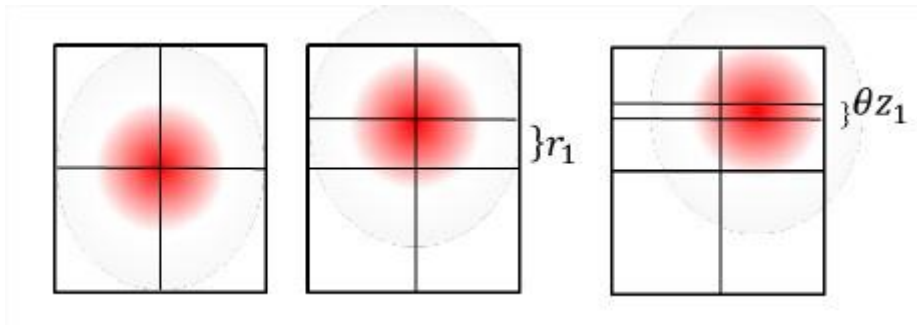
Tomado de la referencia [7].

**2.1.3 Efectos de la cavidad del láser** Existe un efecto relevante propio del láser que puede discernir en los resultados a tratar, el bandeo. Este es una variación en la separación línea a línea o la intensidad de la salida, que se produce en la

cavidad resonante del láser. Debido a ello, se analizó el bandeo para descartarlo y tener una mayor exactitud en los efectos causados por la humedad presente en la turbulencia atmosférica [8].

Para lograr una medición precisa de la turbulencia, se hace necesario identificar los efectos del bandeo, los cuales se pueden analizar en dos movimientos, translación y rotación del centroide del spot como se nota en la figura 4.

**Figura 4. Alineado - Translación - Rotación.**

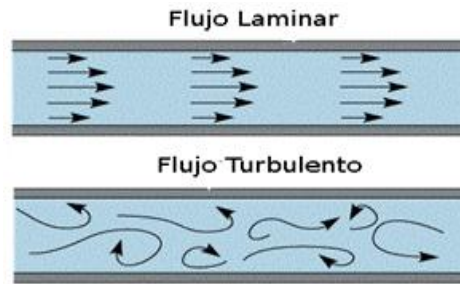


Tomado de la referencia [9].

## 2.2 TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

Se entiende como turbulencia las alteraciones en el flujo (gases o líquidos en movimiento) que por lo general termina formando remolinos de gran o pequeño tamaño según su origen. La figura 5 muestra un flujo laminar y un flujo con turbulencia [4].

**Figura 5. Flujo laminar y flujo turbulento.**



Tomado de la referencia [4].

**2.2.1 La atmósfera y sus generalidades.** Se puede comparar la atmósfera terrestre con capas de gas que cubren el planeta como si fuera un velo, pero dado que la superficie de la tierra presenta irregularidades como montañas, valles, llanuras y otros accidentes geográficos, estas capas de gas presentan irregularidades. Sumado a estas irregularidades existen fenómenos que hacen que la atmósfera presente turbulencia de otros orígenes, como el movimiento causado en el aire gracias a las diferencias de temperaturas, presión, humedad, entre otras [4].

**2.2.2 Parámetros de interés.** Los cambios en los parámetros físicos tales como temperatura, la presión, la velocidad del aire y la humedad provocan turbulencia atmosférica. Puesto que algún cambio en estas condiciones permite la aparición de flujos en el aire y en algunos casos toman la forma de “remolinos” visibles.

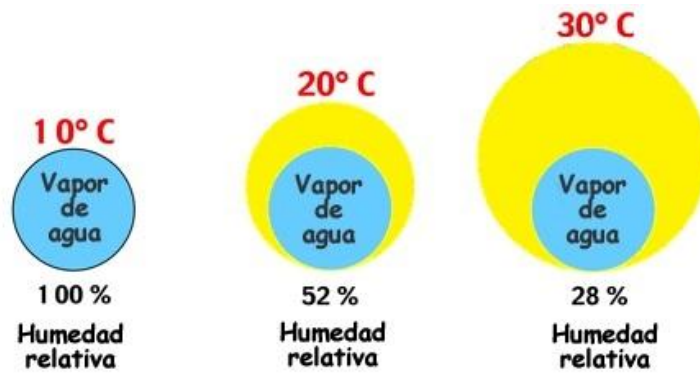
Este trabajo no se centró en los efectos de turbulencia atmosférica a gran escala como por ejemplo un huracán. Por el contrario, se enfocó en la turbulencia a escala milimétrica y micrométrica, que según los postulados de Kolmogorov se presentan en la atmósfera. Ejemplo de pequeñas turbulencias son el cambio en la temperatura que afecta el medio (aire) por los flujos que se presentan debido a los diferentes valores de temperatura en el aire [4].

Con respecto a la presión se pueden ver flujos de aire generados por los diferentes niveles de presión presentes debido a la libertad de movimiento de las partículas. La humedad genera comportamientos similares a los generados por la temperatura y la presión, pero en una menor escala. Finalmente la turbulencia generada por la velocidad del viento dependerá mayormente de obstáculos e irregularidades en el espacio donde se desee ver su efecto [2].

**2.2.3 Humedad absoluta y humedad relativa.** La humedad del aire se define como la cantidad de vapor de agua o cualquier otro líquido existente en un entorno. Existen diferentes conceptos que permiten medir la humedad, el primero es la humedad absoluta, el cual indica la masa de vapor de agua en el volumen total del aire, pero esta medida desconoce una característica importante de la humedad que es el punto de saturación. Por tanto se tiene en cuenta el concepto de humedad relativa, que es la relación porcentual de la humedad presente con respecto a la humedad de saturación [10].

El punto de rocío o punto de saturación es la temperatura donde se encuentra la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener un volumen determinado de aire, puesto que todo el vapor de agua por encima de este punto se condensa. Por lo tanto se da a entender la fuerte dependencia existente entre la humedad y la temperatura, dado que a mayor temperatura del aire mayor cantidad de vapor de agua puede contener, como se muestra en la figura 6 [10].

Figura 6. Humedad relativa en diferentes temperaturas.



Tomado de la referencia [5].

### 3. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTOS DE DATOS

#### 3.1 ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

Con el montaje y el algoritmo implementado se buscó minimizar los efectos propios del láser y ruido presente en el medio, usando una combinación de 3 cámaras y el uso de técnicas de filtrado y procesamiento digital de imágenes. Por consiguiente, se permitió individualizar el efecto de la humedad presente en el desplazamiento del centroide del spot y su área.

**3.1.1 Cámaras CMOS.** Para la captura de imágenes del frente de onda se usaron 3 cámaras EO-1312 CMOS Color Lite Edition USB colocadas en una determinada posición para la caracterización establecida [11].

Un sensor matricial CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) es aquel que detecta la luz basado en la tecnología CMOS. El sensor está formado por numerosos fotodiodos (uno para cada píxel) el cual produce una corriente eléctrica que varía en función de la intensidad luz recibida. El CMOS a diferencia de un CCD incorpora un amplificador de la señal eléctrica en cada fotodiodo, lo que mejora su practicidad [12].

Para una óptima adquisición de imágenes hay que tener en cuenta las especificaciones del fabricante que establece en la tabla 2 [11].

**Tabla 2. Propiedades del sensor CMOS EO-1312**

<b>SPECIFICATIONS</b>	
Model Number	EO1312C
Type of Sensor	Progressive Scan CMOS
Imaging Device	e2v EV76C560
Camera Sensor Format	1/1.8"
Sensing Area, H x V (mm)	6.79 x 5.43
Pixels (H x V)	1280 x 1024
Pixel Size, H x V ( $\mu\text{m}$ )	5.3 x 5.3
Pixel Depth	8bit
Frame Rate (fps)	25
Type of Shutter	Global or Rolling
Synchronization	Internal or Via Software
Video Output	USB 2.0
Dimensions (mm)	44 x 44 x 25.4
Mount	CMount
Mounting Threads	1/420 Adapter Plate <a href="#">#59473</a> (Not Included)
Type	Color Camera
Manufacturer	Edmund Optics
Resolution (MegaPixels)	1.3
CE Certified	Yes
RoHS	C

Tomado de la referencia [11].

**3.1.2 Montaje experimental y algoritmo de adquisición.** Se utilizaron 3 cámaras CMOS como se muestra en la figura 7, donde las cámaras uno y dos permiten deducir el movimiento del spot causado por el bandeo. Seguido de ello se realizó una proyección de este efecto en la cámara 3 para poderlo identificar del efecto causado por la turbulencia atmosférica.

Figura 7. Montaje experimental<sup>1</sup>.



Referencia autores.

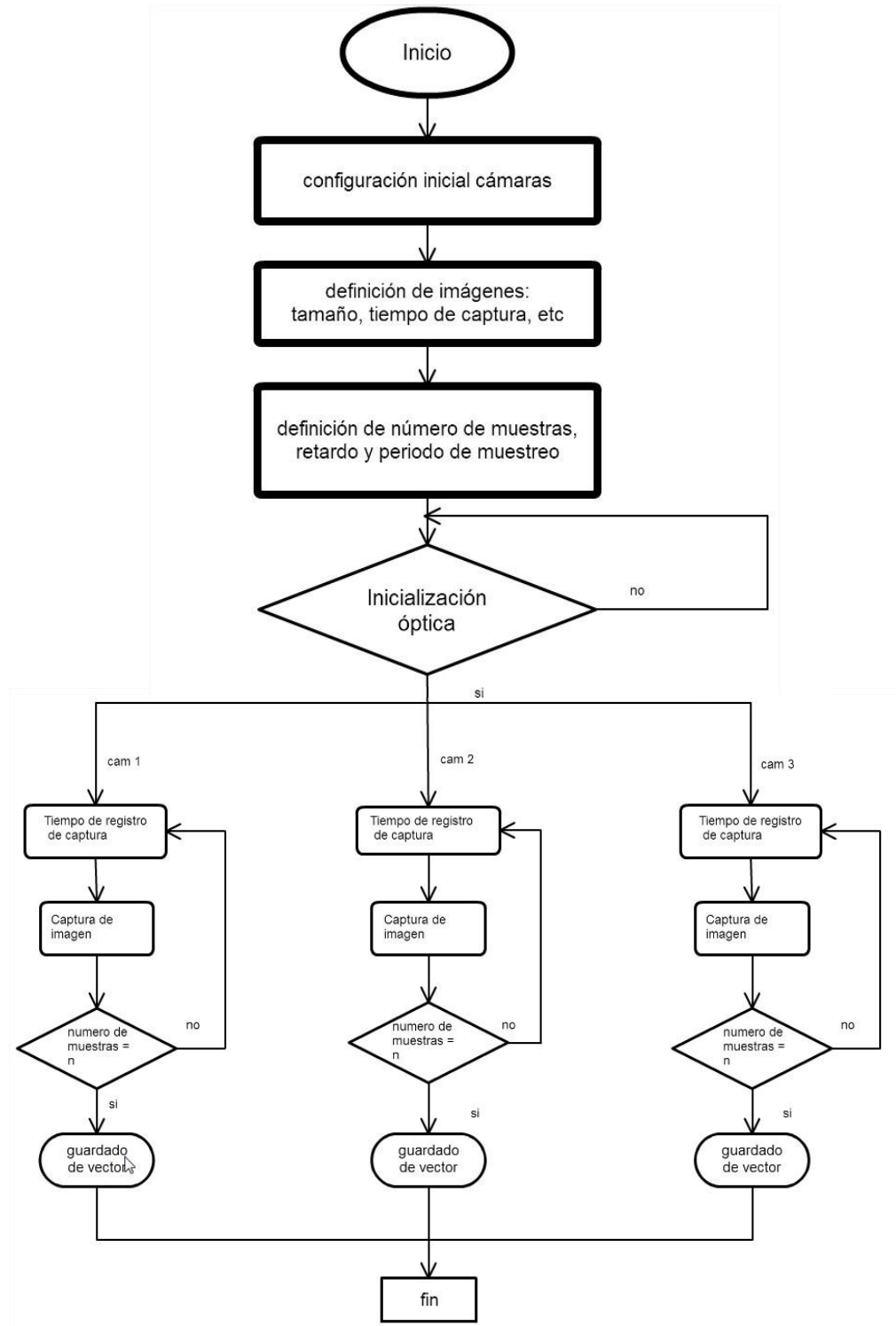
En el algoritmo desarrollado se adquieren sincronizadamente tres imágenes (una por cada cámara conectada a una computadora) en grupos de 1800 muestras. En el algoritmo se especifica la inicialización de la adquisición de datos por medio de una sincronización óptica y la configuración inicial de la cámara. Se hizo uso de los *timers*<sup>2</sup> propios del software para que el algoritmo trabajase por interrupciones periódicas. (Ver anexo 1).

En la figura 8 se muestra el algoritmo de adquisición de datos por medio de un diagrama de flujo, donde el resultado final es un vector que contiene la información de la imagen capturada por cada cámara.

<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.

<sup>2</sup> Refiérase al algoritmo que controla la ejecución periódica de una rutina de comandos.

Figura 8. Diagrama de flujo.



### 3.1.3 Tratamiento de imágenes digitales RGB.

**3.1.3.1 Procesamiento de imágenes digitales RGB.** Se entiende por señal digital aquella que esta discretizada en su variable independiente y cuantizada en su variable dependiente. Ejemplo de lo anterior se muestra en la figura 9.

**Figura 9. Señal digital.**



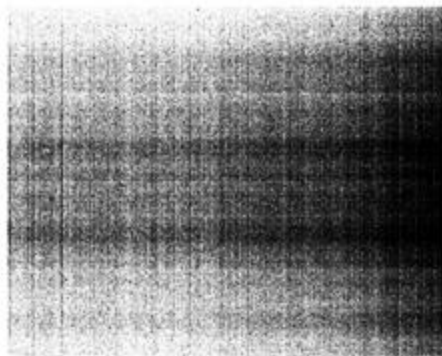
Una imagen digital tiene el mismo principio que usa una señal digital, pero esta es discreta en el espacio y cuantizada en magnitud, lo cual se asocia con facilidad a una matriz, donde las posiciones de la matriz corresponden a una coordenada de la imagen y su valor a un nivel de color. Una imagen en RGB es un arreglo matricial que cumple con lo anterior, pero separa los colores rojo, azul y verde para formar tres matrices que al sobreponerse forman la imagen a color [13].

Las cámaras CMOS permiten capturar imágenes RGB, pero al ser un dispositivo electrónico se debe tener en cuenta el ruido asociado propio del dispositivo y presente en el medio, por esta razón se realizaron dos pruebas de ruido. La primera con las cámaras selladas donde se determinó el ruido propio de las cámaras, y la segunda prueba en el laboratorio con ausencia de iluminación para determinar el ruido en el medio.

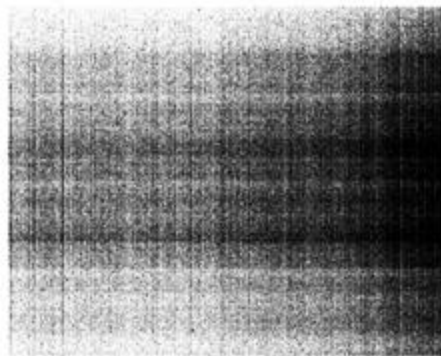
En las imágenes de la figura 10 se pueden apreciar los resultados adquiridos de las pruebas, en ellas se realizaron un acumulado de muestras con el fin de

identificar en que zonas de la cámara se presenta mayor ruido propio del dispositivo y del medio. Hay que aclarar que las zonas más claras presentan mayor ruido. Finalmente se presenta el ruido promedio en las dos condiciones, donde el promedio es 0.78125% para cámaras selladas correspondiente a ruido electrónico y aproximadamente cero para abiertas correspondiente a ruido óptico, puesto que en la segunda prueba se debe restar el aporte de la primera prueba.

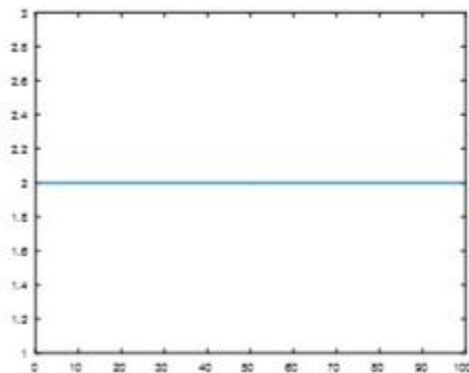
**Figura 10.** Las imágenes A-B corresponden a las pruebas de ruido con las cámaras selladas y las imágenes C-D corresponden a las pruebas de ruido con las cámaras en ausencia de iluminación.



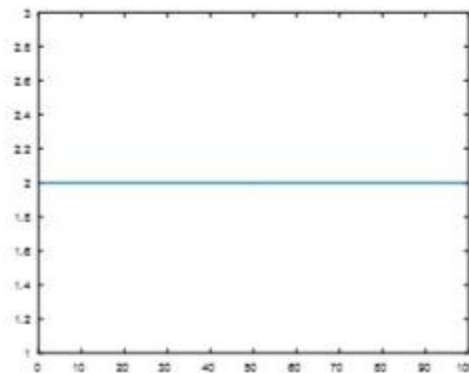
A



C



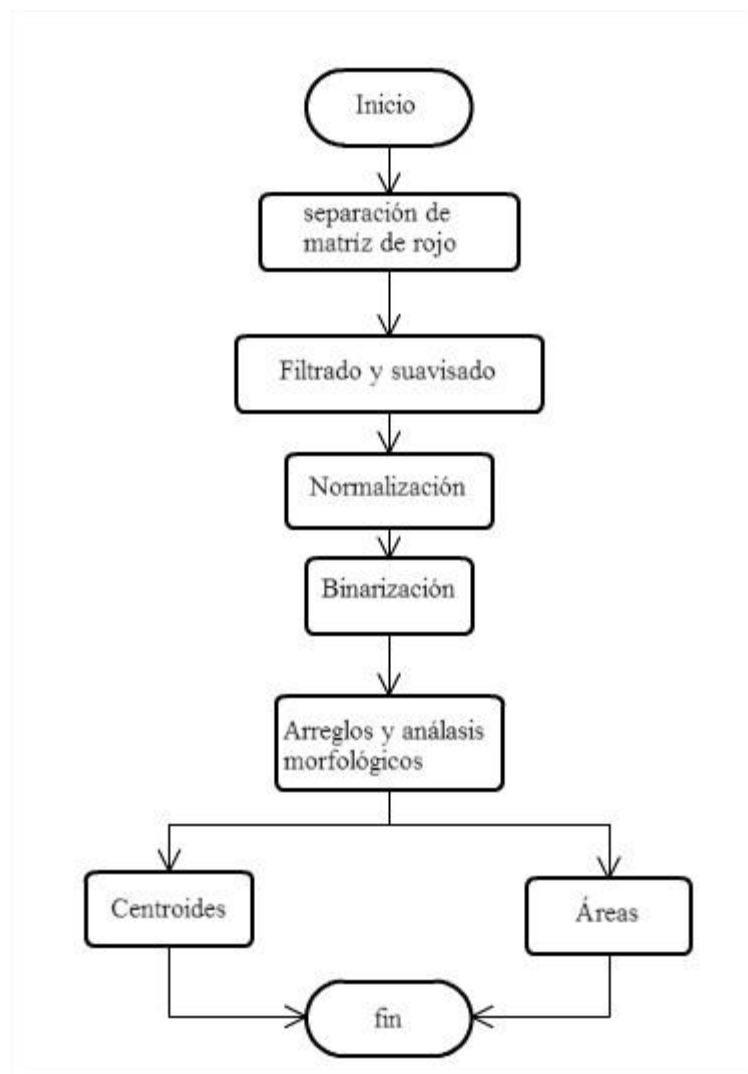
B



D

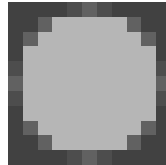
**3.1.3.2 Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes.** Para poder analizar el centroide y el área del spot, se desarrolló un algoritmo que se muestra en la figura 11. El cual parte de la extracción de la matriz del componente rojo en la imagen RGB capturada por la cámara CMOS. Por consiguiente, solo analizó la información que pertenece a la longitud de onda del láser usado, puesto que la información de la matriz verde y azul no es relevante en este proceso.

**Figura 11. Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes.**



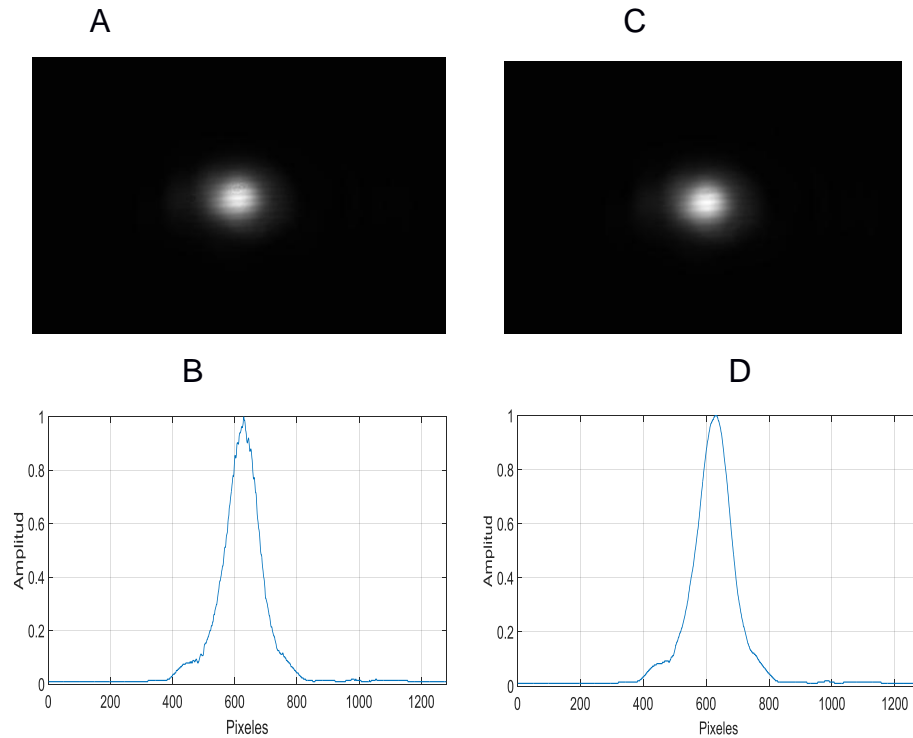
El segundo proceso es filtrar y suavizar la imagen (ésta imagen se refiere a la escala de grises de la capa roja) donde se usa un filtro espacial de promediado con un elemento estructurante de disco de 11x11 (véase figura 12), que permite suavizar la imagen eliminando las altas frecuencias y el ruido presente. Ya con la imagen filtrada y suavizada, se procede a normalizar, donde a la amplitud máxima se le asigna un valor de 1 y a la mínima de 0, permitiendo que todas las muestras estén en el mismo estándar. La figura 13 muestra un ejemplo de una imagen antes y después del filtrado (las imágenes se encuentran normalizadas).

**Figura 12. Ilustración del elemento estructurante.**



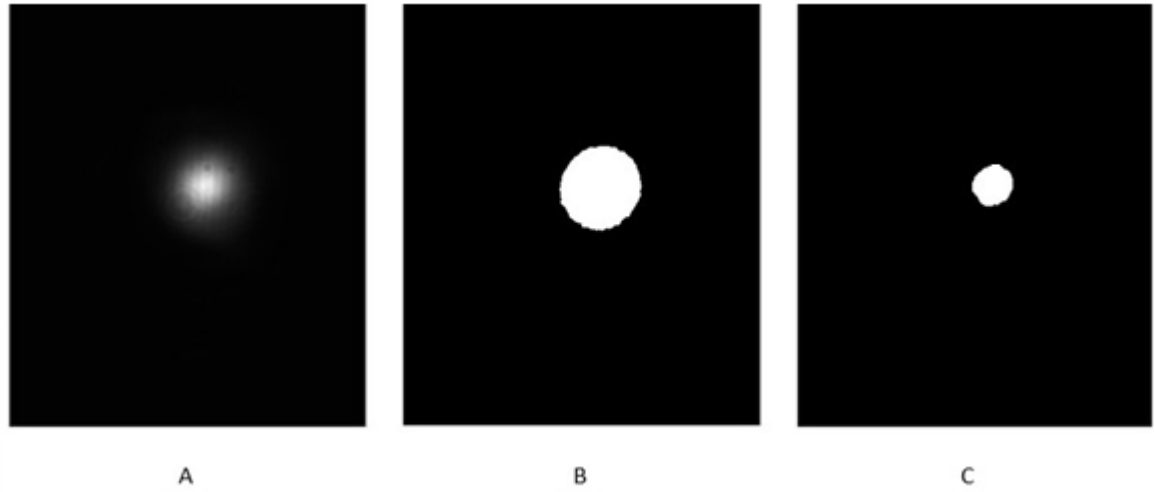
Tomado de la referencia [14].

**Figura 13. Ejemplo de filtrado, donde A es la imagen sin filtrar y B corresponde al corte transversal de la misma. C es la imagen filtrada y D es el corte transversal de la misma.**



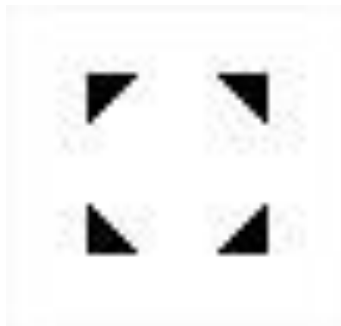
Siguiendo con el flujo del algoritmo, se continúa con la binarización, donde los valores que estén por debajo del valor de umbral se hacen igual a 0 y los valores por encima del mismo se igualan a 1. El valor de umbral es  $\frac{1}{e^2}$  de la intensidad [15], dicho valor de umbral también se puede extraer del histograma de la imagen, el cual da un valor aproximado de 0.1353. La figura 14 muestra un ejemplo de binarización con diferentes valores de umbral a modo de ilustración.

**Figura 14. Binarización para diferentes valores de umbral, donde A corresponde a la imagen en escala de grises, B a una binarización al 13.53% y C corresponde a una binarización al 50% de la intensidad máxima.**



Las técnicas de morfología de imágenes permiten analizar y modificar elementos de la imagen, en este caso se usó erosión y dilatación con un elemento estructurante<sup>3</sup> en forma de disco con radio de 5 píxeles [14] como se nota en la figura 15, donde la función de la erosión fue mejorar los bordes del spot y eliminar puntos libres, y la de la dilatación para recuperar el área original información perdida por causa de la erosión. Finalmente se identifica la región de la imagen para determinar el centroide y el área del spot.

**Figura 15. Elemento estructurante, *disk*.**



Tomado de la referencia [14].

<sup>3</sup> Se utilizó *disk* como elemento estructurante generado por *strel* en el software Matlab®.

### 3.2 SENSADO DE HUMEDAD.

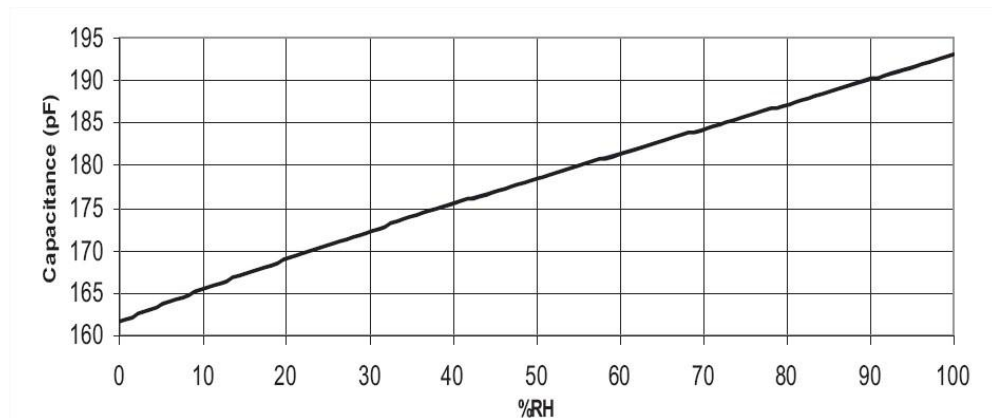
Existe un tipo de sensores electrónicos que se basan en el cambio de la capacitancia en presencia de la humedad relativa, dichos sensores poseen una respuesta más rápida que los de tipo digital y tipo resistivo. El sensor modelo HTS2030SMD [16] posee destacadas características como:

- Un rango de medida de humedad relativa de 1 al 99%
- Permite sensar temperatura entre -60°C y 140°C
- Una velocidad de respuesta de  $63.83 \frac{\text{ms}}{\%RH}$
- El coeficiente de temperatura es 0.01 pF/ °C
- Resolución de 0.01 %RH

Debido a las características que presenta el sensor respecto a otros sensores comunes del mismo tipo, se optó por trabajar con él.

**3.2.1 Sensor HTS2030SMD.** El sensor HTS2030SMD permite medir humedad relativa usando la variación de una capacitancia interna como se muestra en la figura 16, la cual muestra el comportamiento de dicha cantidad en función de la humedad relativa.

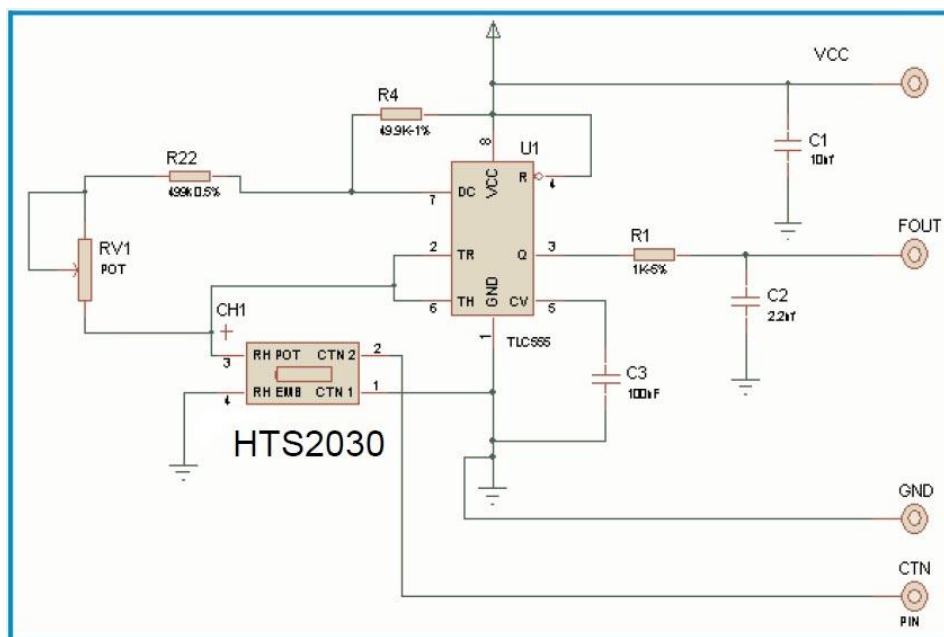
**Figura 16. Relación Humedad vs. Capacitancia.**



Tomado de la referencia [16].

Para medir capacitancias, el fabricante recomienda implementar un montaje que permita encontrar una frecuencia de salida dependiente del valor de capacitancia, como se muestra en la figura 17, donde se usa un oscilador de onda cuadrada. Se tomó en cuenta dicho esquema por la posibilidad de medir humedad y temperatura a la vez en un lugar de otro tipo de circuito. Finalmente, en la tabla 3 se muestran los valores de salida de frecuencia típicos en función de la humedad.

**Figura 17. Circuito oscilador con TLC555.**



Tomado de la referencia [16].

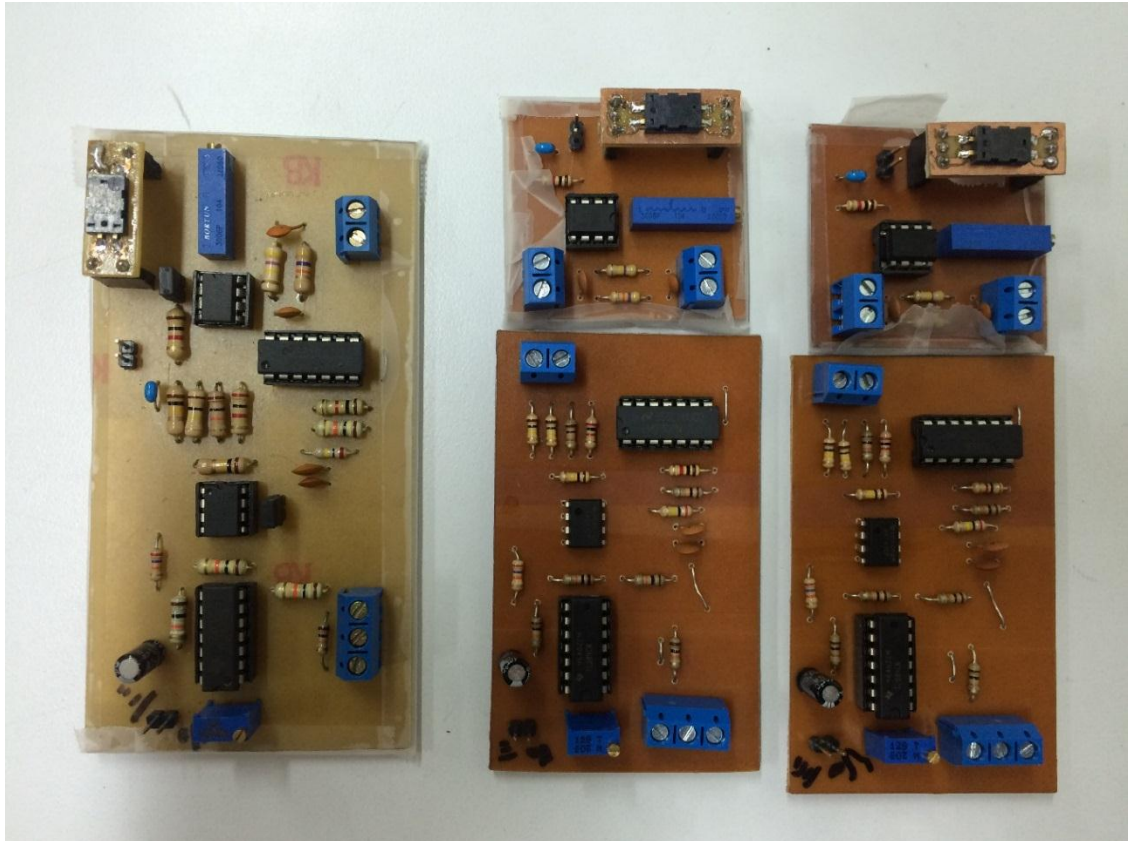
**Tabla 3. Frecuencias típicas en función de la humedad para el sensor HTS2030SMD.**

Typical response look-up table (Humidity Output)											
RH (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Fout (Hz)			7155	7080	7010	6945	6880	6820	6760	6705	6650
RH (%)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
Fout (Hz)	6600	6550	6500	6450	6400	6355	6305	6260	6210		

Tomado de la referencia [16].

**3.2.2 Acople electrónico.** Una vez realizado el montaje sugerido por el fabricante, se implementaron 4 etapas más para así poder lograr la adquisición de datos mediante un microcontrolador como se nota en la figura 18 (para ver el ruteo de los circuitos ver anexo 2).

**Figura 18. Circuitos implementados.**



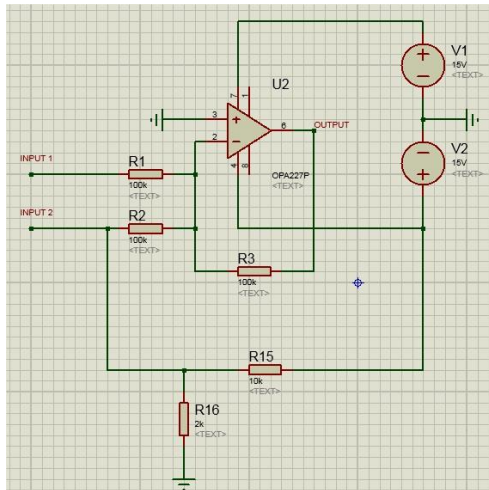
**Figura 19. Etapas de acople electrónico.**



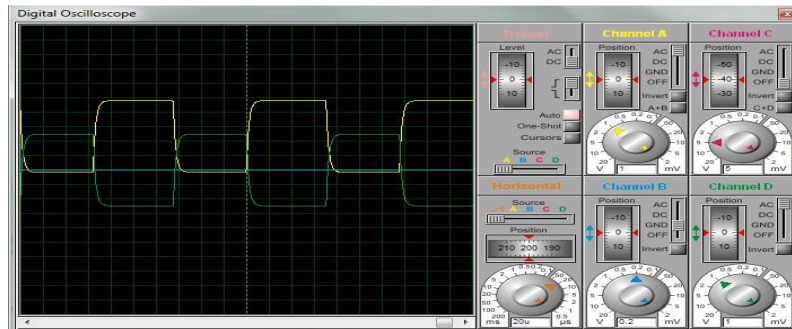
- Conversor de señal unipolar a bipolar:

El conversor de frecuencia voltaje funciona siempre y cuando dicha señal de entrada tenga cruces por cero, por tanto, se hizo necesario implementar la primera etapa como se nota en la figura 19 de convertir esta señal unipolar a bipolar, ya que la salida del circuito recomendado por el fabricante es de una señal cuadrada unipolar. Para ello se utilizó una configuración de sumador con ganancia unitaria como se muestra en la figura 20, en el que se agrega una señal de dc negativa. En la figura 21 se muestra la salida del circuito del fabricante y la salida del conversor unipolar a bipolar.

**Figura 20. Diagrama esquemático del conversor Unipolar a Bipolar.**



**Figura 21. Simulación de la salida del circuito del fabricante (amarilla) y salida del convertor (verde).**

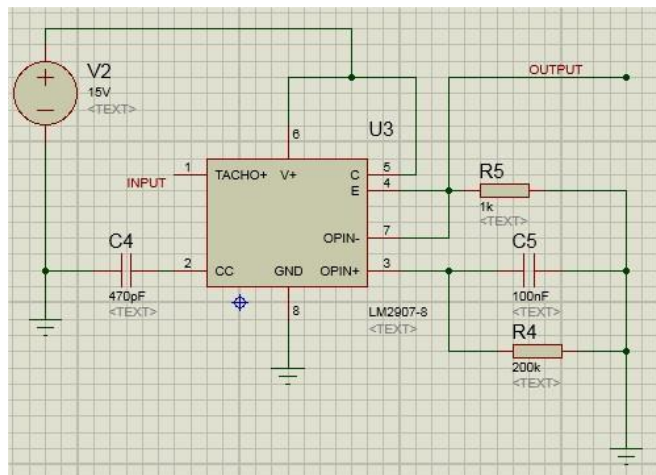


- Conversor de frecuencia a tensión DC:

En esta etapa se utilizó un circuito integrado LM2907 como se muestra en la figura 22. El LM2907 es un convertor de frecuencia voltaje que utiliza una configuración sencilla RC para realizar su trabajo. Su configuración electrónica está ubicada en un rango de frecuencias de 0 a 10kHz donde los valores de R1 y C1 se determinaron con la siguiente ecuación.

$$V_0 = F_{IN} * V_{CC} * R_1 * C_1$$

**Figura 22. Diagrama esquemático de convertor de frecuencias a tensiones.**

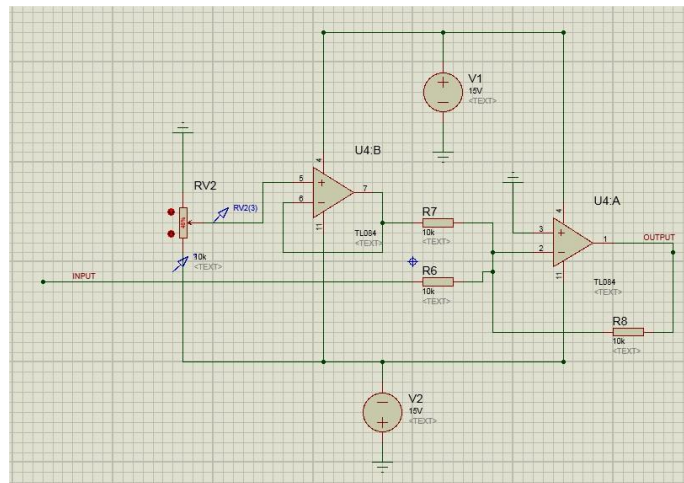


Tomado de la referencia [17].

- Buffer y sumador:

El rango de frecuencias que el sensor HTS2030SMD utiliza está entre 6210 Hz y 7155 Hz, por tanto, se estableció que cuando se encontrara en su valor mínimo (6210 Hz) la salida de voltaje fuese 0 voltios. Por consiguiente, se usó una configuración sumadora de ganancia unitaria para que reste el voltaje y lo establezca en cero. El buffer se utilizó para garantizar la precisión del voltaje en el puente resistivo. La configuración electrónica se puede apreciar en la figura 23.

**Figura 23. Diagrama esquemático de la etapa de Buffer y sumador.**



- Amplificador inversor y filtro pasa bajas:

Cuando ya se obtuvo el nivel de tensión en cero voltios a una frecuencia de 6210 Hz, se observó que al valor de frecuencia máximo (7155 Hz) el convertor entregaba aproximadamente 1.54 voltios. Debido a ello se amplificó 2.7 veces para obtener una gamma de valores más específicos en la adquisición de datos. El filtro pasa bajas butterworth de primer orden analógico de frecuencia de corte de 15 Hz se utilizó de acople a la tarjeta de adquisición para eliminar frecuencias indeseadas como se nota en la figura 24. La configuración electrónica se puede apreciar en la figura 25.

Figura 24. Simulación de la ganancia y fase del filtro vs. frecuencia.

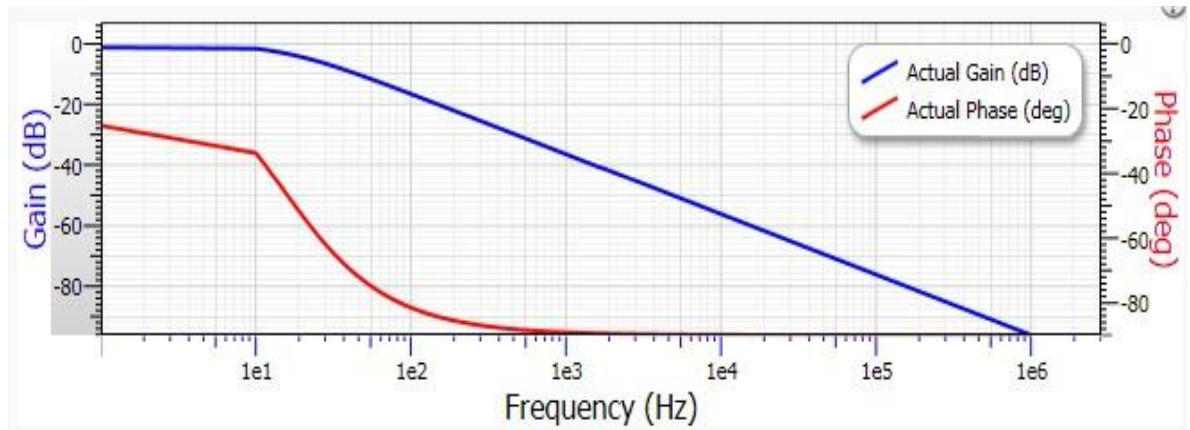
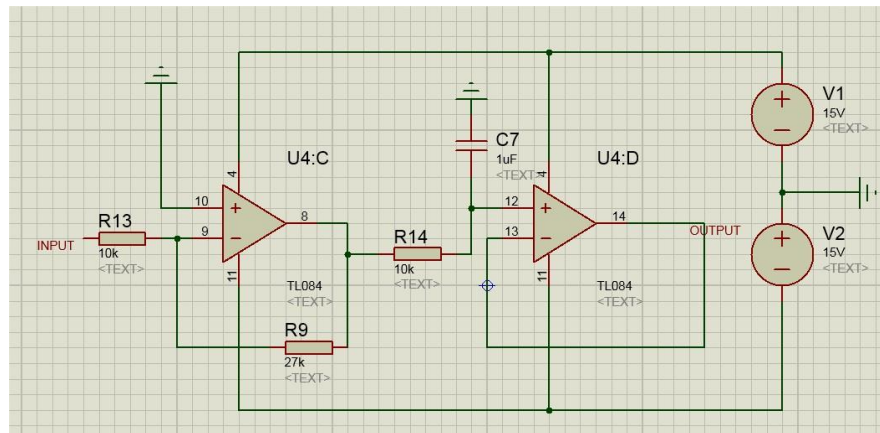


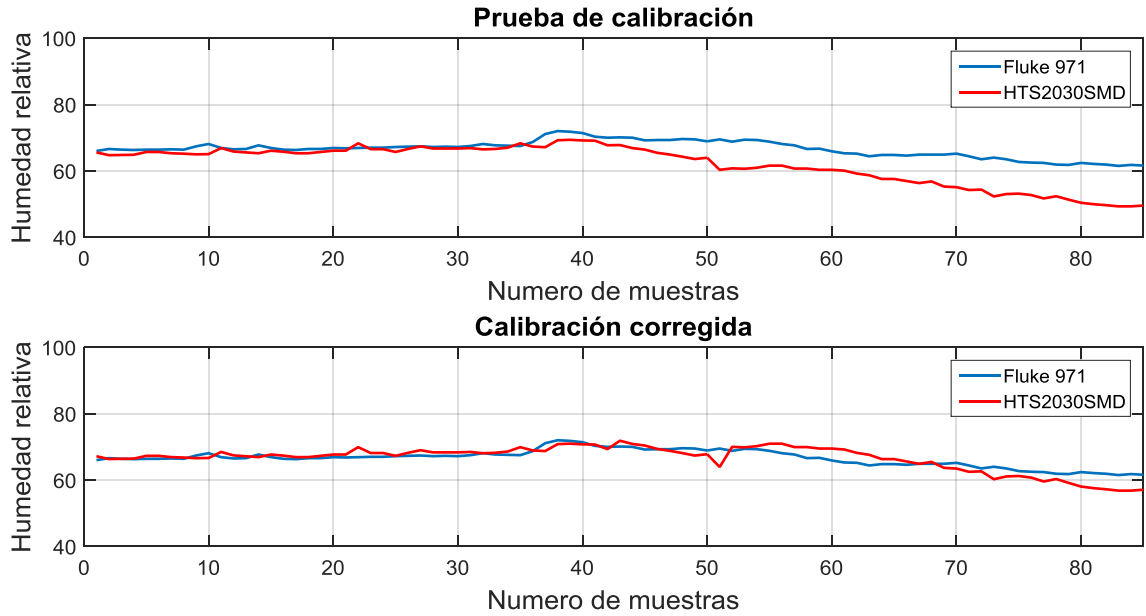
Figura 25. Diagrama esquemático de la etapa de amplificación y filtro basa bajas.



Para constatar la exactitud de los resultados que se tomaron con el circuito de acople electrónico se realizó una calibración con un Fluke 971<sup>4</sup>, donde los resultados se muestran en la figura 26. El error promedio en la medición sin corregir es del 7.0960% y después de aplicar corrección de ganancias y cruce por cero, es del 0.097%.

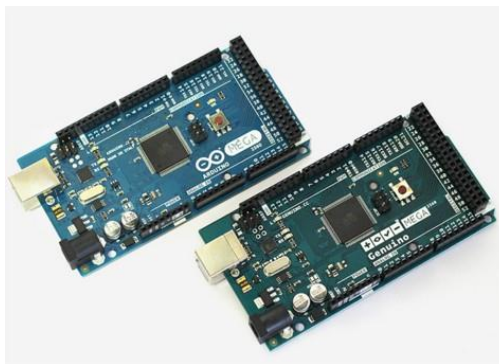
<sup>4</sup> El sensor de humedad relativa fue proporcionado en préstamo por la E<sup>3</sup>T el cual se encuentra debidamente calibrado.

**Figura 26. Diagrama de calibración. Fluke (azul) - Sensor (rojo).**



**3.2.3 Tarjeta de adquisición, enrutamiento con MATLAB® y algoritmo de adquisición.** La tarjeta de adquisición que se utilizó es la ARDUINO ATMEGA 2560 [18](4.8mv/bit - 5V - 10bit – 9600 muestras por segundo) como se nota en la figura 27. Las especificaciones técnicas se pueden consultar en la figura 28.

**Figura 27. Tarjetas de desarrollo para controlador Arduino (ATMEGA 2560).**



Tomado de la referencia [18].

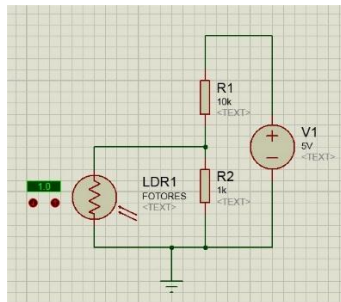
**Figura 28. Especificaciones técnicas del microcontrolador.**

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Tomado de la referencia [18].

Para obtener los datos de sensado de humedad mediante la tarjeta en Matlab®, se enrutó la misma con el software en otra computadora, de manera que se utilizó un circuito externo con una fotorresistencia como se nota en la figura 29, para inicializar la toma de datos en paralelo con las capturas de las cámaras mediante el inicio óptico (Ver anexo 3).

**Figura 29. Diagrama esquemático del circuito de inicialización de la tarjeta de adquisición.**



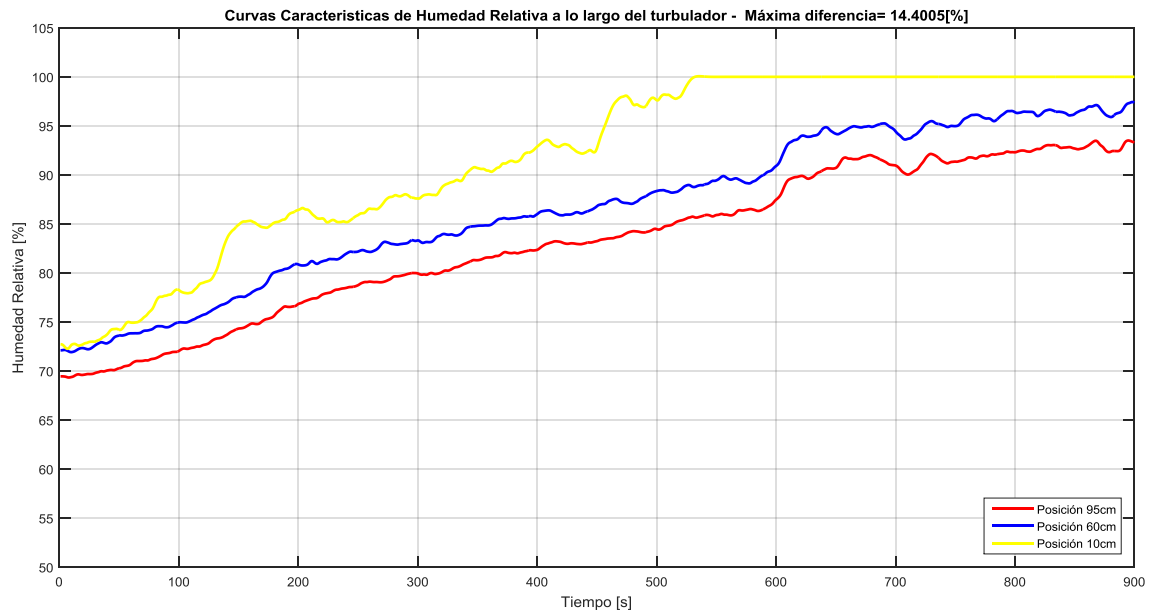
**3.2.4 Caracterización del medio turbulento.** Para emular el medio turbulento se utilizó un dispositivo (turbulador, construido en el laboratorio) como se muestra en la figura 30, el cual permite cambiar la variable física humedad con mayor facilidad. Para modificar la humedad relativa se evaporó agua a una distancia adecuada en el extremo izquierdo del turbulador, realizando así variaciones en la humedad relativa.

**Figura 30. Turbulador.**

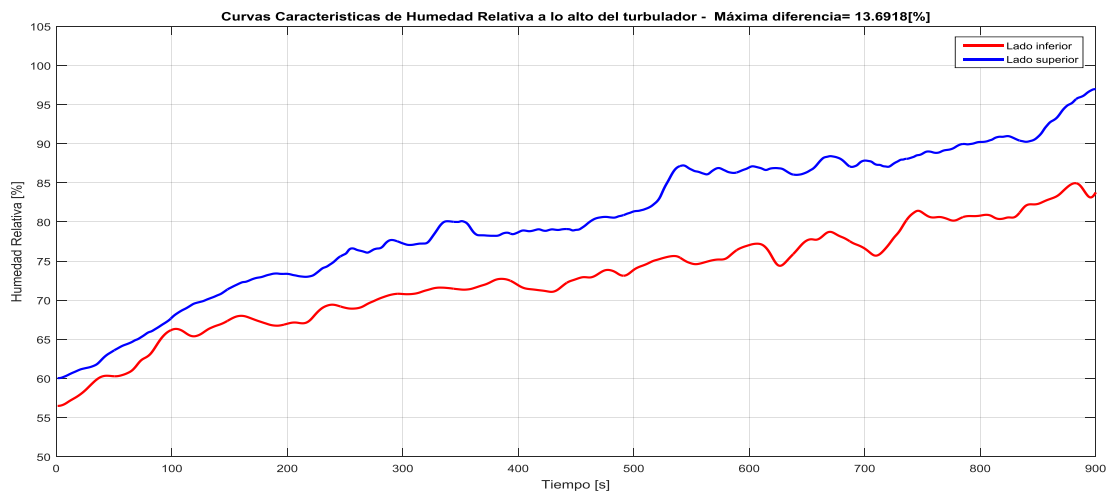


Para estimar la variación de la humedad en el turbulador en diferentes posiciones espaciales, se realizaron mediciones de humedad a lo largo, a lo ancho y a lo alto, mostrando que existe una diferencia de humedad relativa según la posición donde se mida. En las figuras 31, 32 y 33, se muestra la variación de la humedad relativa a lo largo, a lo alto y a lo ancho respectivamente en el turbulador.

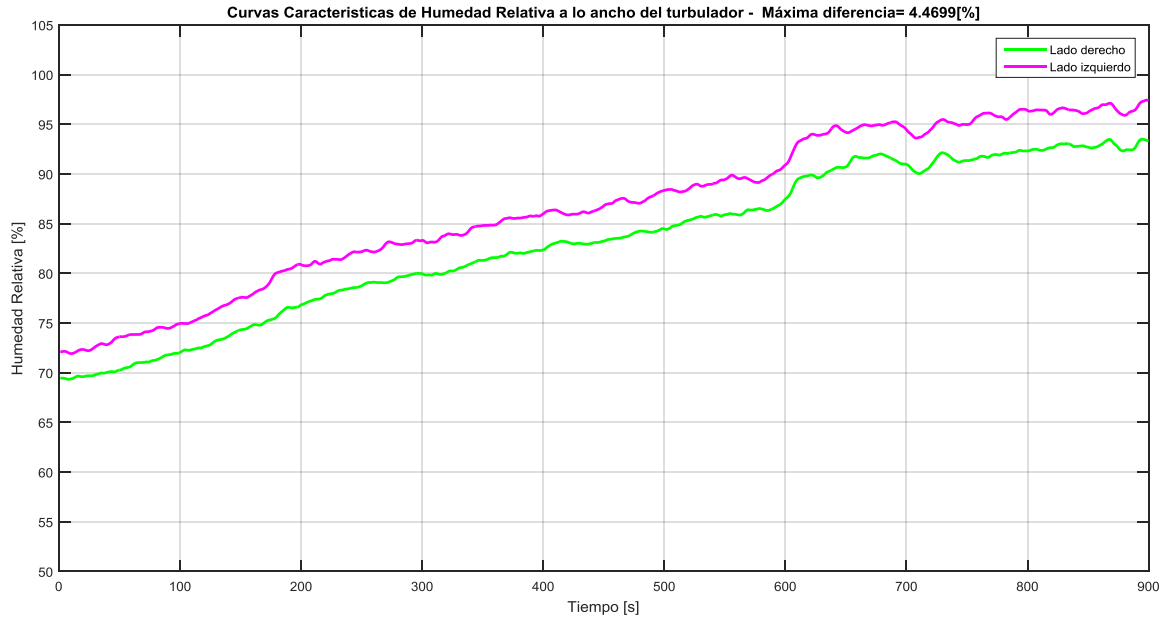
**Figura 31. Variación de la humedad relativa a lo largo del turbulador (Distancia medida a partir del extremo izquierdo del turbulador - Amarillo 10cm - Azul 60cm -Rojo 95cm. Con alto de 1cm y ancho 3.5cm en todas las posiciones).**



**Figura 32. Variación de la humedad relativa a lo alto del turbulador (Azul 5cm- Rojo 0cm). Con ancho de 3.5cm y largo 8cm en todas las posiciones.**



**Figura 33. Variación de la humedad relativa a lo ancho del turbulador (Magenta 1cm - Verde 6cm). Con alto de 3.5cm y largo 8cm en todas las posiciones**



En la figura 31 se puede observar que la humedad presenta una velocidad de propagación a través del turbulador, notando que la diferencia máxima entre la posición de 10cm y 95 cm es 14.4%RH. En la figura 32 se observa que la humedad se concentra en la parte superior, notando que la diferencia máxima es de 13.69%, sin embargo, en la figura 33 se observa que la humedad se mantiene casi constante a lo ancho del dispositivo.

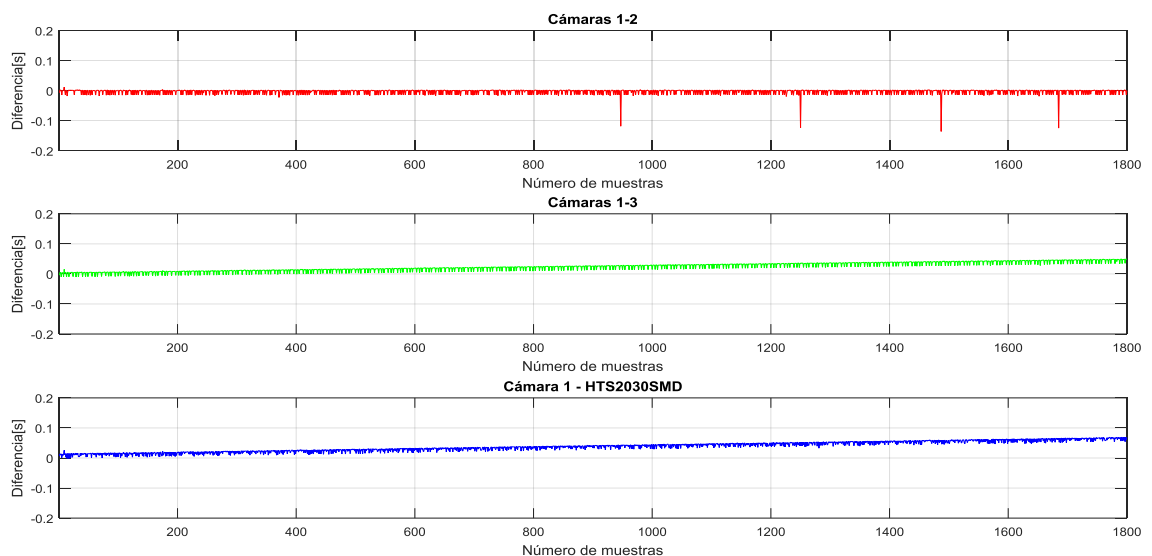
### 3.3 SINCRONIZACIÓN

**3.3.1 Tiempos de registro.** Para garantizar el sincronismo de las 3 cámaras CMOS y la tarjeta de adquisición se dispuso de 4 computadoras (una por cada dispositivo), se usó un algoritmo que permitió inicializar las capturas por medio del haz láser cuando este incide en las cámaras y el fotodiodo. Para garantizar que

todos los dispositivos inicien al mismo tiempo se hizo necesario fijar tiempos de retrasos adecuados, donde la tarjeta de adquisición tiene un retraso de 0.09 [s] y las cámaras tienen un retraso de 0.1 [s].

En la figura 34 se muestra la diferencia de los tiempos de captura tomando como referencia la cámara número 1. Donde se desea que dicha diferencia sea menor a 100ms, dado que se considera que cada 100ms cambia la turbulencia atmosférica a tal punto que cada realización se considera estadísticamente independiente [19].

**Figura 34. Diferencias encontradas entre los tiempos de captura de los dispositivos.**



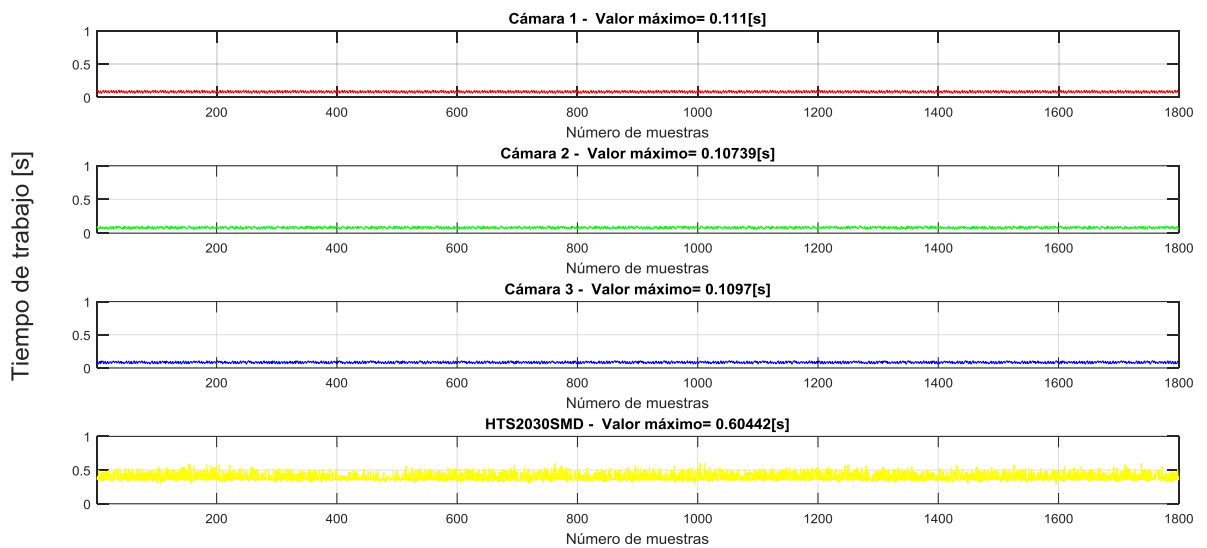
A partir de las mediciones realizadas en la figura 34, durante el desarrollo de este proyecto se realizaron diez pruebas, donde la primera prueba es denominada patrón debido a que se trató de mantener las condiciones normales del ambiente en el laboratorio. En la tabla 4 se muestran los porcentajes de las muestras de cada prueba que cumplen con el criterio de tener un tiempo de sincronización menor a los 100ms, además presenta el porcentaje de muestras que tienen un tiempo de sincronización menor a 50 ms.

**Tabla 4. Sincronización en las diferentes pruebas.**

Pruebas	Porcentajes de muestras sincronizadas menor 100ms	Porcentajes de muestras sincronizadas menor 50ms
PATRÓN	99,77 [%]	72,72 [%]
P1	100 [%]	99,38 [%]
P2	100 [%]	57,55 [%]
P3	100 [%]	60,88 [%]
P4	100 [%]	66,94 [%]
P5	99,72 [%]	99,38 [%]
P6	100 [%]	100 [%]
P7	100 [%]	99,94 [%]
P8	99,94 [%]	99,44 [%]
P9	100 [%]	100 [%]

Para evitar el solapamiento entre las muestras se debe escoger un adecuado periodo, el cual se seleccionó a partir del tiempo de trabajo de cada dispositivo (véase la figura 35). Donde el sensor HTS2030SMD tiene un tiempo de trabajo que oscila entre 400ms y 600ms, por lo tanto, se eligió un periodo aproximado de 1s dependiendo de la computadora.

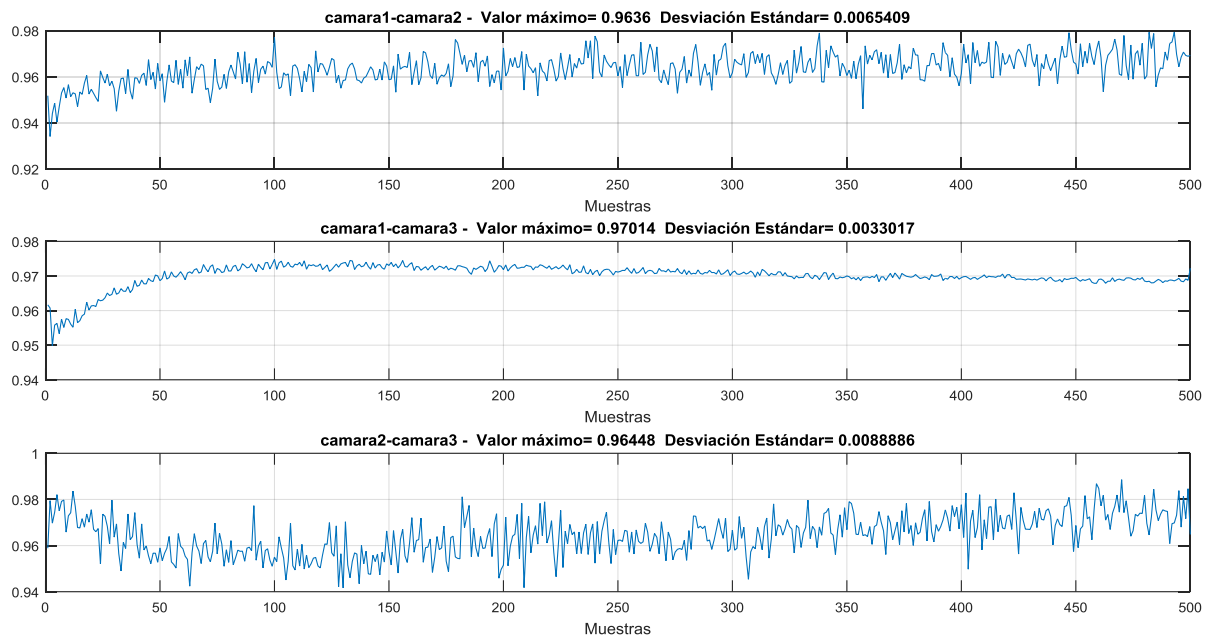
**Figura 35. Tiempo de trabajo para los diferentes dispositivos.**



Para corroborar la sincronización se hace necesario realizar una prueba que permita comparar que tan similares son las señales entre sí. A continuación, se explica con detalle la prueba.

**3.3.2 Verificación por correlación.** La correlación de imágenes constituye una técnica que indica si dos señales están relacionadas o no. Para verificar la sincronización, se realizó una prueba en el que todas las cámaras tuviesen la misma distancia desde la cavidad del láser y sus tiempos de exposición fueran idóneos, donde si la sincronización es óptima la correlación es máxima. Los resultados de la prueba se muestran en la figura 36.

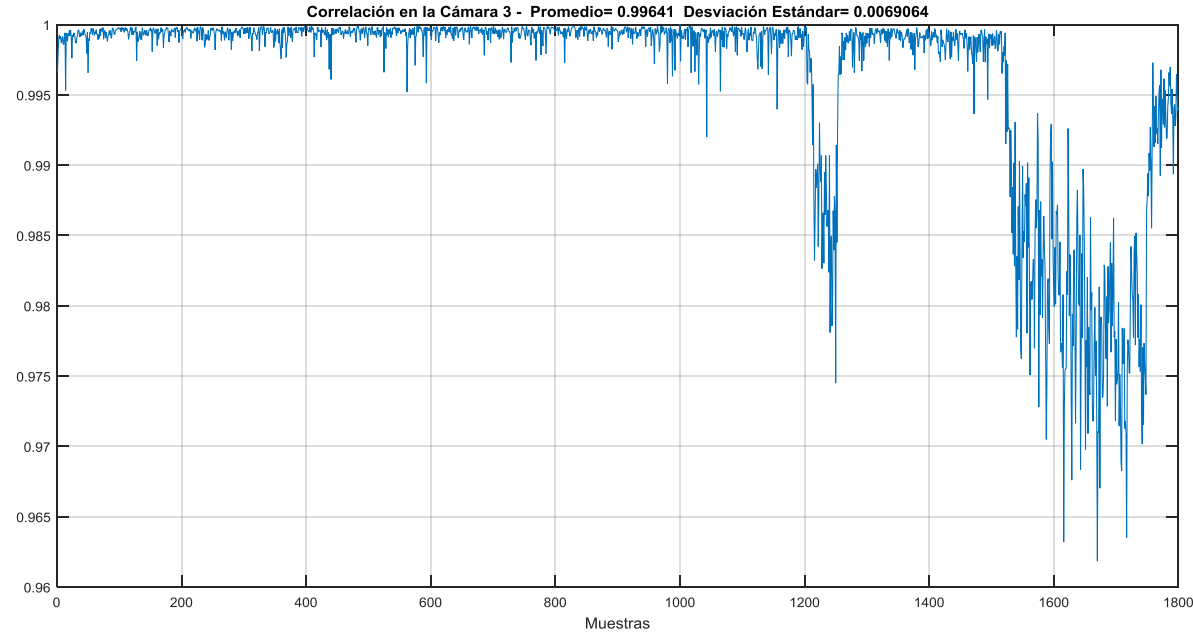
**Figura 36. Correlación de imágenes capturadas por las cámaras, dispuestas simultáneamente a la misma distancia.**



En la figura 36 se puede corroborar que las imágenes presentan fuerte relación debido a la cercanía. Como contraparte se mostró la correlación de la prueba P6 (se realizaron cambios abruptos de humedad) donde se correlacionó la primera imagen presentada en la cámara 3 con todas las demás tomadas en diferentes

tiempos en el mismo dispositivo. Por consiguiente, se presentaron variaciones más fuertes y así demostrar la variación de la correlación como se muestra en la figura 37.

**Figura 37. Correlación de la cámara 3 en la prueba P6.**



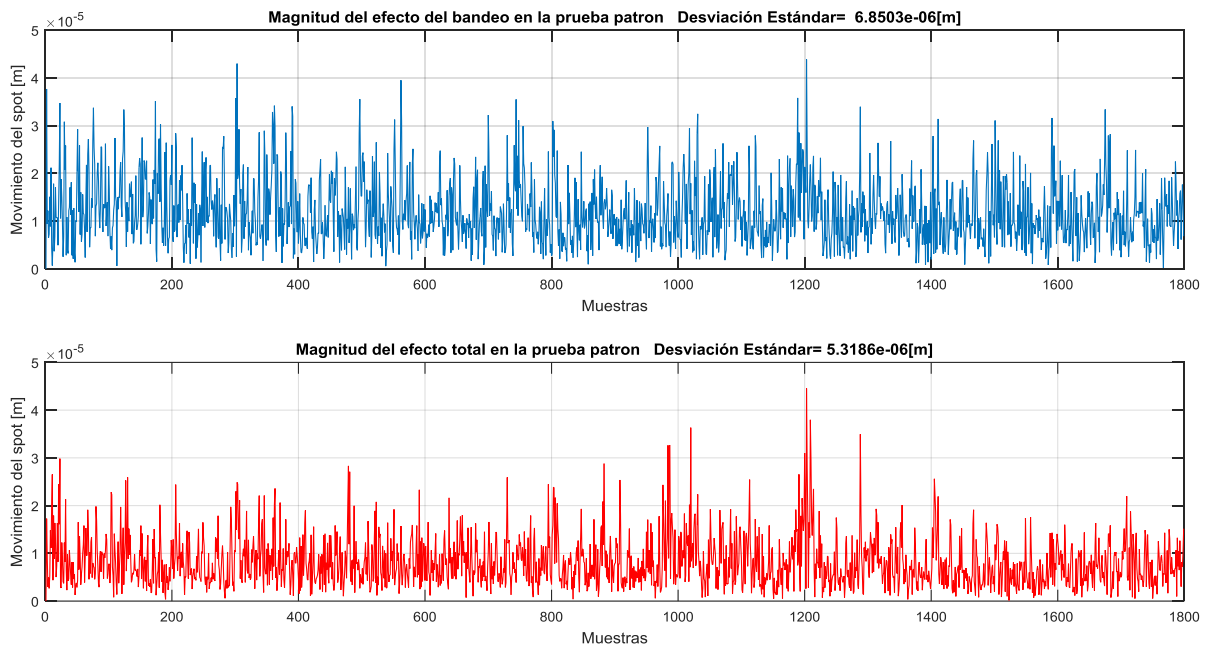
Es notable en la figura 37 que en las muestras 1200 a 1270 es dónde se introduce una variación de humedad, que también se presenta para las muestras mayores a 1520.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

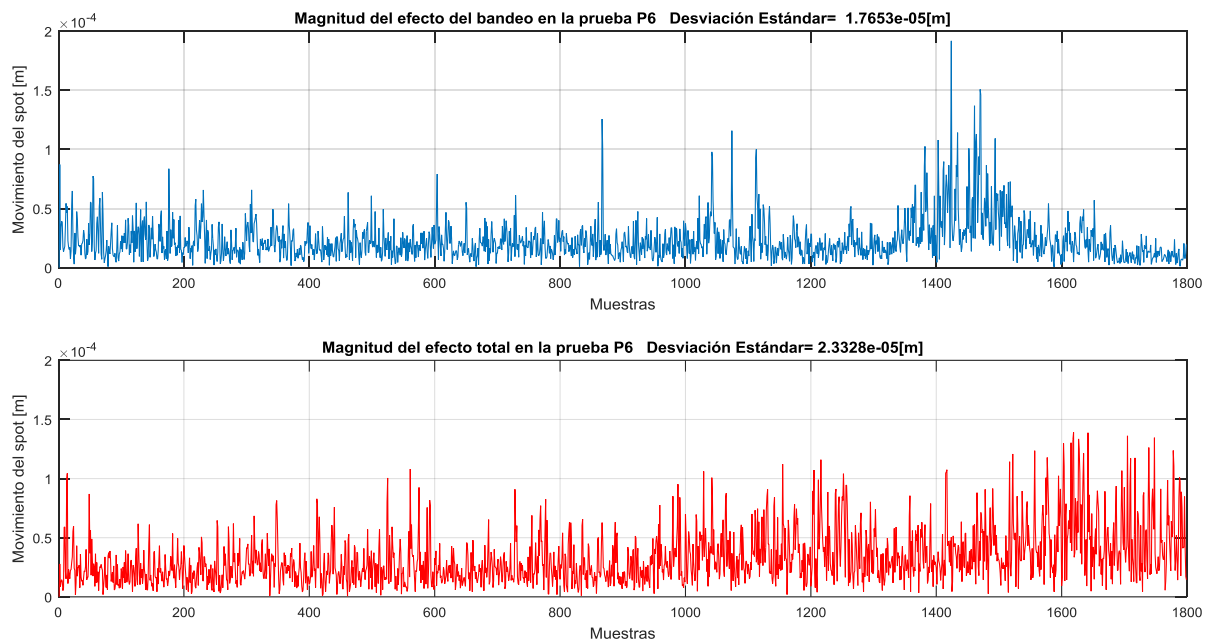
### **4.1 SEPARACIÓN DEL EFECTO DEL BANDEO.**

Como se mencionó en el capítulo 1, el bandeo es un efecto que debe ser analizado para poderlo discernir de los resultados causados por la turbulencia atmosférica. En la figura 38 correspondiente a la prueba patrón, se puede apreciar que el desplazamiento del centroide proyectado por el bandeo a partir de las cámaras 1 y 2, es similar al movimiento visto en la cámara 3, debido a que la turbulencia es mínima. Sin embargo, en la figura 39 se realizó el mismo procedimiento en la prueba P6 y se observó que el efecto del bandeo es ligeramente menor al movimiento visto en la cámara 3. Cabe aclarar que en las figuras 38 y 39 se muestra la magnitud del vector de desplazamiento del centroide para cada caso.

**Figura 38. Movimiento proyectado por bandeo (Azul) y movimiento sentido (Rojo) en la cámara 3 de la prueba patrón.**

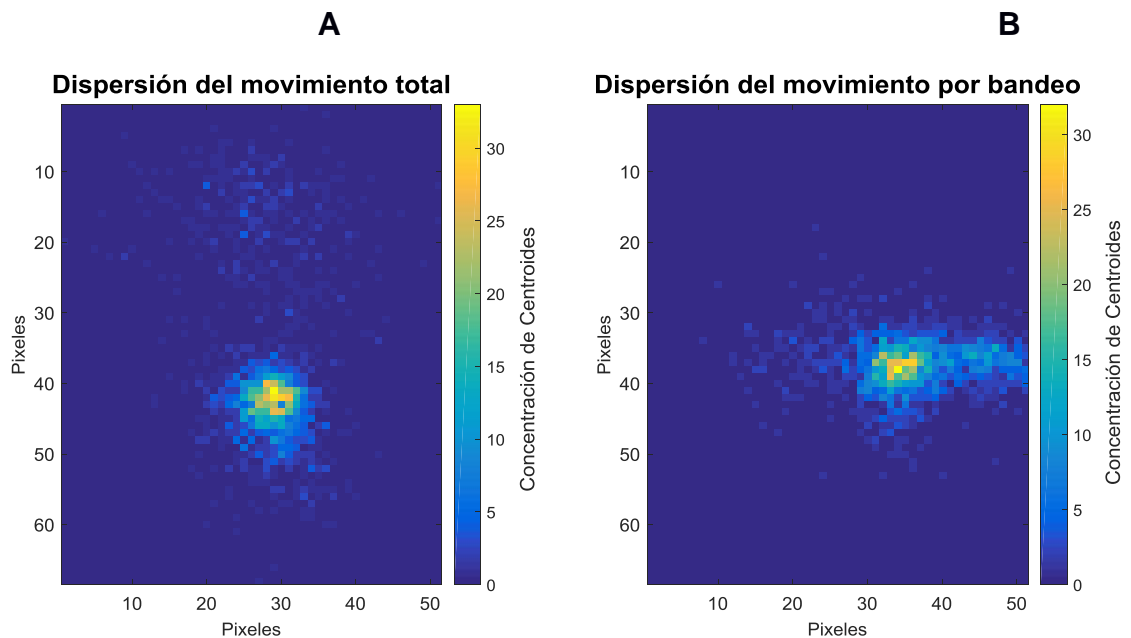


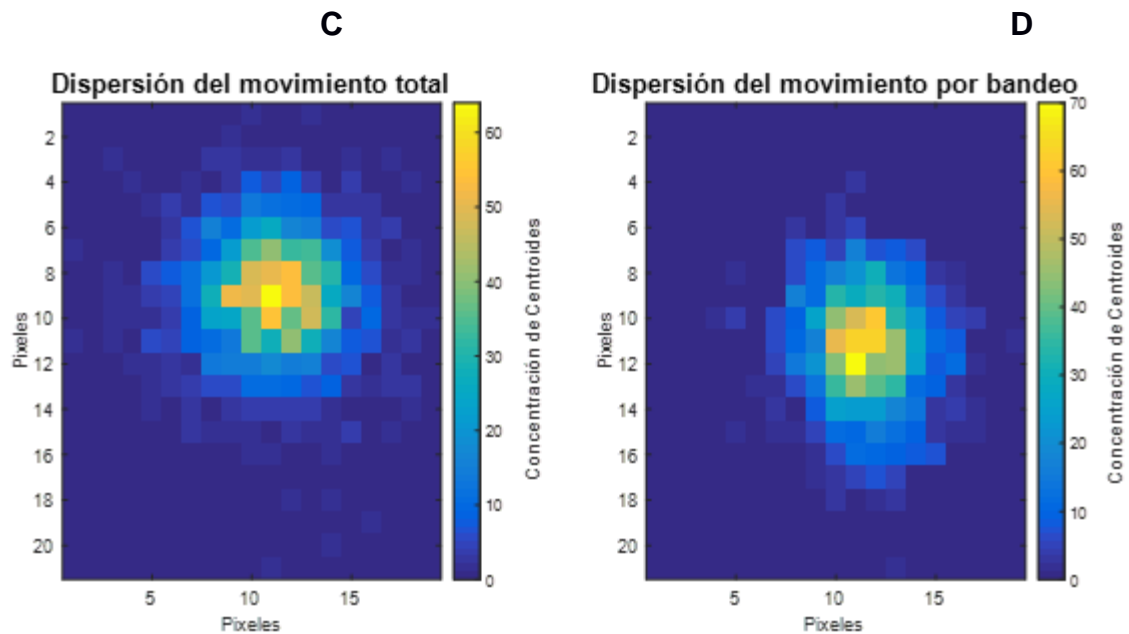
**Figura 39. Movimiento proyectado por bandeo (Azul) y movimiento sentido (Rojo) en la cámara 3 de la prueba P6.**



En la parte A y B de la figura 40, se puede apreciar la dispersión del movimiento teórico del spot causado por el bandeo y el movimiento total efectuado en la prueba P6. Donde se observa que la dispersión del movimiento causado por bandeo es menor que la dispersión del movimiento total. Ahora bien, en la parte C y D de la misma figura se aprecian las mismas dispersiones, pero en la prueba patrón, donde se puede observar que la dispersión del bandeo es similar que la dispersión del movimiento total.

**Figura 40. Dispersión del movimiento del centroide total y por bandeo**





#### 4.2 ANÁLISIS DE CENTROIDES Y ÁREAS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD.

En este proyecto se realizaron 10 diferentes pruebas (patrón, p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8 y p9), donde la prueba patrón se usó como referencia para poder comparar los resultados de las pruebas restantes. En la prueba patrón como ya se mencionó con anterioridad, se mantuvieron las condiciones normales del laboratorio. Las pruebas realizadas se clasificaron en tres grupos, el primero compuesto por las pruebas p1 a p5, las cuales tienen variaciones suaves de la humedad relativa con diferentes temperaturas, el segundo que está conformado solo por la prueba p6<sup>5</sup> tiene variaciones abruptas de la humedad relativa y el tercer grupo conformado por las pruebas p7 a p9. En este último grupo de pruebas, mediante un control on/off en el sistema de calentamiento del agua que se utiliza para generar la humedad, se mantiene constante dentro de un rango aceptable la

<sup>5</sup> El máximo cambio logrado experimentalmente que se pudo obtener de humedad relativa es de 2.5% por segundo.

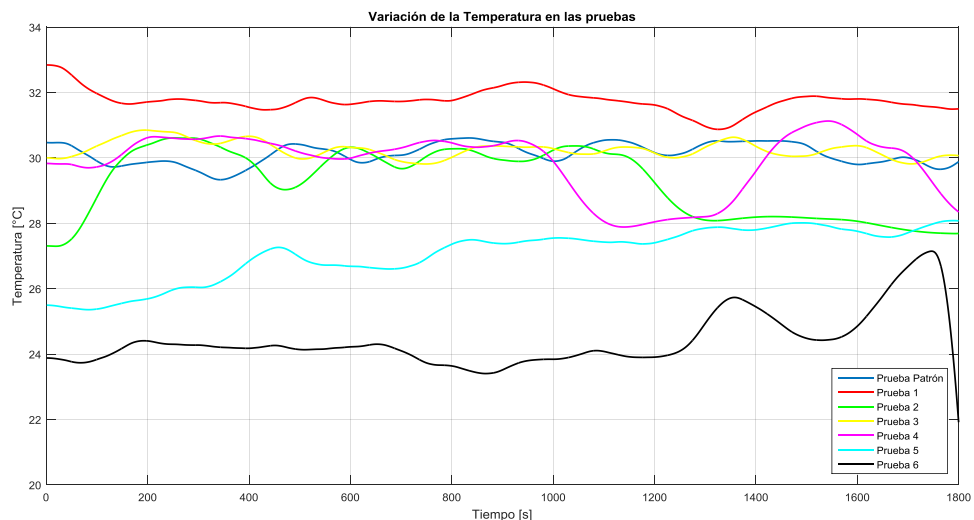
humedad relativa. La tabla 5 muestra la clasificación de las pruebas con sus respectivas horas de inicio.

**Tabla 5. Clasificación de las pruebas con sus respectivas horas de inicio.**

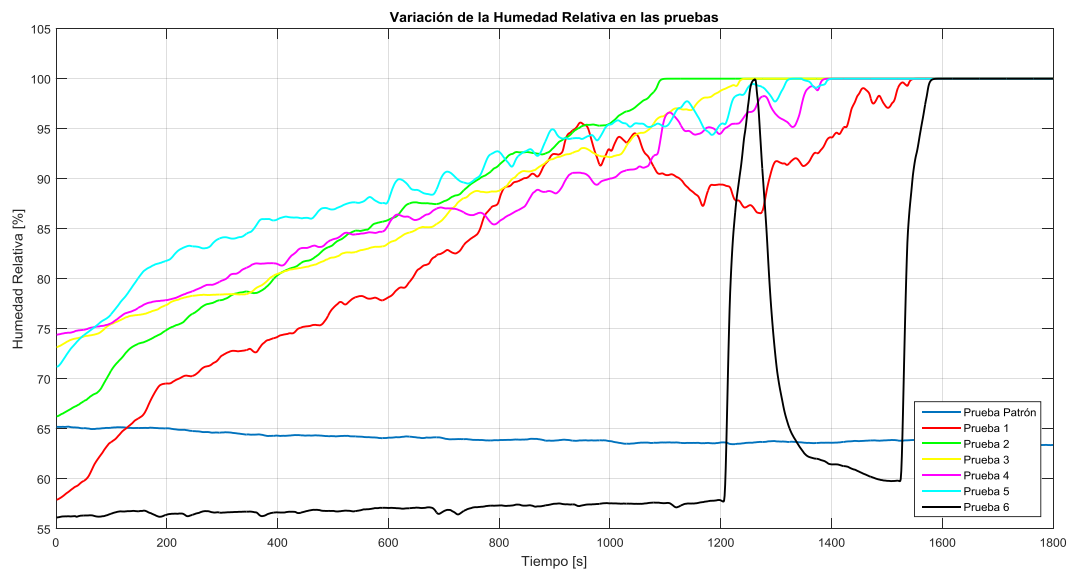
PRUEBA	HORA DE INICIO	GRUPO
<b>PATRÓN</b>	<b>7:15 am</b>	<b>-</b>
<b>P1</b>	<b>8:00 am</b>	<b>1</b>
<b>P2</b>	<b>9:30 am</b>	<b>1</b>
<b>P3</b>	<b>10:15 am</b>	<b>1</b>
<b>P4</b>	<b>2:45 pm</b>	<b>1</b>
<b>P5</b>	<b>4:20 pm</b>	<b>1</b>
<b>P6</b>	<b>12:00 pm</b>	<b>2</b>
<b>P7</b>	<b>1:15 am</b>	<b>3</b>
<b>P8</b>	<b>4:35 am</b>	<b>3</b>
<b>P9</b>	<b>5:20 am</b>	<b>3</b>

En la figura 41 y 42 se muestran las temperaturas y las humedades relativas del primer y segundo grupo respectivamente.

**Figura 41. Temperaturas de las pruebas patrón, primer grupo y segundo grupo. Instalado en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.**

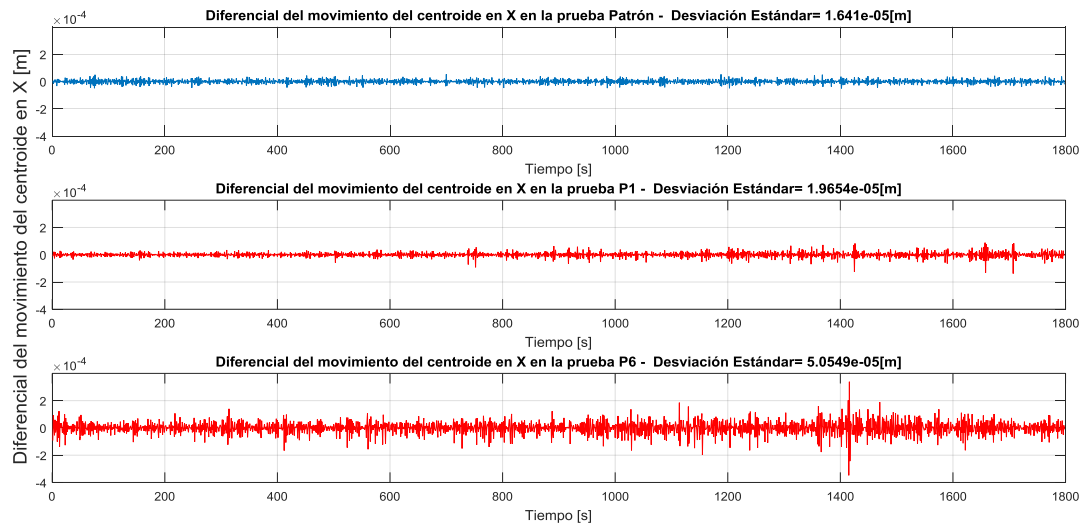


**Figura 42. Humedades relativas de las pruebas patrón, primer grupo y segundo grupo. Instalado en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.**

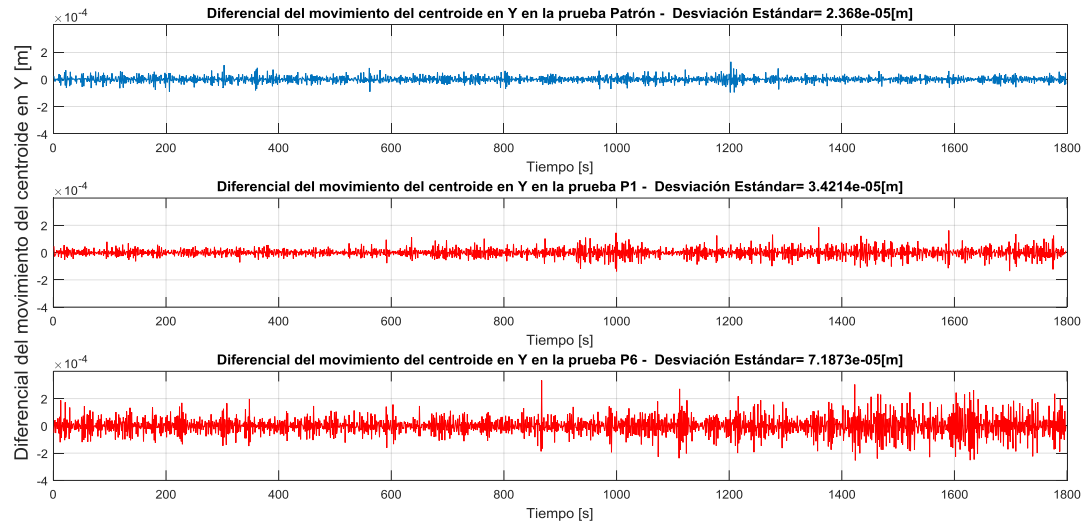


Los resultados experimentales obtenidos en el primer y segundo grupo, permiten observar que las variaciones de la humedad producen cambios en la temperatura. Por lo tanto, no es conveniente profundizar en el análisis de estas pruebas debido a la fuerte influencia de la temperatura, sin embargo, se mostraron los cambios que presentaron el centroide y el área del spot en las pruebas patrón, p1 y p6 en las figuras 43, 44 y 45 respectivamente.

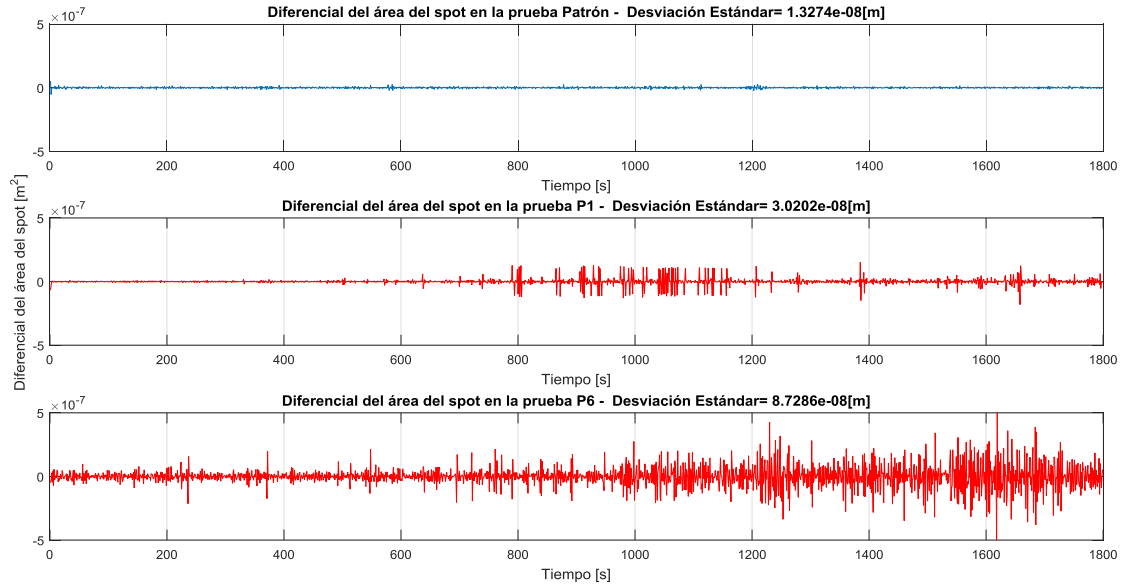
**Figura 43. Diferencial del movimiento del centroide en X en las pruebas patrón, P1 y P6.**



**Figura 44. Diferencial del movimiento del centroide en Y en las pruebas patrón, P1 y P6.**

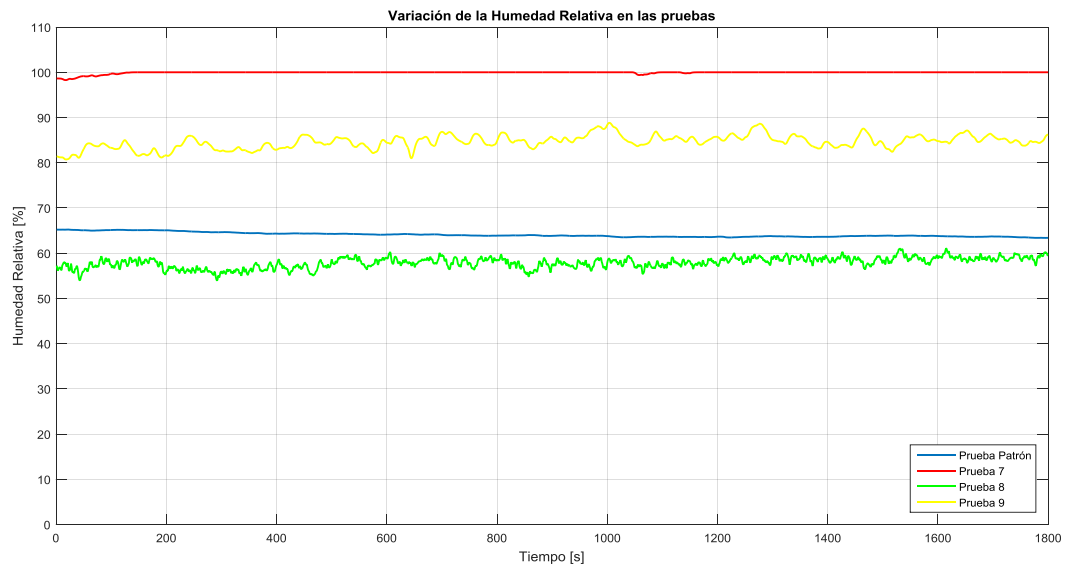


**Figura 45. Diferencial del área del spot en las pruebas patrón, P1 y P6.**

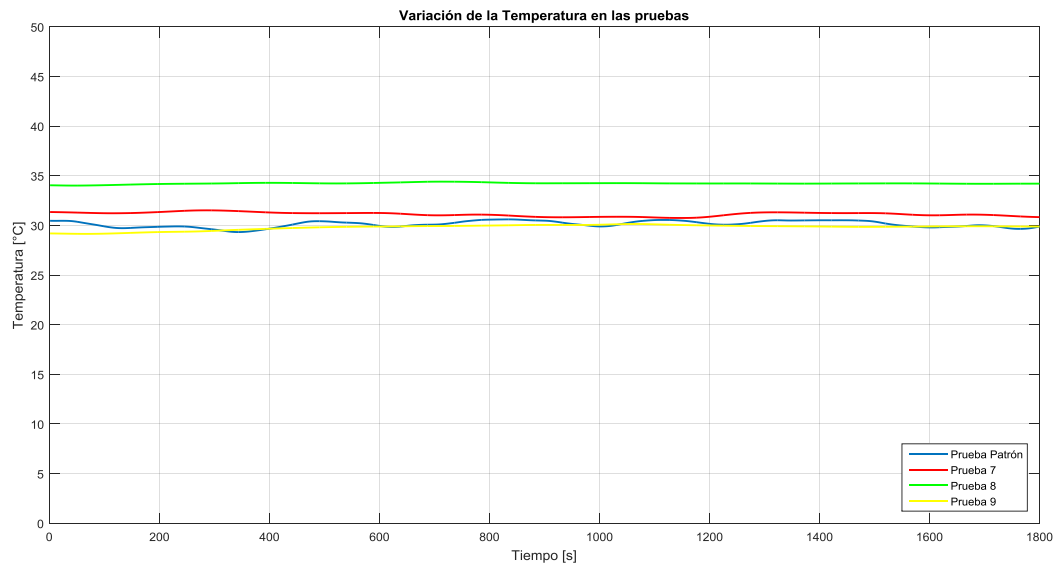


Se observó que las variaciones de los parámetros del spot en los incrementos fuertes de la humedad son significativas, sin embargo, como se mencionó anteriormente estas variaciones pueden tener aportes de otros parámetros. Por tanto, se hace necesario tener la humedad constante permitiendo que las fluctuaciones sean independientes a parámetros no deseados. En las figuras 46 y 47 se muestra el comportamiento de humedad y temperatura en las pruebas del grupo 3 (p7, p8 y p9) con sus respectivos datos en las tablas 6 y 7 respectivamente.

**Figura 46. Humedades relativas de las pruebas patrón y del tercer grupo. Medidas en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.**



**Figura 47. Temperaturas de las pruebas patrón y del tercer grupo. Medidas en la posición izquierda a 10cm a lo largo, 3.5cm a lo ancho y 1cm a lo alto.**



**Tabla 6. Datos estadísticos para la humedad relativa de la prueba patrón y las pruebas del tercer grupo.**

<b>Pruebas De Humedad</b>	<b>Valor Promedio [%RH]</b>	<b>Desviación estándar [%RH]</b>	<b>Diferencia entre máximo y mínimo [%RH]</b>
<b>Patrón</b>	64.0571	0.4993	1.8472
<b>P7</b>	99.1357	0.2611	1.7286
<b>P8</b>	57.8884	1.1809	7.1831
<b>P9</b>	84.6117	1.4957	8.0979

**Tabla 7. Datos estadísticos para la temperatura de la prueba patrón y las pruebas del tercer grupo.**

<b>Pruebas De Temperatura</b>	<b>Valor Promedio [°C]</b>	<b>Desviación estándar [°C]</b>	<b>Diferencia entre máximo y mínimo [°C]</b>
<b>Patrón</b>	30.1282	0.3226	1.2769
<b>P7</b>	31.1306	0.2007	0.7685
<b>P8</b>	34.2303	0.0769	0.3955
<b>P9</b>	29.8059	0.2723	0.9966

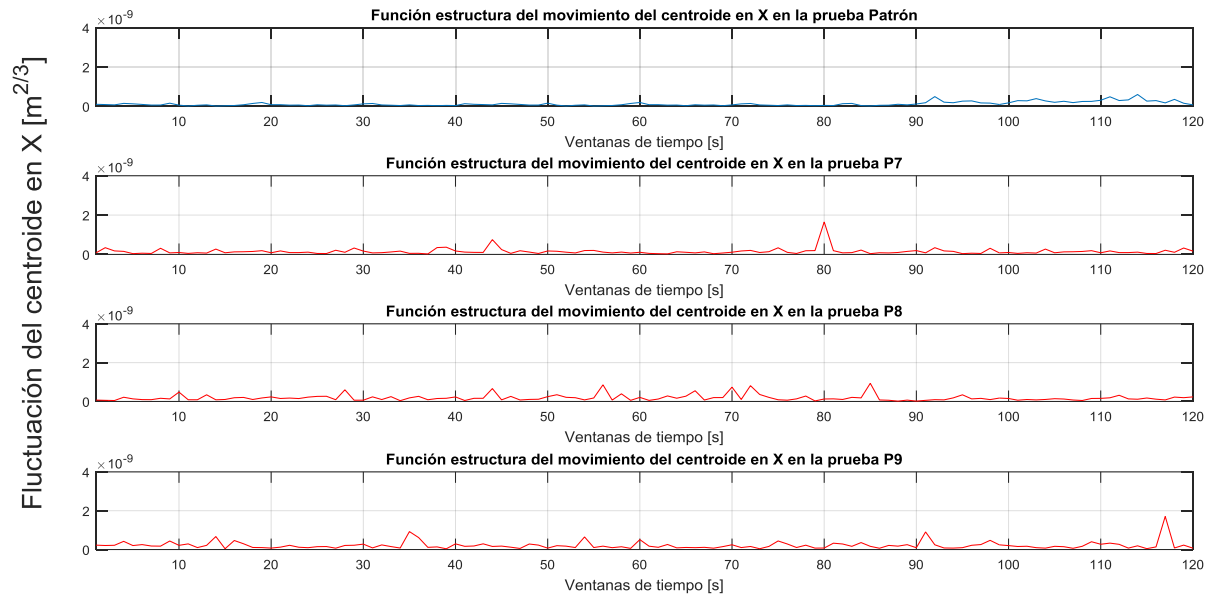
A partir de la información obtenida en las tablas 6 y 7 de las figuras 46 y 47, se puede observar que la humedad y temperatura tiende a ser constante, permitiendo hallar la dependencia de las fluctuaciones de los parámetros del spot respecto a la humedad presente, dado que facilita encontrar las fluctuaciones para un valor de humedad. Para ello, se utilizó una herramienta estadística llamada función estructura que permite analizar dichas fluctuaciones causadas por la turbulencia generada.

**4.2.1 Función estructura.** La turbulencia atmosférica es un proceso no estacionario debido a que su valor medio varía en el tiempo. Por tanto, se hace necesario usar una expresión que permita interpretar las fluctuaciones y los incrementos estacionarios. Para ello se utiliza la función estructura [20],

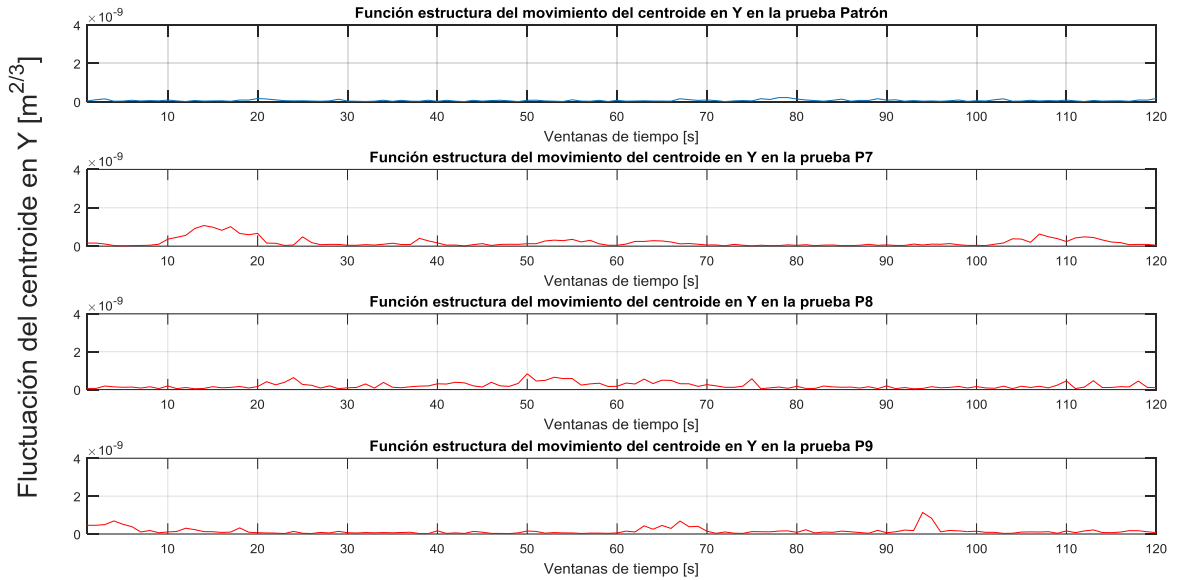
$$D_x(k_i) = \langle [x(k_i) - \langle x(k_i) \rangle]^2 \rangle$$

Para analizar las fluctuaciones de los centroides y áreas, se realizaron las funciones estructuras respectivas en las pruebas patrón y del tercer grupo en las figuras 48, 49 y 50, con sus respectivos promedios en las tablas 8, 9 y 10. Cada una de estas gráficas poseen ventanas de 10 segundos, es decir, cada prueba tiene 1800 muestras, por lo tanto, se obtuvieron 180 fluctuaciones locales (se descartaron algunas fluctuaciones locales debido a su alta dispersión en los centroides).

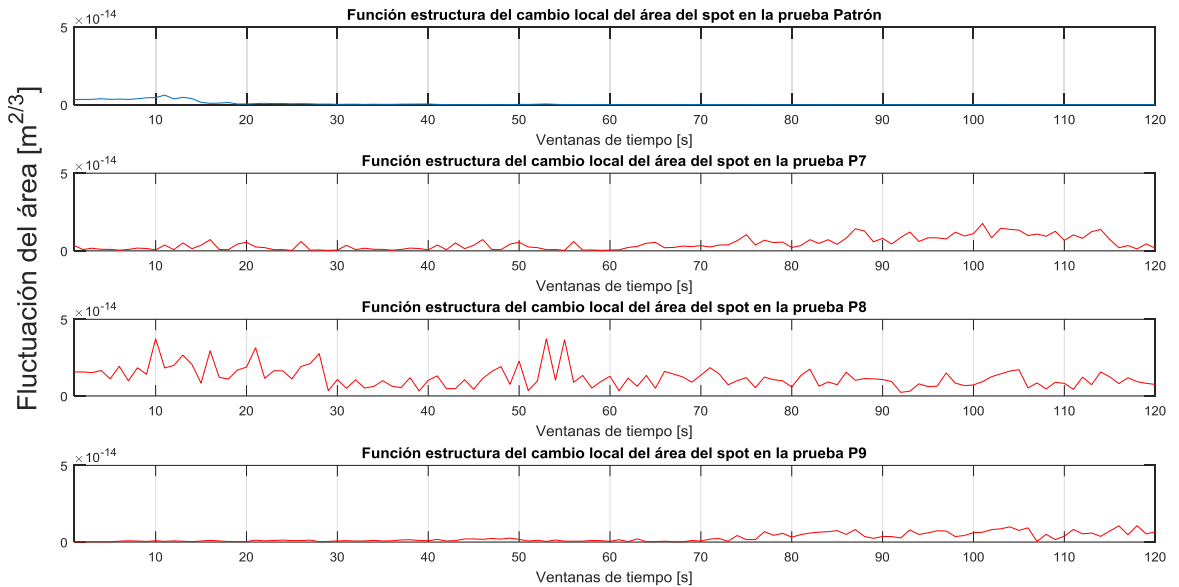
**Figura 48. Función estructura del movimiento local del centroide en X en las pruebas patrón, p7, p8 y p9.**



**Figura 49. Función estructura del movimiento local del centroide en Y en las pruebas patrón, p7, p8 y p9.**



**Figura 50. Función estructura del cambio local del área en las pruebas patrón, p7, p8 y p9.**



**Tabla 8. Fluctuación promedio global de los centroides en X de las pruebas patrón y tercer grupo.**

<b>Pruebas Centroide X</b>	<b>Fluctuación Promedio global [m<sup>^(2/3)</sup>]</b>
<b>Patrón</b>	7.7671e-11
<b>P7</b>	2.1360e-10
<b>P8</b>	2.6286e-10
<b>P9</b>	1.8262e-10

**Tabla 9. Fluctuación promedio global de los centroides en Y de las pruebas patrón y tercer grupo.**

<b>Pruebas Centroide Y</b>	<b>Fluctuación Promedio global [m<sup>^(2/3)</sup>]</b>
<b>Patrón</b>	6.4189e-11
<b>P7</b>	1.9622e-10
<b>P8</b>	2.0755e-10
<b>P9</b>	1.5400e-10

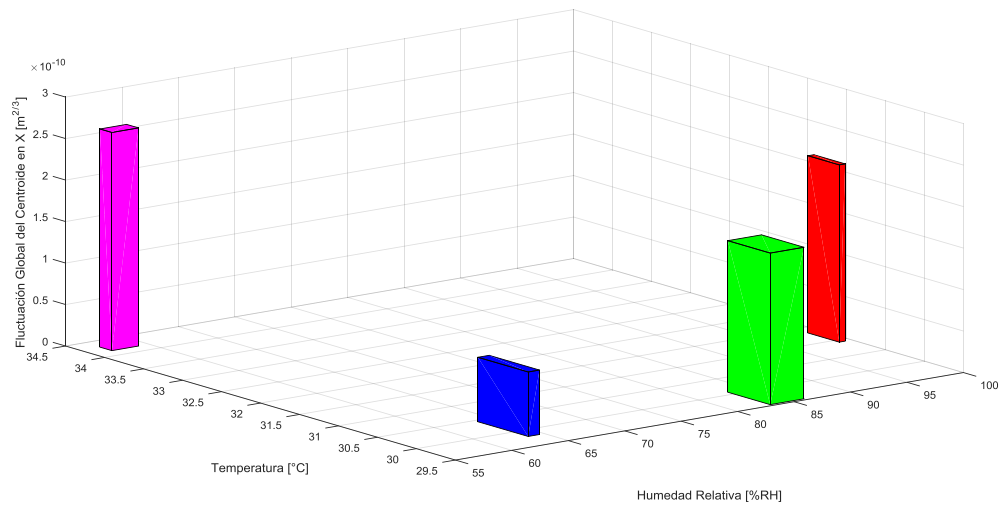
**Tabla 10. Fluctuación promedio global del área del spot de las pruebas patrón y tercer grupo.**

<b>Pruebas Área</b>	<b>Fluctuación Promedio global [m<sup>^(2/3)</sup>]</b>
<b>Patrón</b>	6.4562e-16
<b>P7</b>	4.5717e-15
<b>P8</b>	1.2150e-14
<b>P9</b>	2.7548e-15

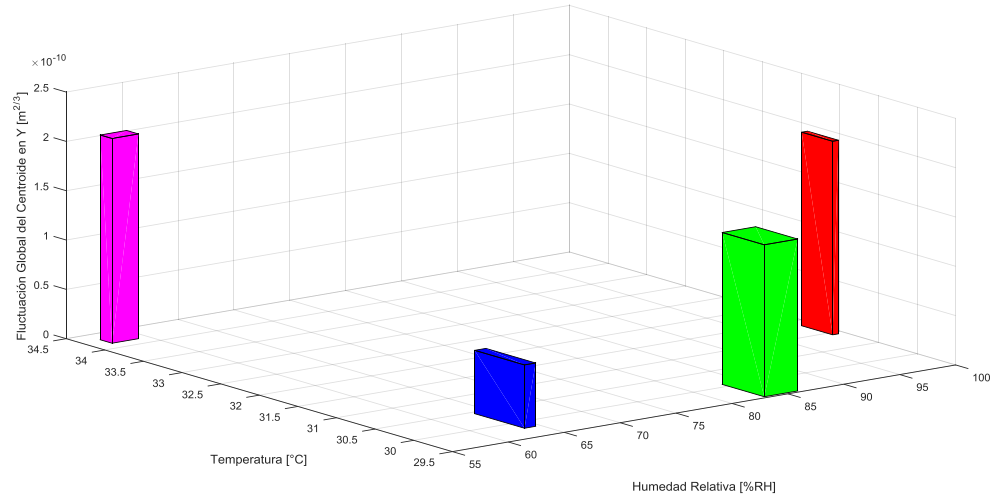
Como se ha mencionado anteriormente la temperatura es un parámetro influyente en la humedad, por eso se hace conveniente ilustrar de manera explícita dicho aporte de la temperatura que se muestra en las figuras 51, 52 y 53. Donde los límites para estas graficas corresponden a:

- La fluctuación global, se grafica el promedio de las fluctuaciones locales del parámetro, mostradas en las tablas 8, 9 y 10.
- La humedad relativa y la temperatura, se grafica el valor promedio mas menos su desviación estándar del parámetro, mostradas en las tablas 6 y 7.

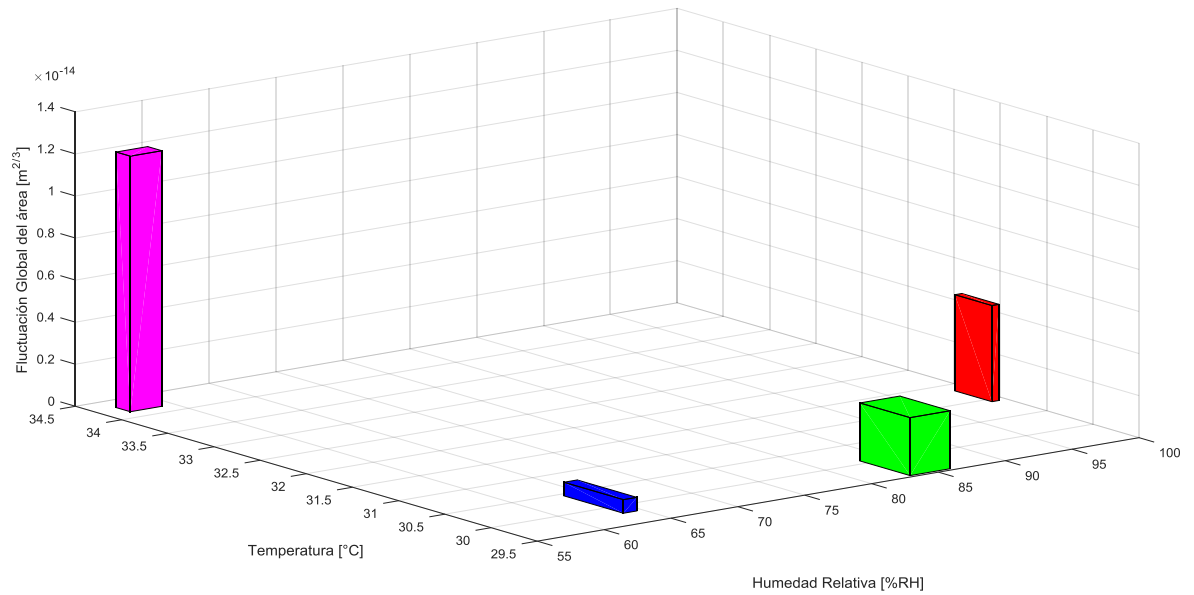
**Figura 51. Fluctuación global del centroide en X respecto a la humedad y temperatura para las pruebas patrón (azul), P7 (rojo), P8 (Magenta) y P9 (Verde).**



**Figura 52. Fluctuación global del centroide en Y respecto a la humedad y temperatura para las pruebas patrón (azul), P7 (rojo), P8 (Magenta) y P9 (Verde).**



**Figura 53. Fluctuación global del área respecto a la humedad y temperatura para las pruebas patrón (azul), P7 (rojo), P8 (Magenta) y P9 (Verde).**



A partir de la información obtenida del análisis de la función estructura de las pruebas realizadas, se observó que las fluctuaciones diferenciales locales y globales incrementan a mayores niveles de humedad, siempre y cuando tengan temperaturas similares (la prueba p8 presenta mayores fluctuaciones diferenciales locales y globales porque su temperatura es mayor).

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

## 5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- En este trabajo se analizó como es el comportamiento de la humedad relativa a través de un prototipo de laboratorio y así, poder observar los efectos en la turbulencia atmosférica. Es importante resaltar que los cambios de humedad introducen un gradiente de temperatura que no es fácil controlar debido a la fuente generadora.
- El acople electrónico para el sensor modelo HTS2030SMD presenta un error cuadrático en la medición del 7.0960% respecto al Fluke 971. Para lograr una mayor exactitud y precisión en el sensor, se implementaron métodos de corrección y se llegó a un error cuadrático medio estimado del 0.097%. Con ello se puede afirmar que el sensor registra medidas confiables de la humedad relativa.
- En la prueba P6 se realizaron cambios temporales abruptos de humedad relativa de 2.5% por segundo, siendo la variación más alta lograda en las pruebas. Se hace necesario notar que el sensor modelo HTS2030SMD tiene la capacidad de registrar variaciones hasta del 15,6% de humedad relativa por segundo, pero no es recomendable para este caso lograr cambios tan rápidos, puesto que el gradiente de temperatura se haría significativo.
- La distribución de la humedad en el turbulador presenta una diferencia máxima del 14,4% a lo largo (desde el extremo izquierdo a 10cm y 95cm), una diferencia del 13,7% a lo alto (desde el lado inferior a 0cm al superior 5cm) y una diferencia del 4,5% a lo ancho (desde el lado izquierdo a 1cm al lado derecho 6cm). Con los datos previos, se puede concluir que la humedad se distribuye principalmente en la parte superior, a lo largo se presenta un retardo

en la propagación de la misma y a lo ancho se muestra un comportamiento homogéneo. Cabe resaltar que, sí con el tiempo la humedad sigue creciendo, todo el turbulador estará saturado.

- El efecto del bandeo correspondiente a una humedad relativa que se incrementa suavemente en el tiempo, presenta que el desplazamiento del centroide proyectado a partir de las cámaras 1 y 2, es similar al movimiento visto en la cámara 3, debido a que la turbulencia es menor. Sin embargo, se realizó el mismo procedimiento variando abruptamente la humedad y se observó que el efecto del bandeo es ligeramente menor al movimiento visto en la cámara 3.
- El parámetro con las mayores alteraciones es el área. Debido a ello se puede apreciar que los cambios abruptos de humedad son más influyentes en la turbulencia. Como segunda instancia, se destaca que la respuesta de las variaciones ante un cambio abrupto de humedad no es instantánea, debido a la lenta rapidez de propagación de la humedad en el turbulador.
- Utilizando la función estructura se observó que las fluctuaciones del centroide y área incrementan a mayores niveles de humedad, siempre y cuando se mantenga la temperatura constante.
- La posición del centroide presenta mayores fluctuaciones en su eje coordenado Y que en su contraparte X, debido al gradiente positivo de humedad que existe con la altura en el turbulador. En la caracterización del mismo, se observó mayor concentración de humedad en la parte superior del turbulador, generando un gradiente que incrementa la turbulencia.

- El área es el parámetro más afectado por la humedad, donde se estableció que a mayor humedad mayores fluctuaciones, lo cual se mostró en las pruebas patrón y del grupo 3.
- Dadas las características de los algoritmos construidos y el hardware utilizado en las computadoras, se garantiza que la mayoría de las muestras están sincronizadas adecuadamente para los experimentos realizados. Sin embargo, para trabajos futuros se recomienda crear un algoritmo con sus respectivos manejadores para ser implementado en una FPGA, con el fin de tomar mayores cantidades de muestras y una mejor sincronización.
- Basados en la naturaleza de este proyecto se recomienda para trabajos futuros, analizar todos los parámetros que afectan directamente la turbulencia atmosférica y con ello establecer el grado de la influencia de la humedad relativa respecto a los demás parámetros. Además, realizar un análisis detallado de parámetros tales como  $C_n^2$ , índice de refracción y el parámetro de Fried, para establecer un modelo completo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. A. Fernández, R. Borrego Varillas, C. Hernández García, J. A. Pérez Hernández y C. Romero Vázquez, *El láser: La luz de nuestro tiempo*, Salamanca, España: Grupo de Óptica - USAL, 2010.
  
- [2] J. D. Schmidt, *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with examples in MATLAB*, Bellingham, Estados Unidos.: SPIE PRESS, 2010.
  
- [3] L. Andrews, «FreeSpace Laser Propagation: Atmospheric Effects,» IEEE, 2005. [En línea]. Available: [http://photonicsociety.org/newsletters/oct05/free\\_space.html](http://photonicsociety.org/newsletters/oct05/free_space.html). [Último acceso: Diciembre 2015].
  
- [4] G. S. Welter, A. R. Wittwer, G. A. Degrazia, E. B. Camaño Schettini y A. M. Loredó-Souza, «Evaluación de la constante de Kolmogorov para flujos turbulentos utilizando datos experimentales,» Universidad Nacional Del Nordeste, Corrientes, Argentina., 2005.
  
- [5] M. G. Lawrence, «The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air,» American Meteorological society, Boston, USA, 2005.
  
- [6] Spectra-Physics, Model 107B/Model127 25 or 35 mW, Mountain View, Estados Unidos: Spectra-Physics.

- [7] G. Weihs y A. Zeilinger, «Photon statistics at beam splitters: an essential tool in quantum information and teleportation,» Institut für Experimentalphysik, Universität Wien Boltzmanngasse, Viena, Austria.
- [8] G. F. Marshall y G. E. Stutz, Handbook of optical and laser scanning, Londres, Inglaterra: Taylor & Francis Group, 2012.
- [9] O. J. Tijero Rojas, Y. Torres Moreno y Y. Galeano, «Método para medir los efectos de la turbulencia,» de *ENO-CANCOA 2015*, Cali, Colombia, 2015.
- [10] D. C. Giancoli, FÍSICA. Principos con aplicaciones, Ciudad de México: Pearson Educación, 2005.
- [11] E. Optics, *EO1312C 1/1.8" CMOS Color Lite Edition USB Camera*, Barrington, USA, 2014.
- [12] A. COMMUNICATIONS, *CCD and CMOS sensor technology Technical white paper*, 2010.
- [13] R. C. Gonzales, Digital Image Processing, Upper Saddle River, New Jersey, USA: Second Edition, Prentice Hall, University of Tennessee, 2002.
- [14] Matlab, «MathWorks,» Matlab Family Products, 1994. [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/strel-class.html#bu7pnvx-1>. [Último acceso: 17 Enero 2016].
- [15] H. Kogelnik y T. Li, «Laser Beams and Resonators,» Optical Society of America, Florencia, Italia, 1966.

- [16] M. Specialties, *HTS2030SMD Temperature and Relative Humidity Sensor*, Hampton, USA, 2012.
- [17] T. Instruments, «LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter,» National semiconductor, Dallas, USA, 2008.
- [18] Arduino, «Arduino ATmega2560,» Arduino, 2006. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>. [Último acceso: Enero 2016].
- [19] A. Labeyrie, S. Lipson y P. Nisenson, *An introduction to optical stellar interferometry*, Cambridge, Inglaterra.: Cambridge University Press, 2006.
- [20] 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.

## BIBLIOGRAFIA

A. COMMUNICATIONS, CCD and CMOS sensor technology Technical white paper, 2010.

ANDREWS L., «FreeSpace Laser Propagation: Atmospheric Effects,» IEEE, 2005. [En línea]. Disponible en: [http://photonicsociety.org/newsletters/oct05/free\\_space.html](http://photonicsociety.org/newsletters/oct05/free_space.html). [citado el: Diciembre 2015].

ARDUINO, «Arduino ATmega2560,» Arduino, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>. [citado: Enero 2016].

FERNÁNDEZ B. A., BORREGO VARILLAS R., HERNÁNDEZ GARCÍA C., PÉREZ HERNÁNDEZ J. A. y ROMERO VÁZQUEZ C., El láser: La luz de nuestro tiempo, Salamanca, España: Grupo de Óptica - USAL, 2010.

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

GIANCOLI D. C., FÍSICA. Principos con aplicaciones, Ciudad de México: Pearson Educación, 2005.

GONZALES R. C., Digital Image Processing, Upper Saddle River, New Jersey, USA: Second Edition, Prentice Hall, University of Tennessee, 2002.

INSTRUMENTS T., «LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter,» National semiconductor, Dallas, USA, 2008.

KOGELNIK H. y LI T., «Laser Beams and Resonators,» Optical Society of America, Florencia, Italia, 1966.

LABEYRIE A., LIPSON S. y NISENSEN P., An introduction to optical stellar interferometry, Cambridge, Inglaterra.: Cambridge University Press, 2006.

LAWRENCE M. G., «The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air,» American Meteorological society, Boston, USA, 2005.

MARSHALL G. F. y STUTZ G. E., Handbook of optical and laser scanning, Londres, Inglaterra: Taylor & Francis Group, 2012.

MATLAB, «MathWorks,» Matlab Family Products, 1994. [En línea]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/strel-class.html#bu7pnvx-1>. [citado el: 17 Enero 2016].

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

SCHMIDT J. D., Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with examples in MATLAB, Bellingham, Estados Unidos.: SPIE PRESS, 2010.

SPECIALTIES M., HTS2030SMD Temperature and Relative Humidity Sensor, Hampton, USA, 2012.

SPECTRA-PHYSICS, Model 107B/Model127 25 or 35 mW, Mountain View, Estados Unidos: Spectra-Physics.

TÍJARO ROJAS O. J., TORRES MORENO Y. y GALEANO Y., «Método para medir los efectos de la turbulencia,» de ENO-CANCOA 2015, Cali, Colombia, 2015.

WEIHS G. y ZEILINGER A., «Photon statistics at beam splitters: an essential tool in quantum information and teleportation,» Institut für Experimentalphysik, Universität Wien Boltzmanngasse, Viena, Austria.

WELTER G. S., WITWERT A. R., DEGRAZIA G. A., CAMAÑO SCHETTINI E. B. y LOREDO-SOUZA A. M., «Evaluación de la constante de Kolmogorov para flujos turbulentos utilizando datos experimentales,» Universidad Nacional Del Nordeste, Corrientes, Argentina., 2005.

## ANEXOS

### ANEXO A. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

```
clc
close all;
clear all;

muestras=1800;
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,'ExecutionMode','fixedRate','StopFcn','h.ExitCamera();close all;beep;');
t.TimerFcn=@iol_52,h,ImSize};
t.BusyMode='error';

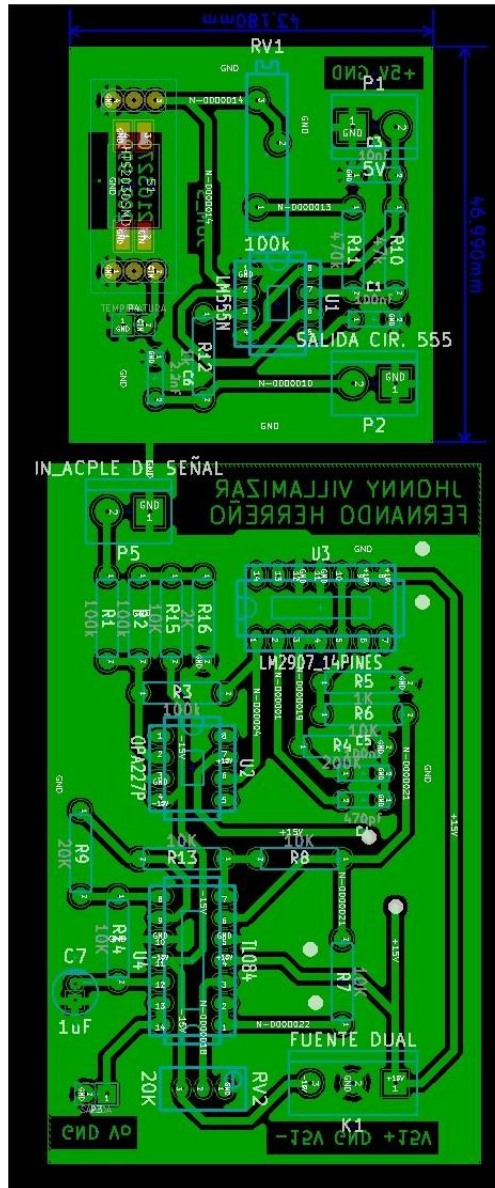
disp('listo para capturar');
while 1
    h.FreezeImage(1);           %Captura una imagen con un timer de 10 fps
    (aprox).
    hMem=h.GetImageMem;         %Asignamos memoria para guardar la imagen.
    u=CopyImage_Matlab(hMem,ImSize);%Recupera en un vector uint8 los
    datos de la imagen grabada
    I=u>30;
    if(sum(I)>2000)
        tic;
        start(t);
        break
    end
end

function iol_52(obj,event,h,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\jhonny\Documents\MATLAB\3pc\cam\'
num2str(obj.TasksExecuted) '.mat'],'u11','r1','r2');
    disp(obj.TasksExecuted);

end

```

## ANEXO B. RUTEO DE LA PCB DEL SENSOR DE HUMEDAD.



## ANEXO C. ADQUISICIÓN DE DATOS DE HUMEDAD.

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

muestras=1800; %numero de muestras
periodo=1.0004;
retardo=0.09;

N=2;
timear=(zeros(N,1));
vh=(zeros(N,1));
vt=(zeros(N,1));

ar= arduino('COM4');

ta=
timer('StartDelay',retardo,'Period',periodo,'TasksToExecute',muestras,'ExecutionMode','fixedRate');
ta.BusyMode='error';
ta.TimerFcn=@arduino_connect,ar,vh,vt,timear,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,ar,vh,vt,timear,N)
time1=toc;
```

```

for s=1:N
    timear(s)=toc;
    vh(s) = ar.analogRead(0);
    %vh2(s) = ar.analogRead(2);
    %vh3(s) = ar.analogRead(4);
    vt(s) = ar.analogRead(1);
end

promh=mean(vh);
vols=(5/1023)*promh;
fre= (-4.4944*(vols^2)) + (280.53*(vols)) + 5978.6;
hum= (0.000000012158222*(fre^3)) - (0.000219300921059*(fre^2)) +
(1.20941831786789*(fre)) - 1869.82713712457;

% promh2=mean(vh2);
% vols2=(5/1023)*promh2;
% fre2= (-4.4944*(vols2^2)) + (280.53*(vols2)) + 5978.6;
% hum2= (0.000000012158222*(fre2^3)) - (0.000219300921059*(fre2^2)) +
(1.20941831786789*(fre2)) - 1869.82713712457;
% %
% promh3=mean(vh3);
% vols3=(5/1023)*promh3;
% fre3= (-4.4944*(vols3^2)) + (280.53*(vols3)) + 5978.6;
% hum3= (0.000000012158222*(fre3^3)) - (0.000219300921059*(fre3^2)) +
(1.20941831786789*(fre3)) - 1869.82713712457;

promt=mean(vt);
temp=(500/1023)*promt;

disp([obj.TasksExecuted hum temp]);
time2=toc;

%save(['C:\Users\jhonny\Documents\MATLAB\3pc\ard_cam\' ,num2str(obj.TasksE
xecuted),'.mat'],'hum','temp','time1','time2');
%disp([obj.TasksExecuted hum temp]);

%save(['C:\Users\jhonny\Documents\MATLAB\3pc\C\' ,num2str(obj.TasksExecute
d),'.mat'],'hum1','hum2','time1','time2');

save(['C:\Users\jhonny\Documents\MATLAB\3pc\prureina\' ,num2str(obj.TasksE
xecuted),'.mat'],'vh','vt','temp','hum','time1','time2','timear');

end

```