

**Parámetros de turbulencia atmosférica a escala de laboratorio utilizando Telescopía de
Fourier de tiempo promedio**

Alexander Ballesteros Díaz

Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Geofísica

Director:

Yezid Torres Moreno

PhD. en Óptica y tratamiento de señales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2019

Dedicado a

Dios, por las bendiciones y virtudes que me concedió.

Mi esposa, por su apoyo incondicional y la confianza en mí, primordiales para seguir con mis metas.

Mi familia, por estar presentes siempre con una palabra de aliento ante las adversidades.

Omar, por su amistad incondicional, tanto en el ámbito personal como profesional, por su constante apoyo, guía y presión ante los desfallecimientos, por mostrarme el camino hacia las cosas de una manera más sencilla y pacientemente.

Profesor Yezid Torres, por las lecciones, enseñanzas y experiencias compartidas en el trascurso de este trabajo.

Juan Carlos, Jesús Hernán, Hernán Buenahora, Fernando, Jhonny, Jonathan, Anjher, Jesús Omar, Yulian Sergio, Paola, Paula, Cristian, compañeros de grupo de óptica, quienes siempre estuvieron presentes aportando y apoyando en las situaciones requeridas en el desarrollo de este trabajo.

Todos aquellos que han puesto de su parte en mi crecimiento personal y profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Marco Teórico.....	21
1.1 Interferómetro de Young.....	21
1.2 Desenvolvimiento de fase.....	23
1.3 Turbulencia Atmosférica	25
1.3.1 Fluctuaciones del índice de refracción.....	26
1.3.2 Estructura espacial del frente de onda	27
1.3.3 Escala interna de la turbulencia	29
1.3.4 Fundamentos de la Telescopía de Fourier	31
1.3.5 Imagen en el Dominio de Fourier	32
1.3.6 Funcionamiento de la Telescopía de Fourier	34
1.3.7 Modelo para la Propagación Horizontal	37
1.4 Sensores para la adquisición de las variables físicas	40
1.4.1 Tipos de Sensores utilizados.....	40
1.4.2 Sistema de control.....	45
2. Antecedentes	46
2.1 Estudio de la humedad relativa	46
2.2 Estudio de la velocidad del aire	47

2.3 Estudio de la temperatura.....	48
2.4 Estudio de la presión.....	49
3. Metodología	50
3.1 Diseño y construcción del turbulador	50
3.2 Sistema de adquisición de datos	52
3.3 Descripción del montaje experimental.....	53
3.4 Pruebas realizadas	55
3.4.1 Prueba en condiciones ambientales normales.....	55
3.4.2 Prueba con variaciones controladas de temperatura	55
3.4.3 Prueba con variaciones controladas de Velocidad del Aire.....	57
3.4.4 Prueba con variaciones controladas de Presión	59
3.4.5 Prueba con variaciones controladas de Humedad.....	61
4. Procesamiento.....	62
4.1 Orientación espacial.....	67
4.2 Paralelismo espacial.....	68
4.3 Periodo y frecuencia espacial.....	69
4.4 Visibilidad.....	69
5. Resultados.....	70
5.1 Valores constantes de los parámetros para las pruebas realizadas	71
5.1.1 Pruebas de Temperatura.....	71
5.1.2 Pruebas de Velocidad de aire.....	74
5.1.3 Pruebas de Presión	77
5.1.4 Pruebas de Humedad relativa.....	80

5.2 Orientación espacial de las franjas.....	83
5.2.1 Temperatura:	83
5.2.2 Velocidad de Aire	83
5.2.3 Presión	84
5.2.4 Humedad Relativa (H.R.)	85
5.2.5 Condiciones Ambientales	85
5.3 Periodos de las franjas	87
5.3.1 Temperatura	87
5.3.2 Velocidad del aire	87
5.3.3 Presión	88
5.3.4 Humedad Relativa.....	89
5.3.5 Condiciones ambientales	89
5.4 Paralelismo de las franjas.....	91
5.4.1 Pruebas de Temperatura.....	91
5.4.2 Pruebas de Velocidad del Aire.....	92
5.4.3 Pruebas de Presión	93
5.4.4 Pruebas Humedad Relativa	94
5.4.5 Condiciones ambientales	95
5.5 Visibilidad.....	96
5.5.1 Pruebas de Temperatura.....	96
5.5.2 Prueba de Velocidad de Aire	98
5.5.3 Prueba de Presión.....	99
5.5.4 Prueba Humedad.....	100

5.6 Estudio de la turbulencia.....	101
5.6.1 Hipótesis de Taylor	101
5.6.2 Centelleo	104
5.6.3 Constante de Estructura del índice de refracción.....	108
6. Conclusiones	110
Referencias Bibliográficas	113
Apéndices.....	116

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Experimento de la doble rendija de Young	22
<i>Figura 2.</i> Dos fuentes puntuales monocromáticas coherentes que iluminan el mismo punto.....	23
<i>Figura 3.</i> Fase discontinua de una sección de una imagen de franjas de Young (Izquierda) y fracción de un perfil horizontal de la imagen (derecha)	24
<i>Figura 4.</i> Imagen de fase desenvuelta (Izquierda), y perfil de fase desenvuelta (derecha) en un corte con posición central, utilizando el algoritmo de Unwrapping	25
<i>Figura 5.</i> Perfil promedio de C_n^2 extendido a baja altitud siguiendo una ley $h^{-2/3}$	27
<i>Figura 6.</i> Muestra a) Dominio espacial y b) dominio frecuencial.....	32
<i>Figura 7.</i> Dominio espacial de la imagen y efecto de la turbulencia y el promediado en el tiempo de la PSF. a) PSF sin turbulencia b) corta exposición de PSF con turbulencia y c) gran tiempo de exposición de PSF con turbulencia. 1	33
<i>Figura 8.</i> a) Patrón sinusoidal, b) Patrón sinusoidal distorsionado y c) Promedio en el tiempo..	34
<i>Figura 9.</i> Espectro de frecuencia temporal (izquierda) y diagrama del fasor (derecha) para la señal de salida del detector, pasa banda de la Telescopía de Fourier (a) Sin turbulencia, (b) Con turbulencia.....	37
<i>Figura 10.</i> Configuración para TAFT horizontal.	38
<i>Figura 11.</i> Sensor HTS2030SMD.	41
<i>Figura 12.</i> Relación de Humedad versus capacitancia en el sensor HTS2030SMD.	41

<i>Figura 13.</i> Sensor digital de flujo de aire 480-5792-ND.....	42
<i>Figura 14.</i> Sensor de temperatura LM35.....	43
<i>Figura 15.</i> Dimensiones sensor de temperatura LM35.	43
<i>Figura 16.</i> Sensor de presión MPXHZ26250A.....	44
<i>Figura 17.</i> Medidor de potencia óptica y detector.....	44
<i>Figura 18.</i> Sensor CMOS EO-2013C.....	45
<i>Figura 19.</i> Curva de calibración sensor de humedad. Sin calibrar (Superior), Con calibración (Inferior). Fluke (azul) - Sensor (rojo).....	47
<i>Figura 20.</i> Curva de calibración sensor digital de flujo de aire 480-5792-ND.....	48
<i>Figura 21.</i> Turbulador con entorno de temperatura controlada. Reóstato es el cilindro hueco dentro.	49
<i>Figura 22.</i> Distribución de temperatura dentro del turbulador.....	49
<i>Figura 23.</i> Montaje experimental utilizado en el estudio de la presión en la propagación de un haz láser, a través de la turbulencia atmosférica.....	50
<i>Figura 24.</i> Planos de diseño del Turbulador con reóstato.	51
<i>Figura 25.</i> Fotografías del dispositivo generador de turbulencia, “ <i>Turbulador</i> ”.....	52
<i>Figura 26.</i> Circuito de sensado de variables atmosféricas.....	53
<i>Figura 27.</i> Esquema experimental.....	54
<i>Figura 28.</i> Montaje experimental prueba en condiciones ambientales.	55
<i>Figura 29.</i> a) Esquema Experimental para las pruebas de temperatura, b) Zoom de turbulador. 56	
<i>Figura 30.</i> a) Ventilador centrífugo b) Rejilla acoplada al Turbulador.....	58
<i>Figura 31.</i> a) Esquema Experimental para las pruebas de velocidad del aire, b) Zoom Turbulador.....	58

<i>Figura 32.</i> Turbulador, manómetro analógico de verificación inicial y compresor.....	59
<i>Figura 33.</i> Montaje experimental para las pruebas de Presión.....	60
<i>Figura 34.</i> Ilustración con canal de agua afuera, pero que va al interior del Turbulador para la generación de la humedad relativa en su interior.....	61
<i>Figura 35.</i> Esquema experimental utilizado en las pruebas de Humedad.....	62
<i>Figura 36.</i> Imagen original de franjas (Izquierda). Recuadro con detalle en el centro (Derecha).	63
<i>Figura 37.</i> Filtro cuadrado ubicado en f_0	63
<i>Figura 38.</i> Líneas de contorno del plano de fase sobre la imagen de franjas originales.....	64
<i>Figura 39.</i> Máscara binaria.....	65
<i>Figura 40.</i> Contornos de fase discontinua sobre la región de interés (Izquierda), Contornos de fase discontinua aumentados digitalmente (Derecha).....	65
<i>Figura 41.</i> Mapa de fase continua al interior de la región de interés.	66
<i>Figura 42.</i> Línea interpolada a partir de los puntos de fase de una franja.....	67
<i>Figura 43.</i> Fluctuaciones de fase de los planos reales con un plano interpolado como referencia.	68
<i>Figura 44.</i> Líneas de contorno de fase del plano interpolado (verdes), línea perpendicular a las líneas de contorno (roja).	69
<i>Figura 45.</i> Magnitud de las componentes espectrales del patrón de franjas.	70
<i>Figura 46.</i> Valores de Pruebas de temperatura.....	71
<i>Figura 47.</i> Valores de la Humedad durante las pruebas de temperatura	72
<i>Figura 48.</i> Valores de la Presión durante las pruebas de temperatura.....	73
<i>Figura 49.</i> Valor de la velocidad del aire para las pruebas de Temperatura	73

<i>Figura 50.</i> Valores de Pruebas de Velocidad de Aire	74
<i>Figura 51.</i> Valores de temperatura para las pruebas de velocidad de aire	75
<i>Figura 52.</i> Valores de presión para las pruebas de velocidad de aire.....	76
<i>Figura 53.</i> Valores de humedad para las pruebas de velocidad de aire.....	76
<i>Figura 54.</i> Valores de Pruebas de Presión.....	77
<i>Figura 55.</i> Valor de temperatura para las pruebas de Presión.....	78
<i>Figura 56.</i> Valor de humedad para las pruebas de Presión	79
<i>Figura 57.</i> Velocidad de aire para las pruebas de Presión.....	79
<i>Figura 58.</i> Valores de Pruebas de Humedad relativa	80
<i>Figura 59.</i> Valor de temperatura para las pruebas de humedad.	80
<i>Figura 60.</i> Presión para las pruebas de Humedad	81
<i>Figura 61.</i> Velocidad de aire para las pruebas de humedad	82
<i>Figura 62.</i> Distribución de orientación de las franjas, para pruebas de temperatura: a) 31°C, b) 36°C y c) 49°C.....	83
<i>Figura 63.</i> Distribución de orientación de las franjas, para pruebas con velocidad de aire: a) 3.5 m/s, b) 4.5 m/s c) 5.5 m/s y d) 6.5 m/s.....	84
<i>Figura 64.</i> Distribución de orientación de las franjas, para pruebas con presión a) 15 PSI, b) 20 PSI y c) 25 PSI.....	84
<i>Figura 65.</i> Distribución de orientación de las franjas, para pruebas de Humedad a) H.R 58%, b) H.R. 75%, c) H.R. 80% y d) H.R. 85%	85
<i>Figura 66.</i> Distribución de orientación de las franjas, para prueba en condiciones ambientales. 85	
<i>Figura 67.</i> Periodos de las franjas para las tres pruebas de temperatura, a) temperatura a 31°C, b) temperatura a 35°C y c) temperatura a 49°C	87

Figura 68. Periodos de las franjas para las pruebas con diferentes velocidades de aire: a) 3.5 m/s, b) 4.5 m/s, c) 5.5 m/s y d) 6.5 m/s 88

Figura 69. Periodos de las franjas para las pruebas con diferentes valores de presión: a) 15 PSI, b) 20 PSI y c) 25 PSI..... 88

Figura 70. Periodos de las franjas para las pruebas con diferentes valores de H.R: a) 58%, b) 75%, c) 85%..... 89

Figura 71. Periodos de las franjas para la prueba en condiciones ambientales..... 89

Figura 72. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de temperatura respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Temperatura de 31°C, b) Temperatura de 36°C y c) Temperatura de 49°C.. 91

Figura 73. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de velocidad de aire respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Velocidad de 3.5 m/s, b) Velocidad de 4.5 m/s, c) Velocidad de 5.5 m/s y d) Velocidad de 6.5 m/s. 92

Figura 74. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de presión respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Presión de 15 PSI, b) Presión de 20 PSI y c) Presión de 25 PSI. 93

Figura 75. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de Humedad relativa respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Humedad relativa de 58%, b) Humedad relativa de 75% y c) Humedad relativa de 85% 94

Figura 76. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas en condiciones ambientales respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior). 95

Figura 77. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Temperatura, a) Visibilidad para Temperatura de 31°C, b) Visibilidad para Temperatura de 35°C, c) Visibilidad para Temperatura de 49°C y d) Visibilidad para todas las pruebas de temperatura. . 97

Figura 78. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Velocidad de Aire. a) Visibilidad para velocidad de aire a 3.5 m/s, b) Visibilidad para velocidad de aire a 4.5 m/s, c) Visibilidad para velocidad de aire a 5.5 m/s, d) Visibilidad para velocidad de aire a 6.5 m/s y e) Visibilidad para todas las pruebas de velocidad de aire..... 98

Figura 79. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Presión 99

Figura 80. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Humedad.100

Figura 81. Imagen para la prueba de atmósfera congelada. 102

Figura 82. Paralelismo y desviación estándar del Paralelismo de las franjas de atmósfera congelada. 102

Figura 83. Desviación estándar temporal de la prueba de atmosfera congelada..... 103

Figura 84. Distribución de las muestras entre picos..... 104

Figura 85. Ejemplo de (a) interpolación y submuestreo realizado a la medida de la intensidad registrada en el medidor de potencia para la prueba de temperatura a 36°C, (b) ampliación de una zona de la figura para observar la interpolación, y (c) evidencia del submuestreo 106

Figura 86. Centelleo para la prueba de temperatura a 36°C..... 107

Figura 87. Constante de estructura de índice de refracción para la prueba de temperatura a 36°C. 109

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Especificaciones técnicas sensor CMOS. Catálogo del fabricante.</i>	45
Tabla 2. <i>Valores de diferencia de potencial y temperatura controlada utilizando el reóstato, para las pruebas realizadas.</i>	57
Tabla 3. <i>Valores de velocidad controlada de aire.</i>	59
Tabla 4. <i>Valores de presión controlada.</i>	60
Tabla 5. <i>Valores de humedad controlada.</i>	62
Tabla 6. <i>Orientación de las franjas de las pruebas realizadas.</i>	86
Tabla 7. <i>Período de las franjas de las pruebas realizadas.</i>	90
Tabla 8. <i>Resultados de los valores asociados al paralelismo de las franjas en las diferentes pruebas.</i>	95
Tabla 9. <i>Correlación entre los valores registrados en el sensor CMOS y en el medidor de potencia.</i>	105
Tabla 10. <i>Valores de centelleo para las pruebas realizadas.</i>	107
Tabla 11. <i>Constante de estructura del índice de refracción.</i>	109

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Planos de Turbulador.....	116
Apéndice B. Código cálculo de parámetros.....	118
Apéndice C. Código de cálculo de la Orientación.....	123

Resumen

TÍTULO: PARÁMETROS DE TURBULENCIA ATMOSFÉRICA A ESCALA DE LABORATORIO UTILIZANDO TELESCOPIA DE FOURIER DE TIEMPO PROMEDIO*

AUTOR: ALEXANDER BALLESTEROS DÍAZ**.

PALABRAS CLAVE: Temperatura, Presión, Rapidez del aire, Humedad, Turbulencia Atmosférica, Franjas interferométricas.

DESCRIPCIÓN:

La turbulencia es considerada como el problema más difícil de mecánica clásica no resuelto. Hasta la fecha no ha sido posible elaborar una teoría basada en principios fundamentales, se ha logrado desarrollo de teorías estadísticas como la elaborada por (Kolmogorov, 1991) estas se abordan en este trabajo de investigación, el cual se enfoca en el estudio de la turbulencia a nivel del suelo, en dirección horizontal, generada en laboratorio, mediante la caracterización de algunos parámetros físicos medidos y controlados electrónicamente. Estudios recientes utilizan el análisis de Fourier en imágenes de la atmósfera, tales como el uso de la Telescopía de Fourier que ha sido investigada como medio para la formación de imágenes ópticas de alta resolución, por ejemplo en las estaciones de observación en tierra, a partir de satélites que orbitan nuestro planeta (Feldkhun & Wagner, 2010).

Para el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta la hipótesis de atmósfera congelada, la cual se define como el movimiento y modificación lenta de la turbulencia, de tal forma que, si se realizan mediciones por debajo de 100 ms de ésta, se consideran medidas correlacionadas (a las mismas distancias) no independientes, porque la atmósfera no ha realizado el cambio suficiente de sus condiciones. (Labeyrie & Lipson, 2006)

Para poder estudiar los parámetros presentes en la turbulencia, se confinó la atmósfera en una región por medio de un sistema encerrado diseñado para modificar las condiciones de producción de turbulencia al cual se le denominó Turbulador, de esta manera se analizó la influencia de dichos parámetros a escala en el laboratorio, donde se simuló diferentes condiciones ambientales. Se utiliza la técnica de la TAFT, para evaluar el impacto de los parámetros de la turbulencia. Adicionalmente, se establecieron criterios de comparación con los parámetros convencionales y los resultados de las simulaciones numéricas en MATLAB®.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ciencias Escuela de Física Maestría en Geofísica Director: PhD: Yezid Torres Moreno

Abstract

Title: Parameters of atmospheric turbulence at laboratory scale using average time fourier telescopic*

Author: Alexander Ballesteros Díaz**.

Key Words: Temperature, Pressure, Air speed, Humidity, Atmospheric Turbulence, Interferometric strips.

Description:

Turbulence is considered the most difficult problem of classical mechanics not solved. To date it has not been possible to elaborate a theory based on fundamental principles, development of statistical theories has been achieved as elaborated by (Kolmogorov, 1991) these are addressed in this research work, which focuses on the study of turbulence at ground level, in horizontal direction, generated in the laboratory, by characterizing some physical parameters measured and electronically controlled. Recent studies use Fourier analysis in atmospheric images, such as the use of Fourier Telescope that has been investigated as a means for the formation of high resolution optical images, for example in observation stations on land, from of satellites that orbit our planet (Feldkhun & Wagner, 2010).

For the development of the present work, the frozen atmosphere hypothesis was taken into account, which is defined as the movement and slow modification of the turbulence, in such a way that, if measurements are taken below 100 ms, measures are considered correlated (at the same distances) not independent, because the atmosphere has not made sufficient change in their conditions. (Labeyrie & Lipson, 2006)

In order to study the parameters present in the turbulence, the atmosphere was confined in a region by means of an enclosed system designed to modify the turbulence production conditions which was called Turbulator, in this way the influence of said parameters was analyzed. scale in the laboratory, where different environmental conditions were simulated. The technique of the TAFT is used to evaluate the impact of the turbulence parameters. Additionally, comparison criteria were established with the conventional parameters and the results of the numerical simulations in MATLAB®.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ciencias Escuela de Física Maestría en Geofísica Director: PhD: Yezid Torres Moreno

Introducción

Esta investigación se orienta a la necesidad de estudiar los fenómenos que alteran el frente de onda en la propagación de la información por medio de los parámetros asociados a la turbulencia atmosférica como son: el centelleo, la función de estructura y la escala interna. Estos parámetros, se miden para indicar la fortaleza de la turbulencia atmosférica, pues, es un fenómeno que afecta en gran medida las telecomunicaciones en el espacio libre, la formación de imágenes y está presente en los flujos turbulentos de la atmósfera en donde es aplicable la geofísica, como en el campo de la meteorología, la oceanografía, entre otros, donde las alteraciones del índice de refracción en una región debido a la influencia de parámetros como la temperatura, rapidez del aire, presión y la humedad relativa, modifican el frente de la onda que se propaga. La turbulencia puede considerarse como la fluctuación al azar sobrepuesta a los valores medios de una magnitud termodinámica medida en la atmósfera, en nuestro caso se traduce en fluctuaciones del índice de refracción alrededor de su valor medio, el cual también se modifica dependiendo por ejemplo de la hora y de las condiciones climáticas.

El problema de la turbulencia atmosférica ha sido tratado en profundidad en la dirección de propagación vertical de un haz láser (Fried & Cloud, 1966; Rasouli & Rajabi, 2016, etc). En cuanto a la transmisión horizontal, diversos trabajos se han implementado con metodologías que implican pocas variables físicas y además se asume tradicionalmente que el índice de refracción es uniforme e isótropo en dicha dirección (Been, Hughes & Oldenettel, 2002).

La construcción de un dispositivo capaz de simular turbulencia, controlando las variables físicas que influyen en la variación espaciotemporal del frente de onda que se propaga en dirección horizontal, permite analizar la información para posteriormente procesar e identificar los parámetros físicos que caracterizan la atmósfera local como lo son la escala interna, el índice de centelleo y la función de estructura del índice de refracción.

Por lo tanto, haciendo uso de la hipótesis de atmósfera congelada, (Labeyrie, A., Lipson, S. G., 2006), la cual toma en cuenta la modificación lenta de la turbulencia, de forma que sí se realizan mediciones en intervalos de tiempo por debajo de 100 ms y en las mismas condiciones, se consideran medidas fuertemente correlacionadas. Para poder tratar de medir los efectos de las variables físicas que modifican directamente la atmósfera, se confinó en una región y se analizó su influencia, a pequeña escala, es decir a escala de laboratorio. Para este fin fue diseñado y construido un dispositivo que permite modificar las variables físicas que intervienen en la producción de la turbulencia a dicha escala.

Se utilizó la técnica de la TAFT, para evaluar el impacto de las variables físicas sobre los parámetros de la turbulencia. Adicionalmente, se establecieron criterios de comparación con los parámetros usualmente convencionales como también con los resultados de las simulaciones numéricas en MATLAB[®] en la que viene trabajando el equipo de investigación de la FAU (Florida Atlantic University) y el equipo de investigación del GOTS de la UIS (Universidad Industrial de Santander).

1. Marco Teórico

1.1 Interferómetro de Young

Un interferómetro es un dispositivo óptico que hace uso del fenómeno de interferencia. Un haz óptico se divide en dos o más haces diferentes antes de que se recombinen para producir un patrón de interferencia. En los interferómetros más comunes, mientras los haces viajan a lo largo de trayectorias designadas, están sujetos a influencias externas como variaciones en el índice de refracción del medio y diferencias en la longitud de camino relacionadas con el parámetro que es objeto de medición. El patrón de interferencia se analiza para la medición prevista.

Se han desarrollado varios interferómetros a lo largo de los años en diversas aplicaciones. Algunos tipos comunes incluyen los interferómetros de Young, de Michelson, de Mach-Zehnder, de Perot-Fabry, de Sagnac, entre otros.

Entre los pioneros de la física clásica se encontraba un científico inglés del siglo XIX llamado Thomas Young, que demostró convincentemente el carácter ondulatorio de la luz a través del fenómeno de interferencia mediante el uso de técnicas de difracción. Los experimentos de Young proporcionaron evidencia de la naturaleza ondulatoria de la luz, opuesta a la opinión científica de la época que se fundamentaba en la teoría corpuscular de Newton para la naturaleza de la luz. En 1801 Young llevó a cabo un experimento de doble rendija que proporcionaba evidencia importante de que la luz tiene propiedades de onda.

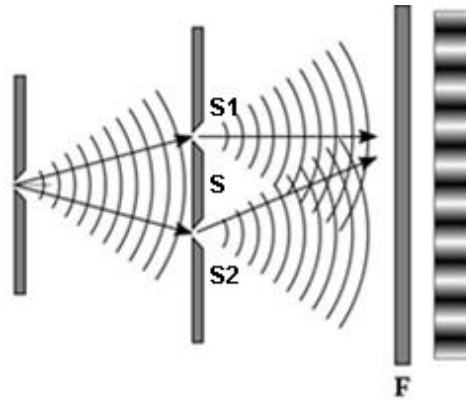


Figura 1. Experimento de la doble rendija de Young

Utilizando luz solar difractada a través de una pequeña rendija como fuente de iluminación parcialmente coherente, Young proyectó la luz proveniente de la rendija sobre otra pantalla que contenía dos ranuras colocadas una al lado de la otra S1 y S2. La luz que pasa a través de S1 y S2 se proyecta sobre una pantalla F (detector). Young usó el término franjas de interferencia para describir las bandas de luces brillantes y oscuras que aparecen en la pantalla y se dio cuenta de que estas bandas solo podían producirse si la luz actuaba como una onda. La brecha entre bandas brillantes sucesivas (o bandas oscuras) se llama período p ; este depende de la longitud de onda, la separación de las rendijas S1 y S2 y la distancia a la pantalla.

Considerando dos fuentes de luz monocromáticas coherentes, de longitud de onda λ y oscilando a la misma frecuencia ω , separadas por una distancia S y dirigidas a un punto **P** ubicado a una distancia d , como se muestra en la figura 2.

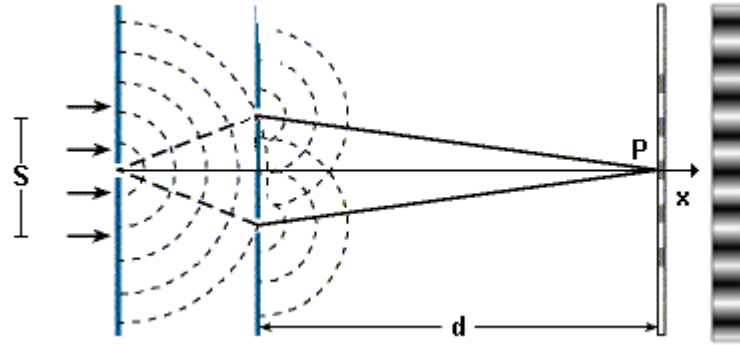


Figura 2. Dos fuentes puntuales monocromáticas coherentes que iluminan el mismo punto

Por simplicidad, se supone que las fuentes monocromáticas son de igual amplitud A y se encuentran a una distancia $\pm \frac{S}{2}$ del eje x ; el patrón de interferencia correspondiente en el plano de observación viene dado por:

$$I = 2A^2 \left[1 + \cos 2\pi \left(\frac{S}{\lambda d} \right) x \right] \quad (1)$$

La frecuencia espacial de las franjas viene dada por:

$$f = \frac{S}{\lambda d} \quad (2)$$

1.2 Desenvolvimiento de fase

El método de desenvolvimiento de fase (*unwrapping* en inglés) propuesto por Meneses, Gharbi & Humbert (2005), se resume en los siguientes tres pasos: a) segmentar la imagen en regiones con píxeles de fase continua, b) determinar el desplazamiento relativo de fase entre regiones de fase continua y, c) desenvolver la fase ajustando secuencialmente las regiones con fase discontinua.

El algoritmo de desenvolvimiento compara los valores de fase entre píxeles vecinos. Dada la fase en un píxel $P1$, la fase en otro píxel $P2$, se puede desenvolver contando el número de 2π

discontinuidades a lo largo de un camino que va del píxel P1 al píxel P2. La secuencia de los valores de fase a lo largo del camino se denota como $\varphi(i)(i = 0,1,2, \dots, N)$, el número de discontinuidades $d(i)(i = 0,1,2, \dots, M)$ entre los dos píxeles $(i - 1)$ e (i) se pueden calcular por medio de la ecuación:

$$d(i) = \left\lceil \frac{\varphi(i) - \varphi(i - 1)}{2\pi} \right\rceil \quad (3)$$

Los cambios de fase entre dos píxeles vecinos están en el rango de $-\pi$ a π , cambios abruptos de valores dentro de este rango, indican que hay una discontinuidad presente dentro de estos dos píxeles, como se observa en la figura 3.

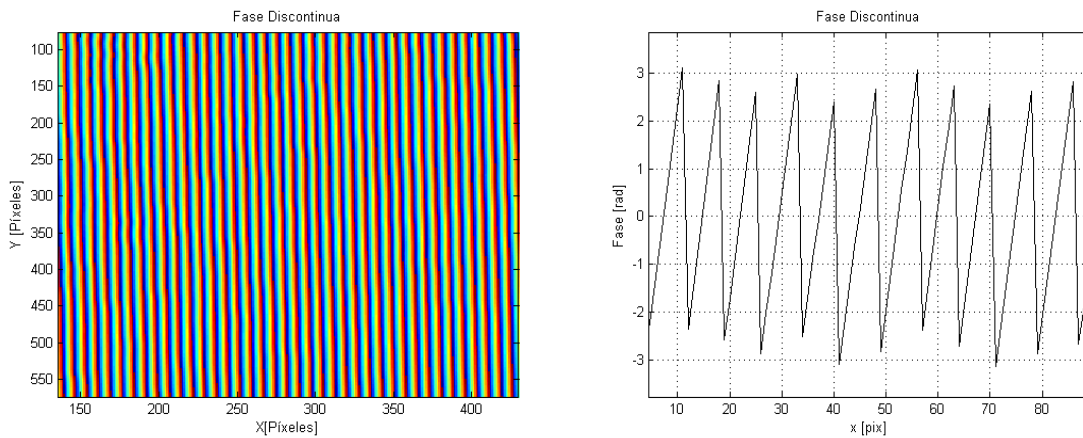


Figura 3. Fase discontinua de una sección de una imagen de franjas de Young (Izquierda) y fracción de un perfil horizontal de la imagen (derecha)

Por tanto, estas discontinuidades pueden ser cuantizadas como:

$$V = \sum d(i) \quad (4)$$

Para resolver esta discontinuidad se adiciona o se sustrae $2\pi V$, dependiendo de la dirección en la que se realiza el desenvolvimiento, como en la ecuación (5) que finalmente permite observar la fase como un plano (ver figura 4).

$$\varphi_{continua} = \varphi_{discontinua} \pm 2\pi V \quad (5)$$

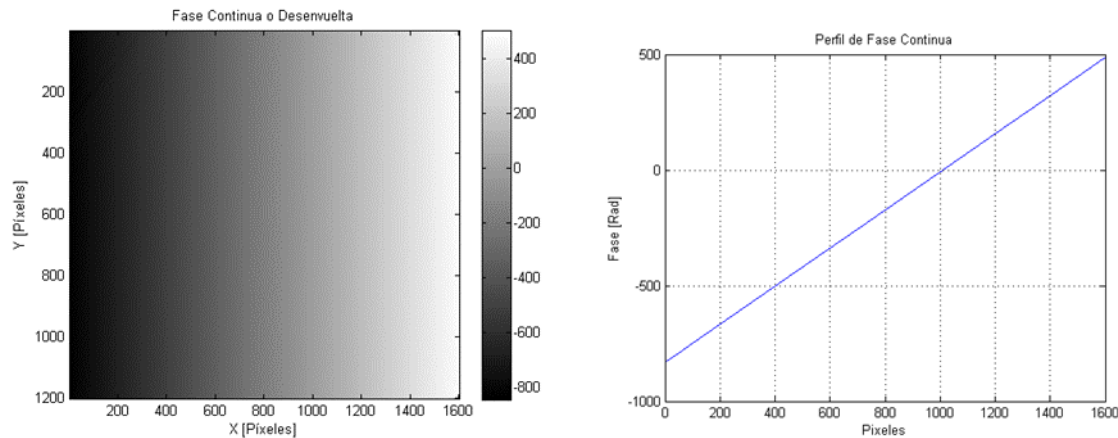


Figura 4. Imagen de fase desenvuelta (Izquierda), y perfil de fase desenvuelta (derecha) en un corte con posición central, utilizando el algoritmo de Unwrapping

1.3 Turbulencia Atmosférica

La atmósfera no es un medio con comportamiento homogéneo para la propagación de la luz. Debido principalmente al proceso de calentamiento del aire por el Sol, durante el día la luz solar calienta las masas terrestres. Por la noche la superficie de la Tierra se enfría gradualmente y se disipa calor hacia la atmósfera. Estos ciclos producen movimientos de aire a gran escala, que alcanzan el régimen turbulento, y se convierten progresivamente en movimientos a escalas menores. Como resultado se crean en la atmósfera regiones de aire a distintas temperaturas, cuyo tamaño y distribución son diferentes y aleatorios. El índice de refracción del aire depende de la

densidad, por tanto, también de la temperatura, esto da lugar a un comportamiento aleatorio del índice de refracción de la atmósfera, entonces las ondas que se propagan por ella encuentran un medio no homogéneo y se distorsionan (Labeyrie, A., Lipson, S. G., 2006).

Ópticamente hablando, la turbulencia es un fenómeno causado por fluctuaciones espaciales y temporales en el índice de refracción del aire. Estas fluctuaciones son el resultado de variaciones en los parámetros indicados en las subsecciones siguientes.

1.3.1 Fluctuaciones del índice de refracción Las variaciones de temperatura en la atmósfera producen variaciones de la densidad del aire y, por consiguiente, del índice de refracción n . Es conveniente describir sus propiedades estadísticas usando la función de estructura o el espectro de potencia. La función de estructura se define como la ecuación:

$$D_n(\vec{\rho}) = \left\langle |n(\vec{r} + \vec{\rho}) - n(\vec{r})|^2 \right\rangle \quad (6)$$

donde $\langle \dots \rangle$ representa un promedio del conjunto de estados, \vec{r} y $\vec{\rho}$ son vectores de posición. El espectro de potencia de las fluctuaciones del índice es la transformada de Fourier de la función de estructura:

$$\phi_n(\vec{\kappa}) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\langle |n(\vec{r} + \vec{\rho}) - n(\vec{r})|^2 \right\rangle \exp(-2\pi i \vec{\kappa} \vec{\rho}) d\vec{\rho} \quad (7)$$

donde $\vec{\kappa}$ es un vector en el espacio de frecuencias espaciales. De la teoría de Kolmogorov se puede deducir la función de estructura como:

$$D_n(\vec{\rho}) = C_n^2 |\vec{\rho}|^{2/3} \quad (8)$$

Donde C_n^2 es la constante de estructura del índice de refracción, este parámetro expresa la fuerza de la turbulencia. (Canales, 2010).

La constante de estructura del índice de refracción es usada para caracterizar la atmosfera terrestre, la cual está estratificada: existen capas con distinto grado de turbulencia a diferentes alturas. Por tanto, es necesario determinar la constante de estructura en función de la altitud h . La figura 4 muestra el perfil experimental de $C_n^2(h)$. Finalmente, el espectro de potencia se observa en, (Canales, 2010):

$$\phi_n(\vec{\kappa}) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} \tag{9}$$

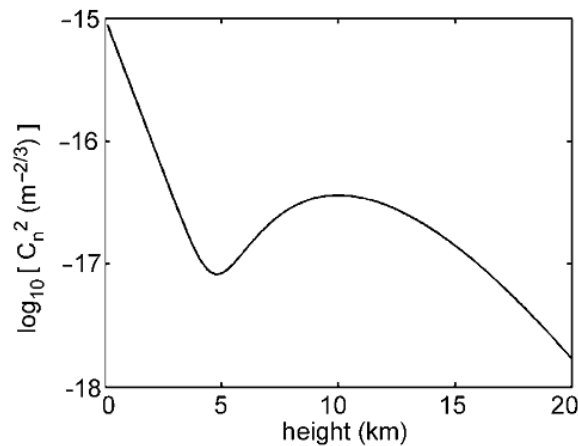


Figura 5. Perfil promedio de C_n^2 extendido a baja altitud siguiendo una ley $h^{-2/3}$. Adaptado de: Canales, V. F. (2010). Formación de imágenes en óptica adaptativa. In *Formación de imágenes en óptica adaptativa* (pp. 17–23).

1.3.2 Estructura espacial del frente de onda El frente de onda se representa por la ecuación:

$$\psi(\vec{r}) = A(\vec{r}) e^{i\phi(\vec{r})} \tag{10}$$

La magnitud A es la amplitud y ϕ la fase del frente de onda. El frente de onda que incide, por ejemplo, en un telescopio, presenta variaciones espaciales tanto de la amplitud como de la fase. Estas últimas son las más importantes para el proceso de formación de imágenes, y se describirán utilizando la función de estructura, definida por la ecuación:

$$D_{\phi}(\vec{\rho}) = \left\langle (\phi(\vec{r} + \vec{\rho}) - \phi(\vec{r}))^2 \right\rangle \quad (11)$$

Todos los puntos del frente de onda son equivalentes, propiedad que se denomina estacionariedad del frente de onda. Debido a la estacionariedad, la función de estructura sólo depende del vector que separa los puntos, no de los puntos en sí. La función de estructura de la fase a la entrada del telescopio que resulta del modelo de Kolmogorov es:

$$D_{\phi}(\vec{\rho}) = 6.88 \left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{5/3} \text{ rad}^2 \quad (12)$$

donde r_0 , denominado parámetro de Fried, depende de la longitud de onda y la distancia al cenit, ξ , que es el ángulo que se forma desde un punto imaginario que se encuentra por encima de la cabeza de un observador hasta un cuerpo que se quiera observar, como:

$$r_0(\lambda, \xi) = 0.185 \lambda^{6/5} \left(\frac{\cos \xi}{\int C_n^2(h) dh} \right)^{3/5} \quad (13)$$

En adelante el parámetro de Fried r_0 , corresponde a las condiciones $r_0(\lambda = 500 \text{ nm}, \xi = 0 \text{ rad})$. Se define como zona coherente de la atmósfera, una región en la que apenas se producen variaciones del índice de refracción. El parámetro de Fried representa el diámetro de las zonas coherentes en la atmósfera.

La función de estructura de la fase, expresada en la ecuación (12), sólo depende de la distancia entre puntos, es decir, del módulo del vector que une los puntos. Esto significa que se considera a la atmósfera un medio isótropo.

Una última propiedad importante de la atmósfera es la ergodicidad, que estipula que el promedio de cualquier magnitud se puede obtener realizando medidas a lo largo del tiempo sin cambiar de punto o en distintos puntos en un instante determinado. Dicho de otra manera, es indiferente realizar el promedio espacial o el promedio temporal.

Las variaciones de amplitud a la altura de la abertura del telescopio contribuyen en una menor medida a la degradación de la imagen que las de la fase y son generalmente ignoradas en la planificación y evaluación de los sistemas de óptica adaptativa (Canales, 2010)

1.3.3 Escala interna de la turbulencia En un flujo turbulento la energía se transmite a movimientos de menores escalas, formando una cascada que finaliza cuando la energía cinética turbulenta se disipa en forma de calor por causa de la viscosidad del medio. Esto ocurre a la escala interna del movimiento.

Los métodos para medir la escala interna de la turbulencia se pueden clasificar en función de la amplitud, o cantidades relacionadas a la fase, necesarias para su aplicación. Convencionalmente se basan en el centelleo láser, que es una cantidad relacionada con la amplitud y se utiliza en trayectorias de longitudes de cien metros o más. Para trayectorias más cortas, son más adecuados los métodos basados en cantidades relacionadas con la fase, puesto que las fluctuaciones de un haz delgado son muy sensibles sobre trayectos cortos, depende de la longitud del camino L , de la forma L^3 .

El uso de métodos basados en haces delgados está limitado estrictamente a los casos en que se satisface la óptica geométrica. Sin embargo, en propagación horizontal, cerca de la superficie terrestre, esto sucede generalmente para trayectorias de longitud que van desde una fracción de un metro a diez o veinte metros.

Esta limitación se supera utilizando una cantidad dependiente de la amplitud (intensidad), y otra cantidad dependiente de la fase (ángulo de arribo), este último no está limitado por la óptica geométrica, en consecuencia, el uso de una aproximación más suave, como la de Rytov, permite ampliar la capacidad del método de mezcla para trayectos largos.

Considerando, las componentes horizontal y vertical del ángulo de arribo como α y β , respectivamente. Sus varianzas se pueden obtener derivadas de la función de estructura de la fase. Considerando una onda plana que se propaga a través de una turbulencia homogénea e isotrópica. Dentro del límite de aproximación de la óptica geométrica, es decir para $L \ll \frac{l_0^2}{\lambda}$, l_0 es la escala interna y λ la longitud de onda, el promedio al cuadrado de las fluctuaciones del ángulo de arribo está dado por la expresión (14), (Consortini, Sun, Innocenti, & Li, 2003)

$$\langle \alpha^2 \rangle = \langle \beta^2 \rangle = 3.28 C_n^2 L l_0^{-\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Donde $\langle \dots \rangle$ denota un promedio estadístico temporal. El cuadrado medio normalizado de las fluctuaciones de intensidad se define como centelleo (Consortini et al., 2003):

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (15)$$

O lo que es lo mismo:

$$\sigma_I^2 = 12.8 C_n^2 L l_0^{-\frac{7}{3}} \quad (16)$$

La escala interna se puede obtener, dividiendo la ecuación (14) por la (16) (Consortini et al., 2003), luego:

$$l_0 = 1.97L \sqrt{\frac{\langle \alpha^2 \rangle}{\sigma_I^2}} \quad (17)$$

Un rayo láser que se propaga a través de una atmósfera turbulenta experimentará distorsiones de fase impulsadas por la turbulencia, lo que resultará en dispersiones y centelleo del haz propagado.

El tratamiento estadístico fundamental de dicha turbulencia se considera generalmente como el propuesto por Kolmogorov (Kolmogorov, 1991). Suponiendo un espectro de turbulencia de Kolmogorov, la propagación en el régimen de fluctuación débil se puede describir utilizando el

método Rytov, manteniendo solo las perturbaciones de fase en el segundo orden. En estas condiciones, el índice de centelleo (varianza de las fluctuaciones de intensidad), independiente de la escala interna de la turbulencia, para una onda plana viene dado por la varianza de Rytov (DiComo et al., 2016)

$$\sigma_I^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (18)$$

Donde $k = 2\pi/\lambda$, es el número de onda angular de radiación láser y L es la distancia de propagación. De (18) se tiene que:

$$C_n^2 = \frac{\sigma_I^2}{1.23k^{7/6}L^{11/6}} \quad (19)$$

La constante de estructura del índice de refracción presenta un rango de valores entre: $\sim 10^{-17} m^{-2/3}$ (Turbulencia débil) y $\sim 10^{-13} m^{-2/3}$ (Turbulencia Fuerte). (Labeyrie, A., Lipson, S. G., 2006)

1.3.4 Fundamentos de la Telescopía de Fourier Normalmente, en la imagen de Fourier o imagen espectral de objetos macroscópicos, un objeto es iluminado por dos fuentes de luz pequeñas y coherentes cuyos campos interfieren en el plano del objeto, formando franjas de interferencia. La radiación resultante que se refleja contiene información tanto de la amplitud como de la fase de la componente de Fourier correspondiente al periodo de las franjas.

La Telescopía de Fourier, desarrollada y descrita con detalle por Holmes, ha sido propuesta como un método para la obtención de imágenes de alta resolución de satélites en las estaciones de observación en tierra. El método consiste en la iluminación activa del objeto. Luz mutuamente coherente proveniente de tres transmisores, forman franjas de periodo espacial variable sobre el objeto; como las franjas desfilan sobre el objeto, la señal producto de la luz reflejada, provee información del dominio frecuencial o espacio de Fourier, en la función de reflectancia. El efecto

de la turbulencia atmosférica en las señales se elimina a través de una técnica conocida como “*phase closure*” que funciona en el caso que la capa de turbulencia atmosférica es delgada.

La versión modificada de la Telescopía de Fourier, *Telescopía de Fourier de tiempo promedio (TAFT)* propuesta por Rhodes, provee una solución al problema de imágenes de alta resolución a través de un camino con turbulencia en dirección horizontal, en este caso no se usa la técnica de *phase closure* sino utilizando un promedio separado de la fase y de la magnitud de la señal.

1.3.5 Imagen en el Dominio de Fourier En el dominio de la imagen de Fourier, los datos de la imagen se recolectan en forma de muestras $f(x, y)$, tomadas secuencialmente o en paralelo, como se ilustra en la figura 6 (a). El dominio de Fourier de la imagen, figura 6 (b), se muestra como la magnitud de la transformada de Fourier $F(u, v)$ en donde se recolecta nuevamente de manera secuencial o en paralelo, esto se hace también para la fase, ya que la transformada es una función compleja de amplitud y fase.

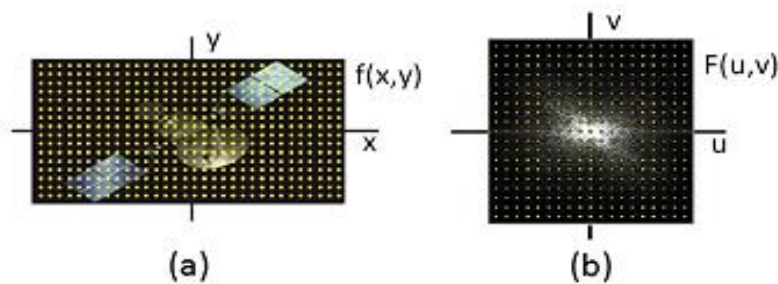


Figura 6. Muestra a) Dominio espacial y b) dominio frecuencial. Adaptado de: Rhodes, W. T. (2012). Time-average Fourier telescope: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Applied Optics*, 51(4), A11. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000A11>.

El promediado en el tiempo hace una gran diferencia en los resultados obtenidos en los dos dominios, consideremos en primer lugar el efecto del promedio en el tiempo en el dominio espacial, como se observa en la figura 7, el resultado es un alisamiento de la PSF (del inglés, *Point Spread Function*), se eliminan los contenidos de las altas frecuencias de la imagen. El promediado en el tiempo en el dominio de frecuencias espaciales, puede mejorar los resultados considerablemente.

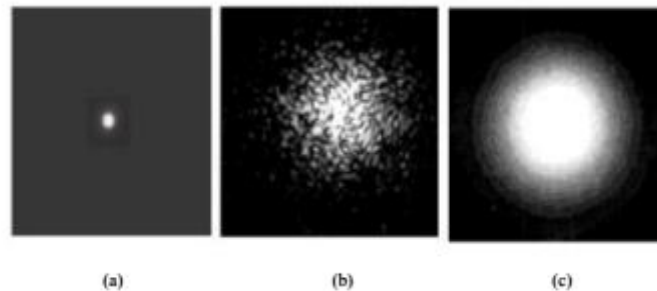


Figura 7. Dominio espacial de la imagen y efecto de la turbulencia y el promediado en el tiempo de la PSF. a) PSF sin turbulencia b) corta exposición de PSF con turbulencia y c) gran tiempo de exposición de PSF con turbulencia. Adaptado de: Rhodes, W. T. (2012). Time-average Fourier telescoping: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Applied Optics*, 51(4), A11. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000A11>

Para ilustrar esto, consideremos un patrón sinusoidal como en la figura 88 (a) cuando es propagado a través de la turbulencia, el resultado a corta exposición se observa como en las tres imágenes de la figura 8 (b) en donde se analizan diferentes estados, el patrón es algo borroso y distorsionado, ahora, en la figura 8 (c) se ve el efecto de promediar en el tiempo las imágenes del patrón borroso y distorsionado que varía en el tiempo. Aunque el contraste se reduce, el patrón de promediado en el tiempo no es borroso ni deformado y la fase de la senoide es la misma que la del patrón inicial.

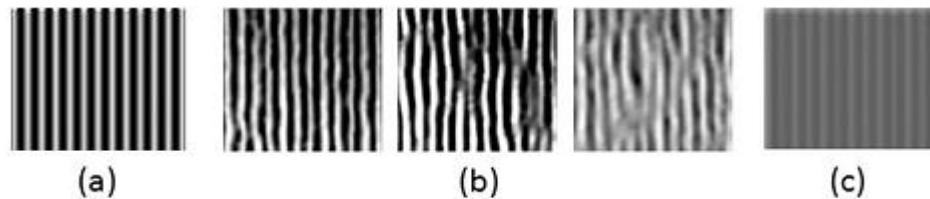


Figura 8. a) Patrón sinusoidal, b) Patrón sinusoidal distorsionado y c) Promedio en el tiempo. Adaptado de. Rhodes, W. T. (2012). Time-average Fourier telescropy: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Applied Optics*, 51(4), A11. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000A11>

1.3.6 Funcionamiento de la Telescopía de Fourier El funcionamiento de la técnica consiste en siete pasos básicos.

1. Comienza con un objeto áspero en 2D con intensidad de reflectancia óptica $f(x, y)$ (el objeto se encuentra normalmente muy distante, siendo, por tanto, razonable el modelo 2-D).
2. Se ilumina el objeto con el patrón de franjas de Young, que se obtiene mediante la interferencia de dos haces láser coherentes o bien dos fuentes secundarias coherentes.
3. Se induce un movimiento con velocidad constante al patrón de franjas.
4. Se recolecta la luz reflejada con un fotodetector (se pueden utilizar múltiples detectores de este tipo, pero no son necesarios, excepto para aumentar la intensidad de la señal).
5. Se procesa la señal detectada en el tiempo, para obtener una componente de la transformada de Fourier espacial $f(x, y)$, es decir, de $F(u, v)$, a la frecuencia espacial correspondiente a las franjas proyectadas.
6. Se repite, secuencialmente o en paralelo, para otras componentes de Fourier.
7. Se calcula la transformada inversa de Fourier de $F(u, v)$ para determinar $f(x, y)$.

Los primeros 4 pasos dan como resultado la intensidad óptica de iluminación (Movimiento del Patrón de franjas de Young)

$$I_{ill}(x, y) = 1 + \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy)] \quad (20)$$

Y la salida correspondiente del detector es proporcional a

$$i(t) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \{1 + \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy)]\} dx dy \quad (21)$$

La evaluación de la ecuación anterior da lugar a:

$$i(t) = B + s(t; u, v), \quad (22)$$

donde $B = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx dy$ es un fondo continuo constante y $s(t; u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy)] dx dy$, es una función en el tiempo de una imagen en el dominio frecuencial que se puede manipular de tal manera que:

$$\begin{aligned} s(t; u, v) &= \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy)] dx dy \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp\{i[\omega t - 2\pi(ux + vy)]\} dx dy \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ e^{i\omega t} \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(ux + vy)} dx dy \right\} = \operatorname{Re}\{e^{i\omega t} F(u, v)\} \\ &= \operatorname{Re}\{e^{i\omega t} |F(u, v)| e^{i\psi(u, v)}\} = |F(u, v)| \cos[\omega t + \psi(u, v)], \end{aligned} \quad (23)$$

$F(u, v) = |F(u, v)| e^{i\psi(u, v)} = \mathcal{F}\{f(x, y)\}$ es la transformada de Fourier de $f(x, y)$. En la ecuación (23), $s(t; u, v)$, la componente de la señal que varía en el tiempo, transmite una portadora sinusoidal de magnitud $|F(u, v)|$ y fase $\psi(u, v)$ de la transformada de Fourier del objeto, evaluada en la frecuencia espacial (u, v) del patrón de franjas de Young. Las mediciones realizadas en una

sucesión de frecuencias espaciales (u, v) , debidamente escogidas, y una transformada discreta de Fourier inversa, reproducen la función del objeto, $f(x, y)$.

En ausencia de turbulencia, el patrón de franjas está dado por la ecuación (20). Con turbulencia presente, la iluminación se describe por:

$$I_{ill}(x, y; t) = b(x, y, t) + a(x, y, t) \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy) + \phi(x, y, t)]. \quad (24)$$

Las franjas en movimiento están desplazadas por la función de fase variable en el tiempo $\phi(x, y, t)$ y tienen una variación espacial y temporal del contraste dada por las funciones de amplitud $b(x, y, t)$ y $a(x, y, t)$. La señal resultante, $s(t; u, v)$, está en este caso, dada por la ecuación:

$$s(t; u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) a(x, y, t) \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy) + \phi(x, y, t)] dx dy \quad (25)$$

La cual es un filtro pasa banda natural para valores suficientemente grandes de ω . Por medio de manipulaciones similares a las que condujeron a la ecuación (23), $s(t; u, v)$ se puede demostrar que tiene la forma de la siguiente ecuación,

$$s(t; u, v) = |\tilde{s}(t; u, v)| \cos[\omega t + \arg\{\tilde{s}(t; u, v)\}] \quad (26)$$

donde la amplitud compleja (interpretando como un fasor) $\tilde{s}(t; u, v)$ está dada por,

$$\tilde{s}(t; u, v) = F\{f(x, y) a(x, y, t) e^{j\phi(x, y, t)}\}, \quad (27)$$

Es decir, la transformada de Fourier del producto de $f(x, y)$ con el valor complejo de la función de turbulencia generada $a(x, y, t) e^{j\phi(x, y, t)}$. En ausencia de turbulencia, como se ilustra en la 2.9(a), $s(t; u, v)$ es una senoide pura con amplitud constante $|F(u, v)|$ y fase constante $\psi(u, v) = \arg\{F(u, v)\}$, en presencia de turbulencia, como se observa en la figura 9 (b), $s(t; u, v)$, tiene la forma de una portadora sinusoidal a la frecuencia ω con variaciones en el tiempo de la magnitud $|\tilde{s}(t; u, v)|$ y en la fase $\theta(t; u, v) = \arg\{\tilde{s}(t; u, v)\}$. (W. T. Rhodes, 2012)

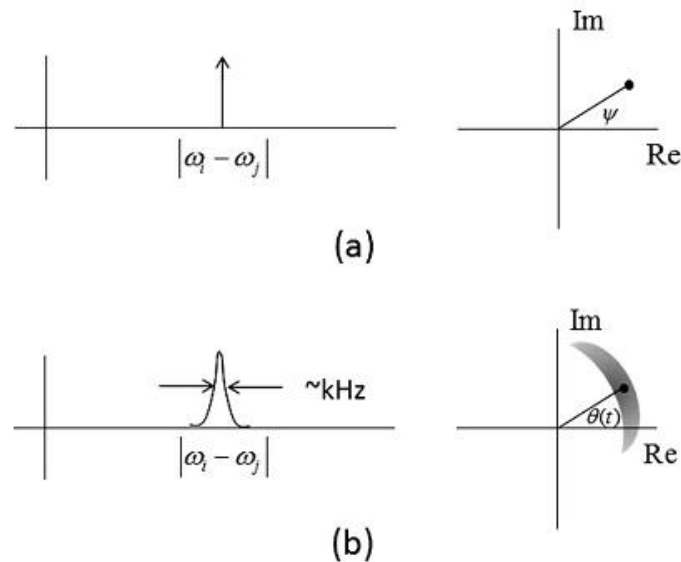


Figura 9. Espectro de frecuencia temporal (izquierda) y diagrama del fasor (derecha) para la señal de salida del detector, pasa banda de la Telescopía de Fourier (a) Sin turbulencia, (b) Con turbulencia. Adaptado de: Rhodes, W. T. (2012). Time-average Fourier telescope: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Applied Optics*, 51(4), A11. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000A11>

1.3.7 Modelo para la Propagación Horizontal En (Labeyrie & Lipson, 2006) se plantea un modelo que relaciona la función de estructura de fase $D_\phi(\vec{r})$ con una función de estructura de índice de refracción, integrando la fase $\phi(x, z)$ a lo largo de una columna vertical h (Propagación Vertical).

$$D_\phi(\vec{r}) = 2.91k_0^2 h C_n^2 r^{5/3} \tag{28}$$

La ecuación (28) es válida sólo para éste modelo de la atmósfera terrestre, cuando la luz ilumina verticalmente las capas horizontales, a una distancia fija horizontal. En el caso objetivo, la luz ilumina horizontalmente las capas horizontales, a una distancia variable vertical vista en el plano z-y, como se muestra en la figura 10. Este modelo fue abordado por (Rhodes & Torres, 2014), y se muestra a continuación.

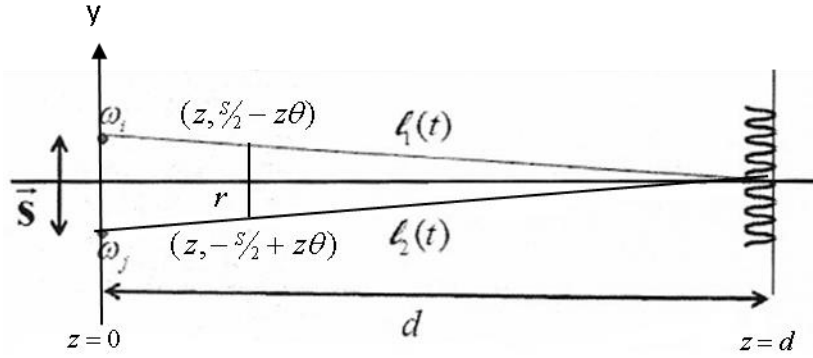


Figura 10. Configuración para TAFT horizontal. Adaptado de: Rhodes, W., & Torres, Y. (2014). *Imaging through horizontal path turbulence: "Calculation of Young's fringe phase variance."*

La onda compleja en el plano (z, y) que sigue el eje horizontal, z , se puede representar a partir de la ecuación 27.

$$\Psi(z, y) = |\Psi(z, y)|e^{i\phi(z, y)} \quad (29)$$

En donde se asume por simplicidad que únicamente la fase se ve afectada. La función de correlación espacial en $(z, -r/2)$ y $(z, +r/2)$ sobre las dos diagonales convergentes (véase la figura 10), en la notación de Kolmogorov se expresa como:

$$\begin{aligned} B_{\Psi}(r) &= \langle e^{i[\phi(z, y) - \phi(z, y+r)]} \rangle \\ &= 1 + \langle i[\phi(z, y) - \phi(z, y+r)] \rangle + \frac{1}{2} \langle i^2 [\phi(z, y) - \phi(z, y+r)]^2 \rangle + \dots \\ &= e^{-\frac{1}{2}D_{\phi}(r)} \end{aligned} \quad (30)$$

Asumiendo que el valor de ϕ es muy pequeño y, la turbulencia es aproximadamente homogénea, tenemos que: $\langle \phi(z, y) \rangle = \langle \phi(z, y+r) \rangle$.

Para relacionar $D_{\phi}(r)$ con la función de estructura del índice de refracción, se integra la fase $\phi(z, y)$ a lo largo de los dos caminos. Para el camino superior se tiene que:

$$\phi(z, S/2 - z\theta) = \int_{(0, +S/2)}^{(z, S/2 - z\theta)} \frac{d\phi}{dz} dz = k_0 \int_0^z n(z, S/2 - z\theta) dz; \quad \phi \equiv k_0 n(z, y) \quad (31)$$

Para el camino inferior:

$$\begin{aligned} \phi(z, -S/2 + z\theta) \\ = \int_{(0, -S/2)}^{(z, -S/2 + z\theta)} \frac{d\phi}{dz} dz = k_0 \int_0^z n(z, -S/2 + z\theta) dz; \quad r \equiv S - 2z\tan\theta \end{aligned} \quad (32)$$

Finalmente se obtiene:

$$D_\phi(r) = k_0^2 \left\langle \left[\int_0^z (n(z, +r/2) - n(z, -r/2)) dz \right]^2 \right\rangle \quad (33)$$

Y teniendo en cuenta que $r = r(z) = S - 2z\tan\theta \cong S - 2z\theta$ para ángulos pequeños:

$$\begin{aligned} D_\phi(r) &= k_0^2 \left\langle \left[\int_0^z \left(n\left(z, +\frac{S-2z\theta}{2}\right) - n\left(z, -\frac{S-2z\theta}{2}\right) \right) dz \right]^2 \right\rangle \\ D_\phi(r) &= k_0^2 \left\langle \iint_0^z \left[\left[n\left(z, \frac{S-2z\theta}{2}\right) - n\left(z, -\frac{S-2z\theta}{2}\right) \right] \left[n\left(z', \frac{S-2z'\theta}{2}\right) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - n\left(z', -\frac{S-2z'\theta}{2}\right) \right] dz dz' \right\rangle \end{aligned} \quad (34)$$

Resolviendo el producto al interior de la ecuación (34), e introduciendo la función de correlación se puede demostrar que:

$$D_\phi(r) \cong 2k_0^2 \int_0^z \left\{ \int_0^z \left[B_n\left(z''\sqrt{1+\theta^2}\right) - B_n\left(z''\sqrt{1+\left[\frac{2d-(2z-z'')^2}{z''}\right]^2\theta^2}\right) \right] dz'' \right\} dz \quad (35)$$

Por medio de la expresión matemática que conecta la función de estructura y la función de correlación, de Labeyrie & Lipson pág. 95, ecuación 5.7; 2006),

$$D_n(y'') = 2[B_n(0) - B_n(y'')] \quad (36)$$

Se puede encontrar que:

$$D_\phi(r) \cong k_0^2 \int_0^z \left\{ \int_0^z \left[D_n \left(z'' \sqrt{1 + \left[\frac{2d - (2z - z'')^2}{z''} \right]^2 \theta^2} \right) - D_n \left(z'' \sqrt{1 + \theta^2} \right) \right] dz'' \right\} dz \quad (37)$$

Y usando la forma funcional en la ecuación (8), donde $C_n^2(0)$, denota el valor de C_n^2 a nivel del suelo, tenemos:

$$\sigma_\phi = D_\phi^{1/2}(r) = \left\{ \frac{4\pi^2 C_n^2(0)}{\lambda^2} \int_0^z \left\{ \int_0^z \left[\left(z''^2 + [2d - (2z - z'')]^2 \theta^2 \right)^{\frac{1}{3}} - (z'')^{\frac{2}{3}} \right] dz'' \right\} dz \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

Expresión que puede ser evaluada numéricamente.

1.4 Sensores para la adquisición de las variables físicas

1.4.1 Tipos de Sensores utilizados Para medir la variación de las variables físicas presentes en la atmósfera, el dispositivo que permite albergar la atmósfera en estudio dispone de sensores que obtienen información de medidas de temperatura, humedad relativa, flujo de aire y presión, hay para cada variable un tipo de sensor (Contreras, 2016; Herreño & Vanegas, 2016; Quintero & Rincón, 2016; Sierra, 2017).

A continuación, se aborda un análisis de los sensores que hacen parte del desarrollo del presente trabajo de investigación, los cuales fueron debidamente ajustados y calibrados con los patrones respectivos.

I. Sensor de humedad HTS2030SMD.

El dispositivo electrónico que se utiliza para censar los cambios de humedad relativa corresponde a un sensor HTS2030SMD que se muestra en la figura 11, y permite medirla usando la variación de capacitancia interna. En la figura 12 se observa el comportamiento de dicha cantidad en función de la humedad relativa.

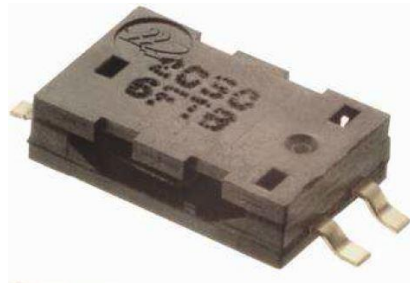


Figura 11. Sensor HTS2030SMD.

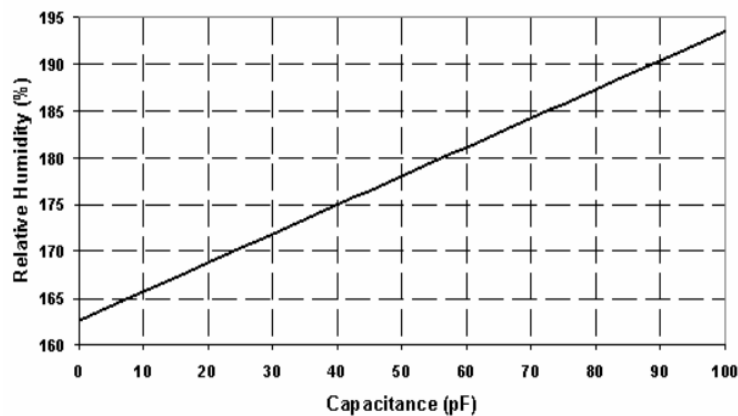


Figura 12. Relación de Humedad versus capacitancia en el sensor HTS2030SMD. Catálogo del fabricante.

II. Sensor digital de flujo de aire 480-5792-ND.

Estos sensores funcionan según el principio de transferencia de calor para medir el flujo de aire. Se compone de un micropunte de Sistema Microelectrónico y Micromecánico (MEMS) con resistencias sensibles a la temperatura depositados en películas delgadas de platino y nitruro de silicio. Los sensores

están completamente calibrados y con compensación de temperatura con un Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas (ASIC) (véase figura 13).



Figura 13. Sensor digital de flujo de aire 480-5792-ND. Adaptado de: Quintero, J., & Rincón, J. (2016). Caracterización de los efectos de la velocidad del aire en la turbulencia atmosférica por medio de la propagación de un haz láser a través de una trayectoria horizontal a bajas alturas. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.

III. Sensor de temperatura LM35.

Para efectos del desarrollo de este trabajo se utilizaron tres sensores LM35 para censar las fluctuaciones de temperatura, en diferentes posiciones de acuerdo a la longitud de propagación de los haces, estos sensores ofrecen una precisión de $0,5^{\circ}\text{C}$, el dispositivo no requiere una calibración previa y posee pequeñas dimensiones tal como se muestra en la figura 15, lo cual permite una mayor eficiencia en la caracterización de la variable temperatura al interior del dispositivo; el sensor envía una señal analógica lineal que corresponde a una tensión proporcional a su temperatura. La baja impedancia de salida, su salida lineal y su precisa calibración hace posible que este circuito integrado sea instalado fácilmente en un circuito de control. Debido a su baja corriente de alimentación se produce un efecto de auto calentamiento muy reducido.



Figura 16. Sensor de presión MPXHZ26250A. Catálogo del fabricante.

V. Fotodetector Power Meter 1918-C de Newport™.

Los medidores de potencia óptica junto con un único detector se utilizan para medir la potencia de una fuente de láser o salida monocromática. En el trabajo, se utilizó el medidor de potencia Newport 1918-C calibrado por el fabricante, que se muestra en la figura 17.



Figura 17. Medidor de potencia óptica y detector. Catálogo del fabricante.

VI. Sensor cámara CMOS.

En un sensor CMOS a diferencia de un sensor CCD, los píxeles son totalmente independientes de sus vecinos, en este tipo de sensores, la digitalización de la imagen se realiza píxel a píxel dentro del mismo sensor. En cada celda de una matriz CMOS se encuentran varios fototransistores, conformando cada uno de los píxeles del sensor, que amplifican y procesan la información

recogida. De acuerdo con las ventajas anteriormente expuestas y tomando en cuenta los factores determinantes para una buena adquisición de imágenes, se optó por trabajar con el sensor EO-2013C (véase la figura 18)



Figura 18. Sensor CMOS EO-2013C. Catálogo del fabricante.

Las especificaciones técnicas de este sensor se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 1.

Especificaciones técnicas sensor CMOS. Catálogo del fabricante.

Resolución:	1600(H) x 1200(V)
Área de imagen activa:	Tamaño sensor: 4,48 x 3,36 mm
Tipo de Sensor:	CMOS
Chrome:	Color
Profundidad del Color:	8 Bit
Montura del lente:	C-Mount
Formato óptico:	1/3"
Tamaño de Pixel:	2,8 x 2,8 μm (H x V)
Cuadros por segundo:	23 fps

1.4.2 Sistema de control Para la aplicación se empleó el microcontrolador STM32F746G – de Discovery de STMicroelectronics. En (ST, 2015) se muestra el microcontrolador utilizado para la adquisición de las variables de temperatura ambiental, humedad relativa, presión y velocidad

del aire en cada una de las pruebas llevadas a cabo, por medio de un sistema embebido con acoples electrónicos realizado en el trabajo de pregrado referenciado en (Reyes & Vásquez, 2018).

2. Antecedentes

Este trabajo hace parte de la investigación apoyada por Colciencias y que lleva a cabo el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) de la Universidad Industrial de Santander, bajo el Proyecto de código interno 8811, denominado “Uso de la Telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia horizontal a baja altura”, el cual ha comprendido el desarrollo de trabajos enfocados en estudiar el comportamiento del haz láser, bajo algunas variables ambientales. A continuación, se enuncian de manera resumida los trabajos llevados a cabo por el equipo de trabajo del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales de la UIS.

2.1 Estudio de la humedad relativa

La humedad fue el primer parámetro analizado en el trabajo de pregrado Herreño & Vanegas, 2016, allí se caracterizó el comportamiento de la humedad a escala de laboratorio utilizando tres sensores HTS2030SMD, como los mostrados en la figura 11.

Los sensores de humedad fueron previamente calibrados con un Fluke 971 como elemento patrón, proporcionado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T). La curva de calibración obtenida es mostrada en la figura 19

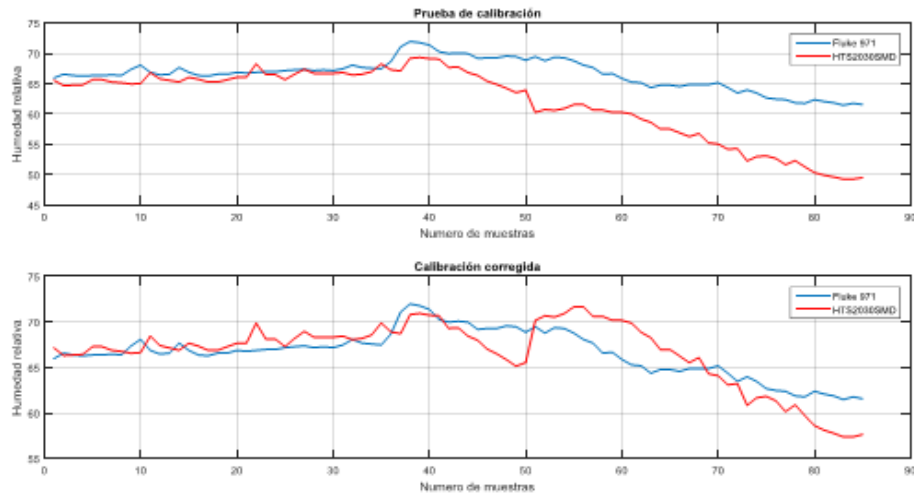


Figura 19. Curva de calibración sensor de humedad. Sin calibrar (Superior), Con calibración (Inferior). Fluke (azul) - Sensor (rojo). Adaptado de: Herreño, M., & Vanegas, J. (2016). *Estudio de los efectos de la humedad en la caracterización de la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica a bajas alturas en trayectorias horizontales*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.

En este trabajo se analizaron las posiciones de los sensores para verificar su variación, lo cual fue importante al momento de realizar las mediciones de dicha variable física.

2.2 Estudio de la velocidad del aire

Otro parámetro en el estudio de la turbulencia fue el efecto de la velocidad de flujo de aire a través del medio, este análisis fue abordado en el GOTS por Quintero & Rincón (2016). Inicialmente, analizaron el comportamiento de la velocidad de aire en diferentes direcciones, también a escala de laboratorio, utilizando dos sensores digitales de flujo de aire 480-5792-ND, como el de la figura 13, los cuales fueron calibrados según la curva de la figura 20 con un termo-anemómetro digital, de la compañía EXTECH.

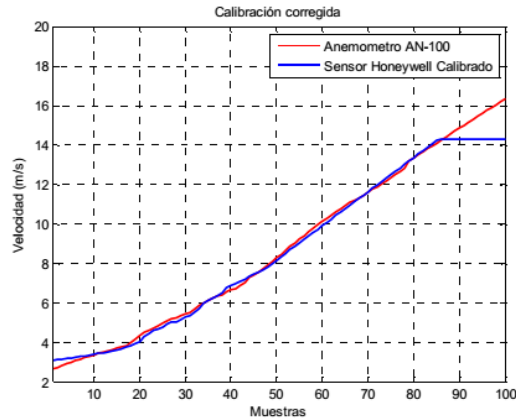


Figura 20. Curva de calibración sensor digital de flujo de aire 480-5792-ND. Adaptado de. Quintero, J., & Rincón, J. (2016). *Caracterización de los efectos de la velocidad del aire en la turbulencia atmosférica por medio de la propagación de un haz láser a través de una trayectoria horizontal a bajas alturas*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.

2.3 Estudio de la temperatura

Una variable física adicional estudiada en la turbulencia atmosférica fue el comportamiento de la temperatura (Contreras, 2016). Éste trabajo abordó los efectos sobre el camino óptico causados por la propagación del haz láser cuando se altera la temperatura de manera controlada. La adquisición de la información de la temperatura se realizó por medio de tres sensores de temperatura LM-35 (figura 14), previamente calibrados y ubicados espacialmente al interior del turbulador, en donde es posible variar la temperatura por medio de una diferencia de potencial suministrada a un reóstato como se observa en la figura 21, para efectos de estudios posteriores se analizó la distribución espacial de la temperatura al interior del turbulador (véase la figura 22).

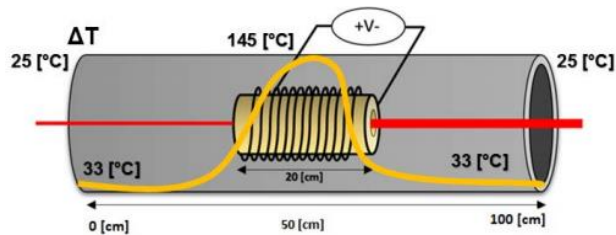


Figura 21. Turbulador con entorno de temperatura controlada. Reóstato es el cilindro hueco dentro. Adaptado de: Contreras, J. (2016). *Caracterización de un haz láser al propagarse a distancias horizontales y baja altura: estudio de la temperatura atmosférica sobre las propiedades del frente de onda*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander

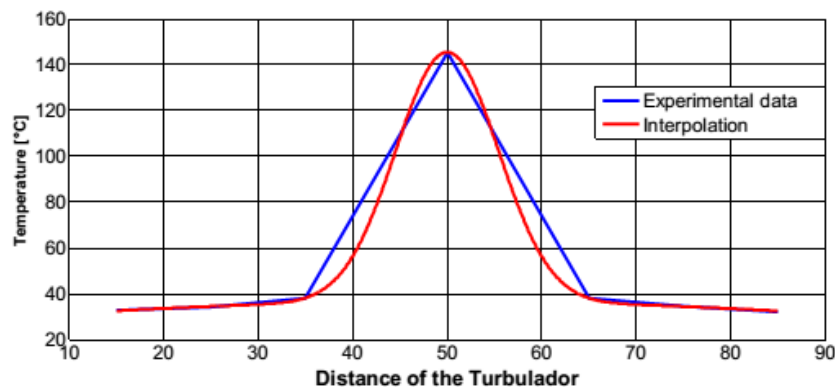


Figura 22. Distribución de temperatura dentro del turbulador. Adaptado de: Contreras, J. (2016). *Caracterización de un haz láser al propagarse a distancias horizontales y baja altura: estudio de la temperatura atmosférica sobre las propiedades del frente de onda*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander

2.4 Estudio de la presión

Para el análisis de la variable presión atmosférica, se llevó a cabo un trabajo de pregrado (Sierra, 2017), donde se utilizó el turbulador como sistema hermético para obtener cambios en la presión

por medio del uso de un compresor, como se muestra en la figura 23, en este trabajo también se diseñó un circuito que permitiera la adaptación del sensor al interior del turbulador.

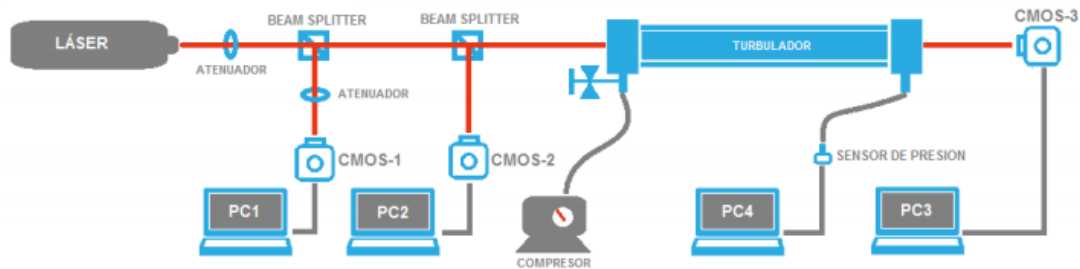


Figura 23. Montaje experimental utilizado en el estudio de la presión en la propagación de un haz láser, a través de la turbulencia atmosférica. Adaptado de: Sierra, W. Y. P. (2017). *Caracterización del efecto de la presión en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander

3. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se llevaron a cabo los pasos que se describen a continuación.

3.1 Diseño y construcción del turbulador

La primera etapa consistió en la implementación y diseño de un dispositivo capaz de generar variaciones y su respectiva medición de las variables físicas presentes en la turbulencia, que se denominó *Turbulador*. Este dispositivo se construyó utilizando un tubo metálico de un metro de

longitud y 7,2 centímetros de diámetro interno con la posibilidad de tener sello hermético. También contiene un sistema de generación de gradientes de temperatura, que consiste en un reóstato de 20,0 centímetros de longitud, 3,0 centímetros de radio externo y 2,0 centímetros de radio interno; el cual admite diferencias de potencial de hasta 220 Voltios y se ubica en el interior del Turbulador por medio de dos acoples circulares de aluminio que lo soportan, permitiendo que no haga contacto con las paredes del Turbulador.

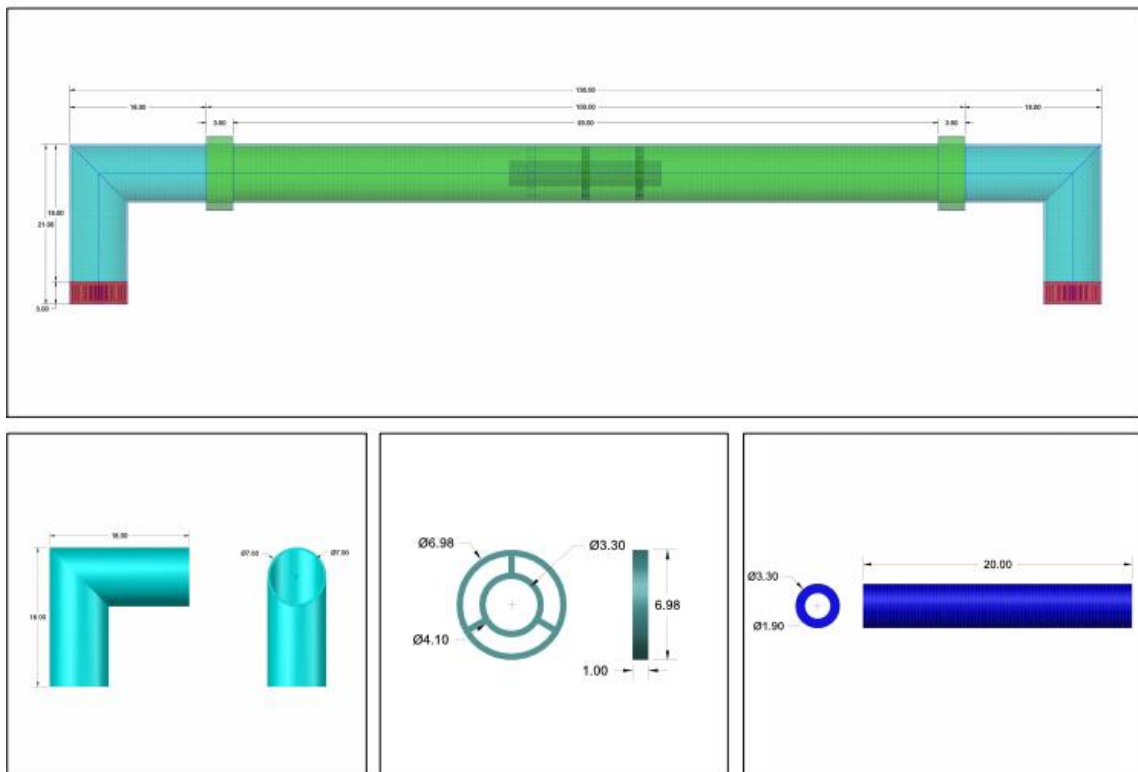


Figura 24. Planos de diseño del Turbulador con reóstato.

Este dispositivo se ubicó, de tal forma que por él atravesase un haz láser sin que presente obstrucción alguna, a lo largo de su camino óptico.



Figura 25. Fotografías del dispositivo generador de turbulencia, “*Turbulador*”

Al interior del dispositivo se ubicaron una serie de sensores para medir algunas variables físicas presentes en la atmósfera del *Turbulador* como la humedad relativa, temperatura, presión y flujo de aire. Para la adquisición de datos de todas las variables ambientales se utilizó un microcontrolador que registró las medidas de cada una de las variables para su posterior análisis.

3.2 Sistema de adquisición de datos

Para compilar de manera compacta la información, se utilizó un sistema embebido previamente programado por integrantes del grupo GOTS.

El sistema se diseñó e implementó integrando las variables ambientales estudiadas y analizadas en trabajos previos en donde se estudió el comportamiento del spot de una única fuente monocromática (Contreras López, 2016), (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016), (Sierra Pinzón, 2017) y (Rincón Correa & Hernández Quintero, 2016), con la intención de unificar y crear un prototipo de medición de las variables físicas: temperatura, humedad, presión y flujo del aire.

En la figura 26, se observa el circuito empleado para la adquisición de datos ambientales diseñado en la referencia Reyes & Vásquez, 2018.

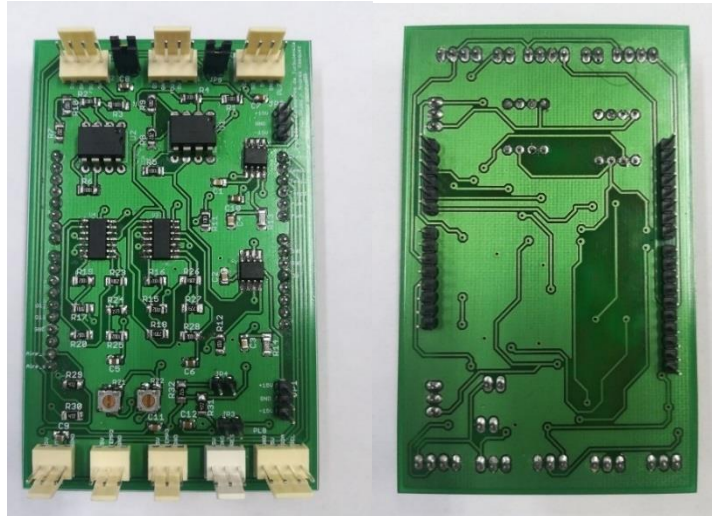


Figura 26. Circuito de sensado de variables atmosféricas. Adaptado de: Reyes, S., & Vásquez, A. (2018). *Caracterización de los efectos de la turbulencia sobre el camino de propagación de un haz láser a diferentes distancias horizontales y baja altura*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander

3.3 Descripción del montaje experimental

La siguiente etapa consistió en el diseño del montaje experimental. Con el fin de analizar la información de la atmósfera, se planteó generar un sistema de franjas por medio de un interferómetro de Young, utilizando una fuente de luz monocromática de 632,8 nm con una separación de espejos de 6,8 cm y una distancia horizontal de propagación de 220,0 cm, para la cual se calculó según la ecuación (2) el período de $20.479 \mu\text{m}$.

Uno de los brazos del interferómetro atravesó el Turbulador de manera longitudinal y el otro se propagó libremente; justo antes de la interferencia de los dos haces, se utilizó un divisor de haz

50-50 (BS) que lleva las señales a un sensor CMOS y un fotodetector mostrado en la figura 17; esto garantizó que la información en niveles de gris que llegaba al sensor CMOS se lograra cuantificar en términos de la energía medida por el fotodetector.

En todas las pruebas que se describen en el siguiente apartado, se utilizó el sensor CMOS de la figura 18 para almacenar videos, la primera medición consistió en tener información de la atmósfera por debajo de los 100ms, para esto se configuró el software de la cámara CMOS para la adquisición de 3001 imágenes con resolución de 256 Píxeles X 260 Píxeles, teniendo una tasa de 214,35 fps que corresponde a un tiempo de 4,66 milisegundos por imagen. En las pruebas posteriores, se configuró la cámara CMOS para almacenar videos con 2031 imágenes de las franjas de interferencia, tomadas a razón de 13,63 fps, con resolución de 1600Píx X 1200 Píx, para un tiempo de 73,36 milisegundos por imagen. El sistema embebido almacena la información de los sensores de humedad, temperatura, presión y flujo de aire; dentro del mismo tiempo que la CMOS captura imágenes, lo que permite correlacionar la información.

En la figura 27 se muestra de manera esquemática el montaje utilizado y la ubicación espacial de los sensores utilizados, que corresponde a los puntos que se esquematizan cerca del turbulador.

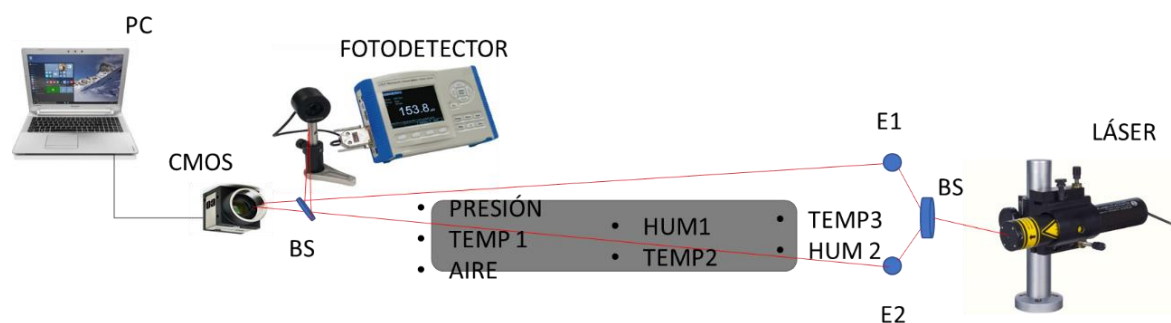


Figura 27. Esquema experimental.

3.4 Pruebas realizadas

3.4.1 Prueba en condiciones ambientales normales Esta prueba consistió en medir las variables físicas por medio de los sensores distribuidos a lo largo del camino óptico sin alterar ninguna de las variables físicas, por lo tanto, se retiró el turbulador y se procedió a almacenar los datos en el sistema embebido como se observa en la figura 28. Este esquema también se utilizó para adquirir imágenes por debajo de los 100 milisegundos, con el fin de verificar la hipótesis de la atmósfera congelada.

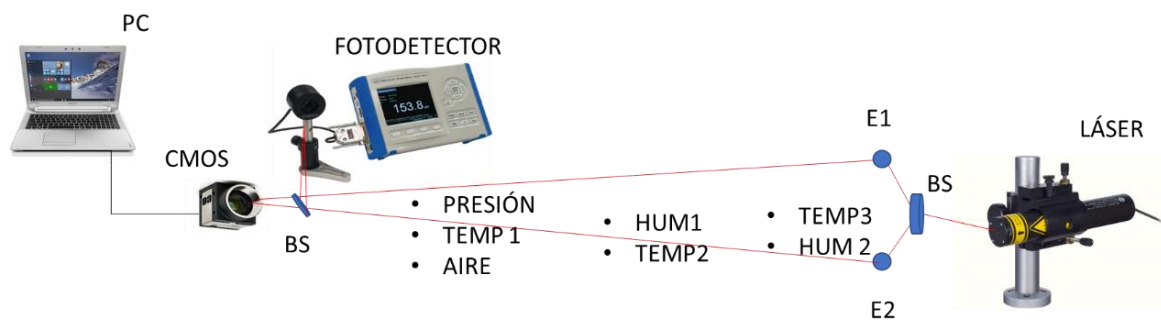


Figura 28. Montaje experimental prueba en condiciones ambientales.

3.4.2 Prueba con variaciones controladas de temperatura El esquema experimental utilizado para las pruebas con valores controlados de temperatura se planeó como se muestra en la figura 29.

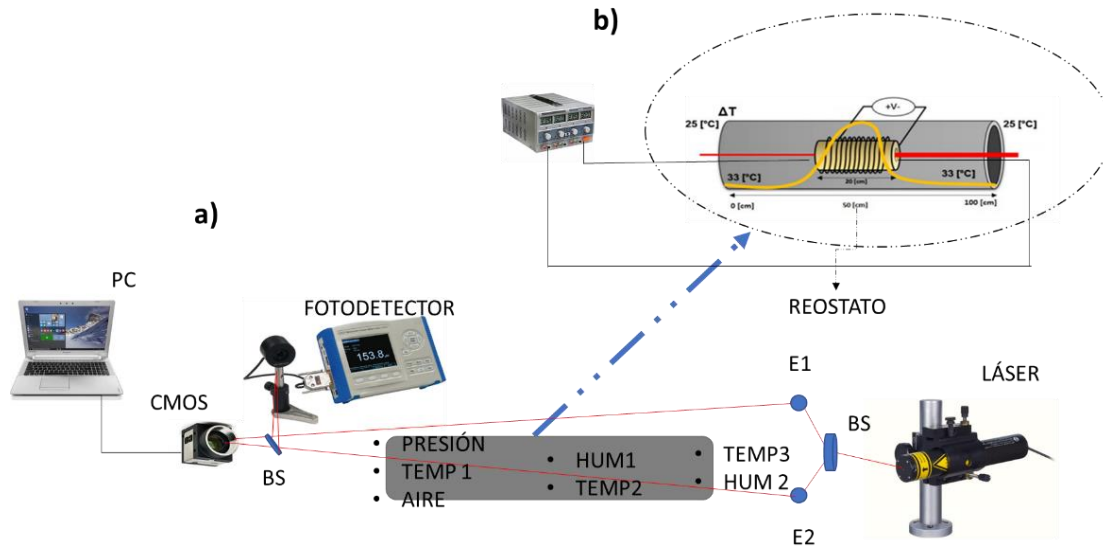


Figura 29. a) Esquema Experimental para las pruebas de temperatura, b) Zoom de turbulador.

En esta prueba, se utilizó un reóstato diseñado sobre un tubo cerámico que contiene un alambrado enrollado de 20,0 centímetros de longitud, 3,0 centímetros de radio externo y 2,0 centímetros de radio interno, el cual se insertó al interior del turbulador, justo en la distancia media (véase la figura 29 parte superior derecha); el reóstato eleva la temperatura al interior del turbulador hasta un valor máximo de 140,0°C cuando está conectado a una diferencia de potencial de 220,0 V como se evidenció en la caracterización de la distribución de temperatura (véase la figura 22).

Para las pruebas con temperatura controlada realizadas en este trabajo, se conservaron los valores mostrados en la tabla 2, los sensores de temperatura se ubicaron al interior del turbulador como se muestra en el esquema de la figura 29 y se sensaron los valores de presión, humedad y rapidez del aire.

Tabla 2.

Valores de diferencia de potencial y temperatura controlada utilizando el reóstato, para las pruebas realizadas.

Tipo de Prueba	Diferencia de Potencial	Temperatura al centro del turbulador
Prueba 1	60,0 V	31,0°C
Prueba 2	90,0 V	36,0°C
Prueba 3	120,0 V	49,0°C

3.4.3 Prueba con variaciones controladas de Velocidad del Aire Al montaje experimental utilizado se le implementó un ventilador centrífugo (figura 30a) que permitió la inyección de corrientes de aire en el régimen turbulento por un extremo, ubicado de forma tal que el aire suministrado viaje de forma longitudinal al Turbulador, fue necesario apoyarse en un sistema de control de velocidad para obtener diferentes valores de ésta variable.

El ventilador centrífugo es un aparato compuesto de un rodete de aletas que gira dentro de una carcasa espiral, suministrando aire de forma más definida que los ventiladores axiales a través de toda la región de propagación. Debido a que las dimensiones de salida del aire del ventilador y el diámetro del turbulador son diferentes se opta por utilizar un acople por medio de un embudo y una manguera, de tal manera que el aire se propague a través de la manguera y seguidamente ingrese al Turbulador sin que interfiera con la trayectoria del haz láser.

Para minimizar movimientos caóticos, al inicio del Turbulador se implanta una rejilla con agujeros pequeños en forma de panal de abejas, como la que se muestra en la figura 30b, para así garantizar un perfil de aire definido a lo largo del Turbulador. De igual forma se usa una manguera para acoplar el ventilador con el sistema Turbulador, alejando de esta forma el motor y evitar que se produzcan vibraciones en los elementos ópticos.



Figura 30. a) Ventilador centrífugo b) Rejilla acoplada al Turbulador.

El sensor de flujo de la figura 13, durante las pruebas, se ubica al extremo final del Turbulador, haciendo la medida del lado del sensor CMOS. Los sensores de humedad, temperatura y presión conservaron sus posiciones al interior del Turbulador.

En la figura 31 se muestra el montaje de laboratorio implementado para la realización de cada una de estas pruebas, en la parte superior derecha se observa una vista esquemática del interior del Turbulador, donde se evidencia con detalle cada elemento utilizado durante los experimentos.

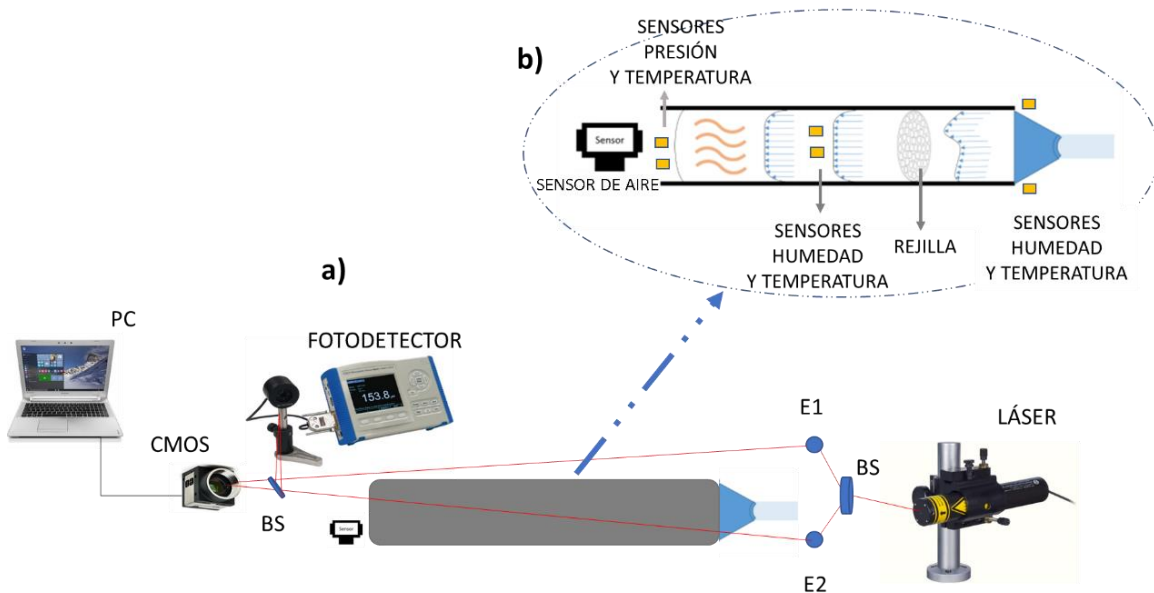


Figura 31. a) Esquema Experimental para las pruebas de velocidad del aire, b) Zoom Turbulador

Las pruebas implementadas en este estudio se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.

Valores de velocidad controlada de aire.

Tipo de Prueba	Velocidad de Aire [m/s]
Prueba 1	3,5
Prueba 2	4,5
Prueba 3	5,5
Prueba 4	6,5

3.4.4 Prueba con variaciones controladas de Presión Para poder inyectar las diferentes presiones con las que se realizaron las pruebas, se realizó un sello hermético al Turbulador utilizando dos vidrios transparentes y planos en los extremos, esto con el fin de permitir el paso del haz láser, luego se utilizó un compresor de aire para automóvil que cumplía con el rango necesario para el desarrollo del estudio; este se conectó neumáticamente al Turbulador por medio de mangueras y a su vez se adaptó un manómetro analógico para verificar el valor de la presión inyectada (véase la figura 32)



Figura 32. Turbulador, manómetro analógico de verificación inicial y compresor.

El montaje experimental utilizado para realizar las pruebas de presión se simplifica en la figura 33. Además, se aclara que el sensor de presión se ubicó al interior del Turbulador y la comunicación entre el sensor y el sistema embebido se realizó por medio de dos válvulas dispuestas en los extremos del Turbulador, en la parte superior derecha se observa una vista esquemática del interior del turbulador, donde se evidencia con detalle cada elemento utilizado a lo largo de los experimentos.

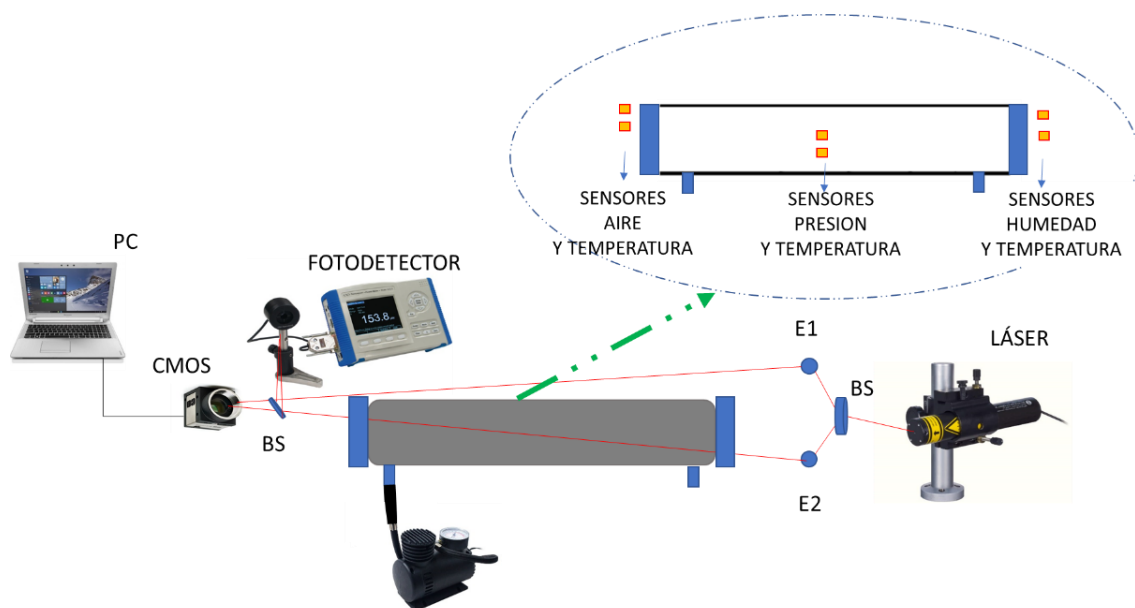


Figura 33. Montaje experimental para las pruebas de Presión.

Tabla 4.

Valores de presión controlada.

Tipo de Prueba	Presión [PSI]
Prueba 1	15,0
Prueba 2	20,0
Prueba 3	25,0

3.4.5 Prueba con variaciones controladas de Humedad Con el fin de obtener información de la atmósfera para diferentes valores constantes y controlados de la humedad relativa, fue necesario rediseñar el Turbulador agregando un canal de PVC (véase la figura 34), en donde se suministró agua con diferentes valores de temperatura obteniendo vapor de agua al interior del Turbulador.



Figura 34. Ilustración con canal de agua afuera, pero que va al interior del Turbulador para la generación de la humedad relativa en su interior.

Para esta prueba se conservó la distribución espacial de los sensores, inicialmente propuesta en la 27, ubicando un sensor de humedad y un sensor de temperatura en el centro del canal como puede observarse en la figura 34.

En la figura 35 se esquematiza el montaje utilizado para las diferentes pruebas de humedad, en la parte superior derecha se observa una vista esquemática del interior del turbulador, donde se evidencia con detalle cada elemento utilizado a lo largo de los experimentos.

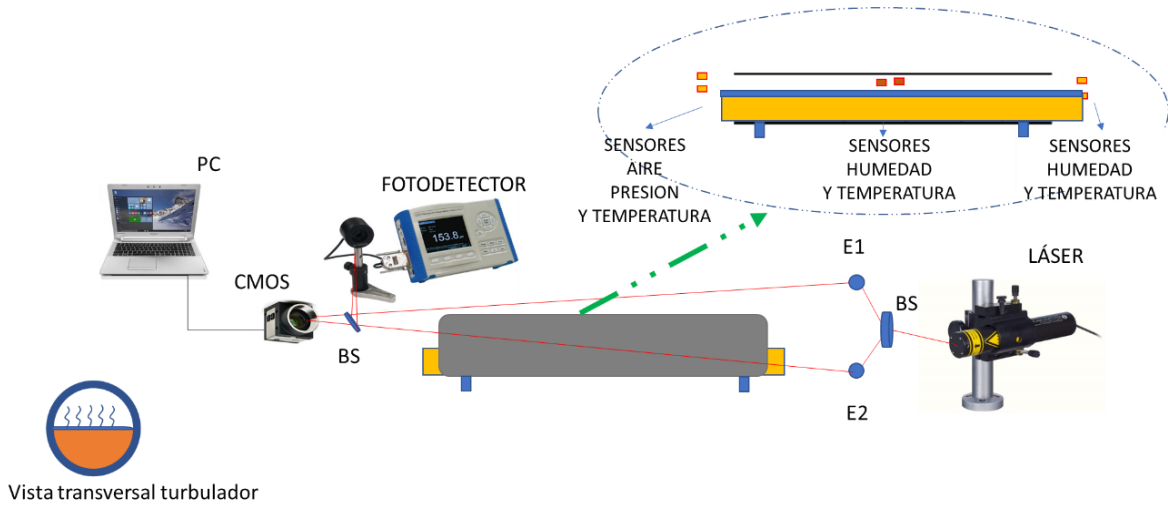


Figura 35. Esquema experimental utilizado en las pruebas de Humedad

Tabla 5.

Valores de humedad controlada.

Tipo de Prueba	Humedad [%]
Prueba 1	58,0
Prueba 2	75,0
Prueba 3	85,0

4. Procesamiento

Luego de adquirir las imágenes de las franjas proyectadas sobre el sensor de la cámara CMOS, se procesó únicamente la componente roja de la imagen RGB capturada por la misma, ya que contiene y responde a la longitud de onda del láser utilizado. Un ejemplo de tales imágenes de franjas se visualiza en la figura 36.

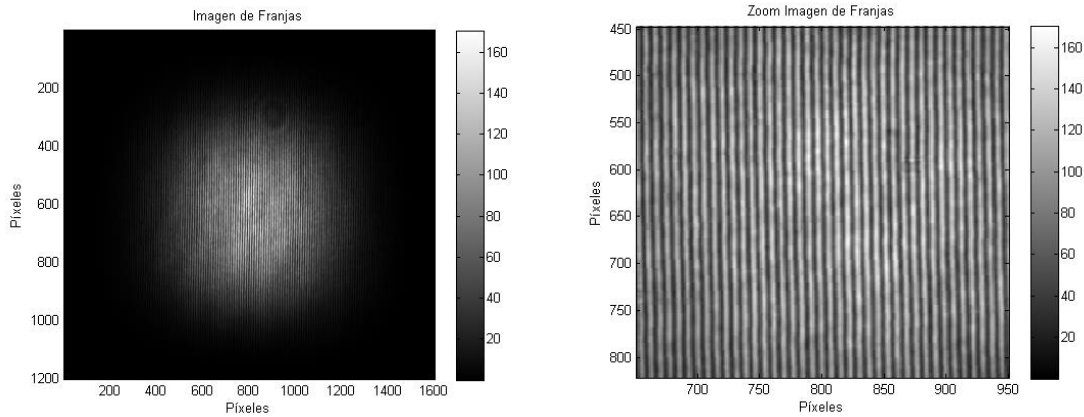


Figura 36. Imagen original de franjas (Izquierda). Recuadro con detalle en el centro (Derecha).

Por medio de la transformada de Fourier se determinó la frecuencia fundamental f_0 del patrón de franjas, en esta frecuencia se realizó un filtro con una ventana cuadrada suavizada en los bordes por una curva de Hanning, de ancho de banda $2f_0/3$ y centrado en dicha frecuencia fundamental, este tamaño para el filtro, es el más óptimo, puesto que, garantiza que no se superponen frecuencias de diferentes órdenes al de la frecuencia fundamental, en la figura 37 se muestra el filtro aplicado al espectro de las imágenes de franjas.

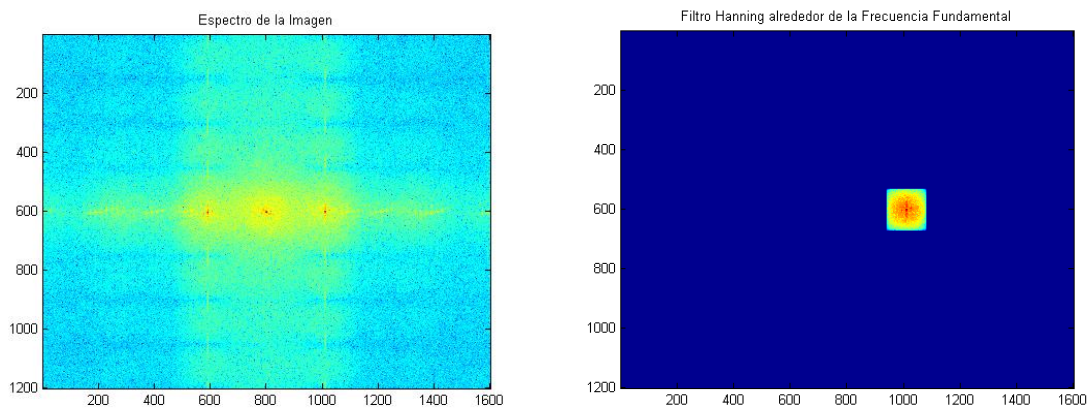


Figura 37. Filtro cuadrado ubicado en f_0 .

A partir de este filtro, se calculó la transformada de Fourier inversa para así determinar el mapa de fase discontinuo y su amplitud. En la figura 38 se muestran los contornos de fase y sus múltiplos de 2π , con resolución subpíxel, sobre una sección de la imagen, en donde se observa que en los bordes no se detectan de manera correcta, imperfección del algoritmo propiamente dicho.

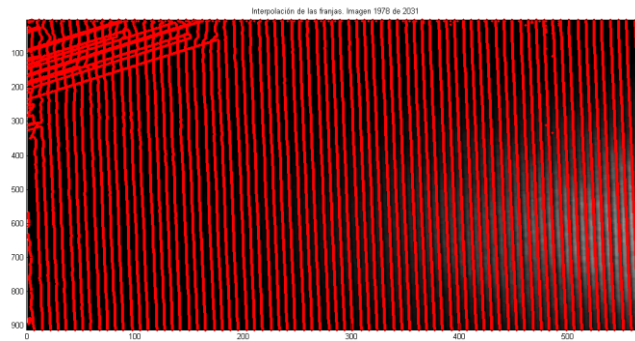


Figura 38. Líneas de contorno del plano de fase sobre la imagen de franjas originales.

Como se puede observar en la figura 36 izquierda, la interferencia se concentra mejor en la parte central de la imagen y, por lo tanto, los contornos de fase fuera de esta área carecen de información de la interferencia, su visibilidad decae significativamente. Es por esto por lo que para seleccionar el área de interés se usó una máscara binaria con arreglos morfológicos para eliminar el ruido de pixeles desconectados, obtenida a partir del módulo de la imagen filtrada con el filtro sintonizado en las frecuencias pertenecientes al patrón de franjas de la imagen original.

Debido a la estructura del frente de onda Gaussiano y que la cámara es un sensor cuadrático que registra la intensidad, se utilizó un umbral a $\frac{1}{e^2}$ (cintura del haz láser), el resultado se muestra en la figura 39.

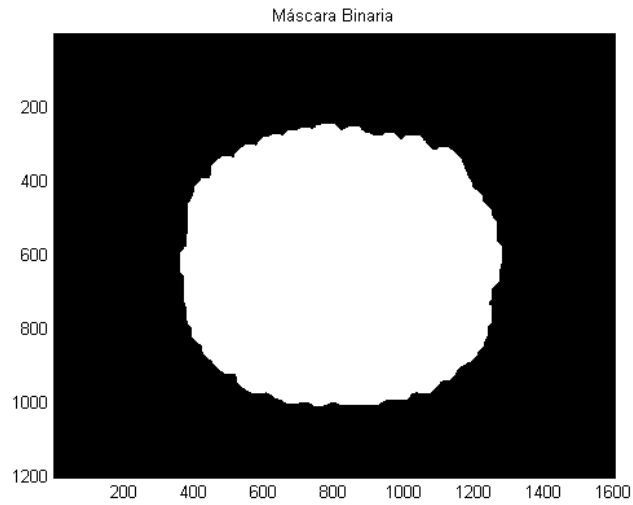


Figura 39. Máscara binaria.

Luego se procedió a determinar los contornos de fase sobre la región de interés (líneas azules) como se observa en la figura 40 que está, para efectos de visualización, sobre la imagen original.

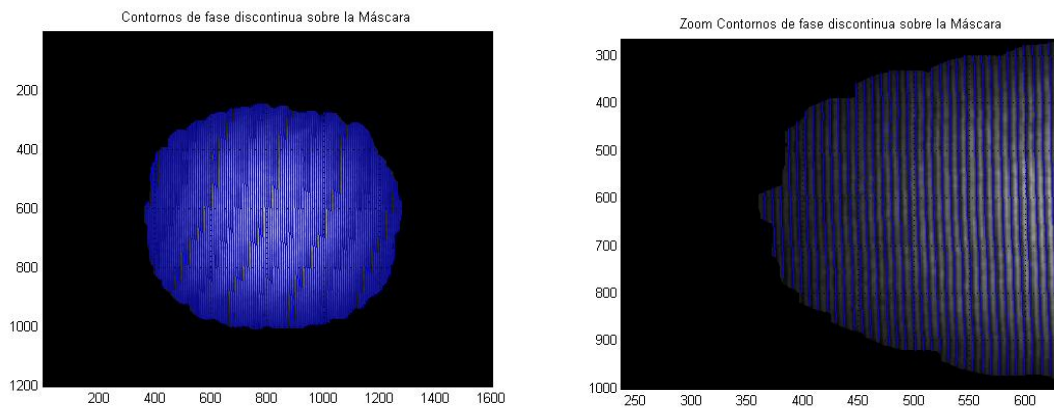


Figura 40. Contornos de fase discontinua sobre la región de interés (Izquierda), Contornos de fase discontinua aumentados digitalmente (Derecha).

Utilizando la fase discontinua, la máscara binaria y el algoritmo de *unwrapping*, enunciado en la sección 2.2 de este documento. (Meneses et al., 2005), se determinó el mapa de fase continua o desenvuelta (figura 41).

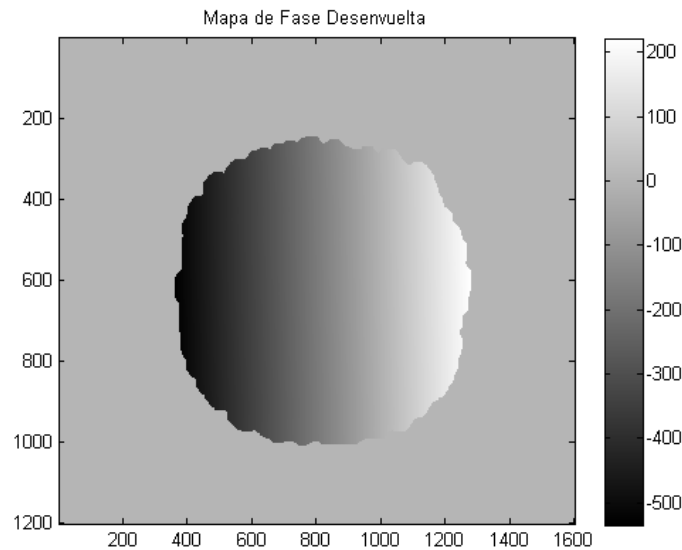


Figura 41. Mapa de fase continua al interior de la región de interés.

Este plano contiene las fluctuaciones espaciales de fase de las franjas, debidas a las variables atmosféricas presentes en la turbulencia, sí las variables atmosféricas permanecen constantes en un intervalo suficientemente grande, ellas no deberían fluctuar y permanecerían inamovibles; en ausencia de turbulencia alguna, deberían ser perfectas. Para extraer dichas fluctuaciones se interpolaron, como un primer modelo de su representación, al primer orden cada uno de los puntos de la fase a un plano ideal, resultado de la interpolación del plano promedio de todas las realizaciones, para posteriormente determinar las diferentes fluctuaciones del plano de fase real con el plano interpolado.

Con el propósito de caracterizar los efectos de la turbulencia sobre las franjas, se estudiaron los siguientes aspectos:

- Orientación espacial de las franjas
- Paralelismo
- Periodo espacial de las franjas
- Visibilidad

4.1 Orientación espacial

Para la orientación espacial; se llevó a cabo por separación de los puntos de fase que pertenecen a cada franja de la figura 40, e interpolando al primer orden con el fin de obtener información de la pendiente de cada línea de igual fase. Con el valor de las pendientes de las franjas de la imagen se determinó la orientación promedio del sistema de franjas, y su desviación estándar se propone como medida para determinar la fluctuación de la orientación de estas. La figura 42 muestra a manera de ejemplo, una de las líneas obtenidas por este método.

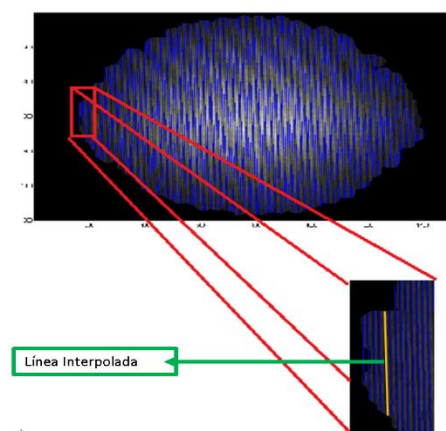


Figura 42. Línea interpolada a partir de los puntos de fase de una franja.

4.2 Paralelismo espacial

Los planos de fase para cada imagen aportan gran información del paralelismo que tienen las franjas entre sí, un ligero cambio en el plano de fase continuo representa una alteración del paralelismo del patrón de franjas en el punto en cuestión; es así como el paralelismo de las franjas se asoció al cambio en el ángulo que sufren diferentes vectores normales al plano de fase continuo, respecto a un único vector coplanar del plano de fase interpolado como referencia y descrito anteriormente. Dicho de otra forma, se entiende que, en ausencia de turbulencia los planos reales no deberían tener alguna alteración, en tanto, los vectores normales a este plano estarían todos a ángulo recto con un vector coplanar del plano de fase interpolado.

Para esta aplicación se determinaron vectores normales en subdivisiones de 100x100 píxeles sobre cada imagen de cada prueba, cada uno de estos fueron comparados con el vector coplanar del plano de fase interpolado y se determinó el ángulo que forma cada vector de los planos reales de fase con el plano promedio interpolado de cada prueba, esto se representa en distribuciones normales como se verá más adelante.

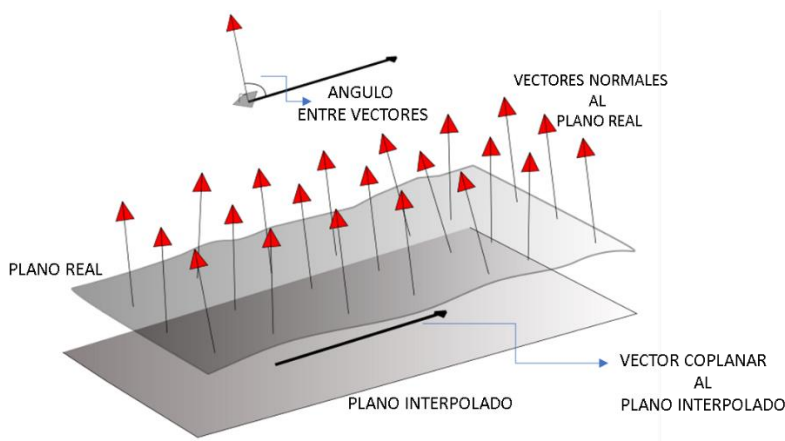


Figura 43. Fluctuaciones de fase de los planos reales con un plano interpolado como referencia.

4.3 Periodo y frecuencia espacial

Se calculó la pendiente de cada línea de contorno del plano de fase interpolado y se determinó una línea perpendicular a este plano, la cual se ubicó sobre el mismo plano interpolado como se observa en la figura 44, las diferencias sucesivas entre las intersecciones de esta línea y las líneas de contorno del plano interpolado (puntos azules), corresponden al período local de cada franja.

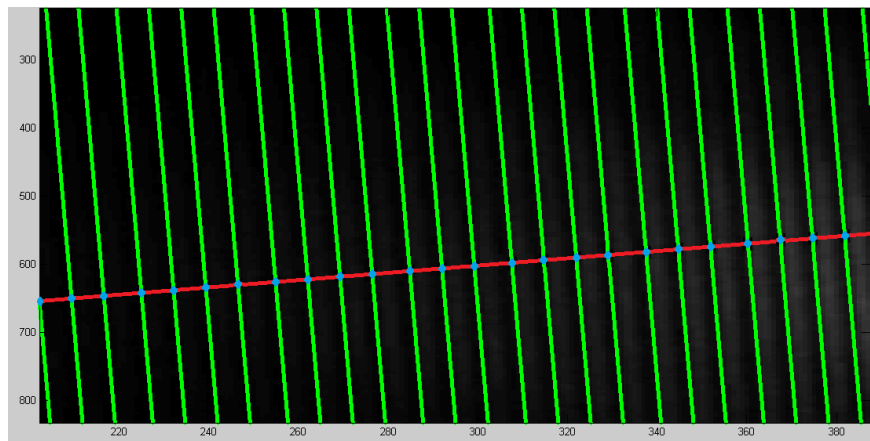


Figura 44. Líneas de contorno de fase del plano interpolado (verdes), línea perpendicular a las líneas de contorno (roja).

4.4 Visibilidad

La ecuación (24) expresa en forma general, el modelo matemático de un patrón de franjas, otra forma común de expresarla es de la siguiente manera:

$$I_{ill}(x, y) = I_0(x, y)\{1 + V(x, y) \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy) + \phi(x, y)]\}. \quad (39)$$

Donde $V(x, y)$ es el contraste o visibilidad de las franjas y al primer orden se puede expresar como:

$$V = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{i}n}} = \frac{a}{b} \tag{40}$$

b está relacionada con el fondo continuo de las franjas y a con la dispersión que provoca cambios en la modulación del perfil sinusoidal. Consecuentemente, por medio de la expresión (40), se determina este parámetro de interés. A manera de ejemplo, en la figura 45 se muestran las componentes espectrales de las franjas de interferencia según el eje horizontal, asimismo, podemos observar las magnitudes del fondo continuo y la magnitud de la frecuencia fundamental del patrón de franjas. ($b = 3.9143 \times 10^7$, $\frac{a}{2} = 8.556 \times 10^6$) que están escalados al valor real por la discretización y el número de píxeles que contiene la imagen.

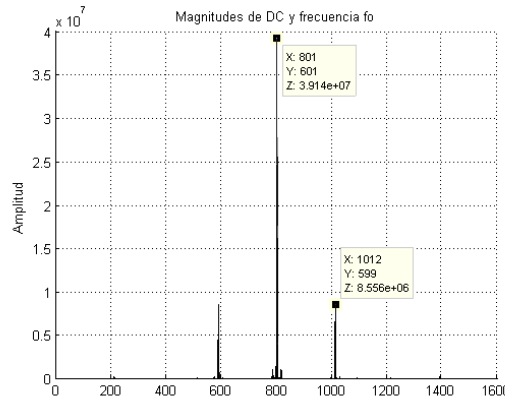


Figura 45. Magnitud de las componentes espectrales del patrón de franjas.

5. Resultados

A partir de la información obtenida por los sensores para cada prueba, se procedió a analizar esta información, a continuación, se muestra los datos graficados para cada prueba:

5.1 Valores constantes de los parámetros para las pruebas realizadas

De la figura 46 a figura 58 representan los valores de los parámetros físicos, establecidos en las diferentes pruebas realizadas, en cada figura se muestra cómo fue el comportamiento del parámetro durante la toma de 2031 datos, se puede evidenciar en dichas gráficas, que la medida de cada parámetro, se mantuvo constante durante el tiempo de registro. También es de recalcar que la medición de la humedad relativa presentó mayor dificultad por tratarse de un parámetro que fluctúa con gran frecuencia.

5.1.1 Pruebas de Temperatura En la figura 46 se observa el comportamiento temporal de los valores de temperatura establecidos para este estudio, estos datos fueron adquiridos por medio del esquema experimental que se muestra en la figura 29.

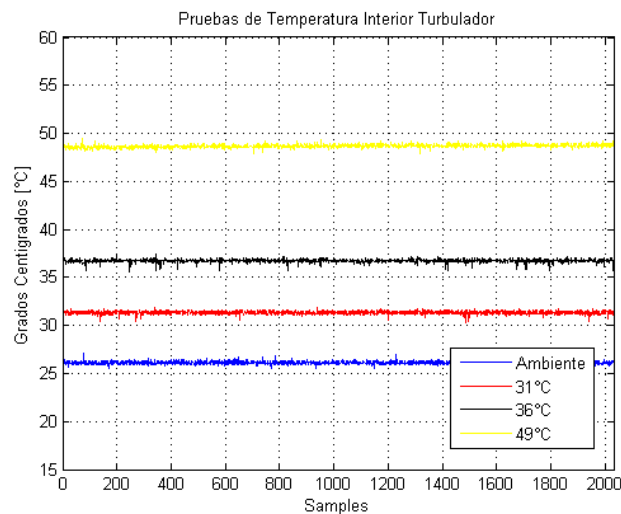


Figura 46. Valores de Pruebas de temperatura

I. Comportamiento de los parámetros medidos durante las pruebas de Temperatura

A. Humedad interior

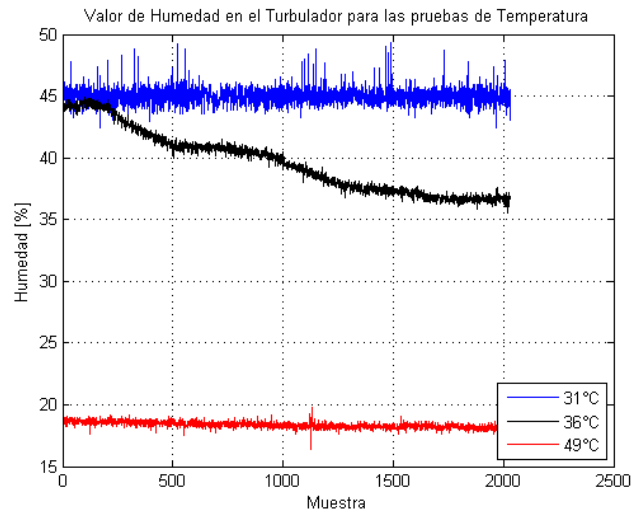


Figura 47. Valores de la Humedad durante las pruebas de temperatura

Durante las pruebas de temperatura se logró estabilizar los valores de humedad al interior del turbulador para las muestras tomadas a 31°C y 49°C, mientras que para la prueba de 36°C se observa una caída de la humedad del 10%, este cambio se asocia que en el espacio confinado (Turbulador) a medida que la temperatura interior se eleva, existe una tendencia a la disminución del vapor de agua dentro del mismo; el interés en esta prueba fue garantizar una temperatura estable y esto evidenció la dificultad de poder controlar simultáneamente el parámetro humedad con el de la temperatura.

B. Presión

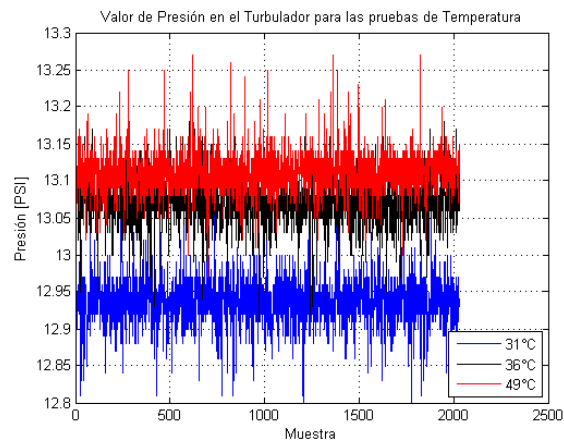


Figura 48. Valores de la Presión durante las pruebas de temperatura

En la figura 48 se observa que, para valores de temperatura mayor, la presión presenta un ligero aumento en su valor, por tanto, nuevamente se observa la dificultad de controlar simultáneamente todas las variables dentro de un sistema físico.

C. Aire

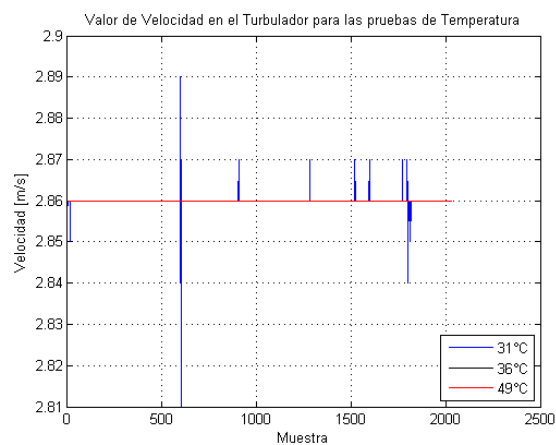


Figura 49. Valor de la velocidad del aire para las pruebas de Temperatura

Durante las pruebas de temperatura se puede constatar en la figura 49, que la velocidad del aire permanece invariante.

5.1.2 Pruebas de Velocidad de aire En la figura 50 se observa el comportamiento temporal de los valores de las pruebas de velocidad de aire establecidos para este estudio, estos datos fueron adquiridos por medio del esquema experimental que se muestra en la figura 31.

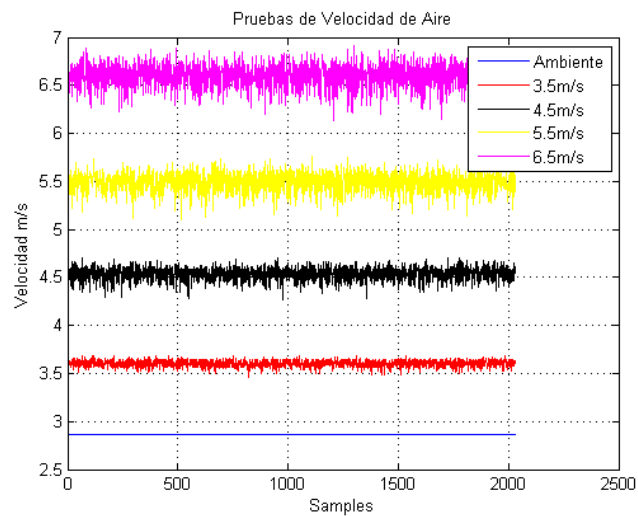


Figura 50. Valores de Pruebas de Velocidad de Aire

I. Comportamiento de los parámetros medidos durante las pruebas de Velocidad de aire

A. Temperatura

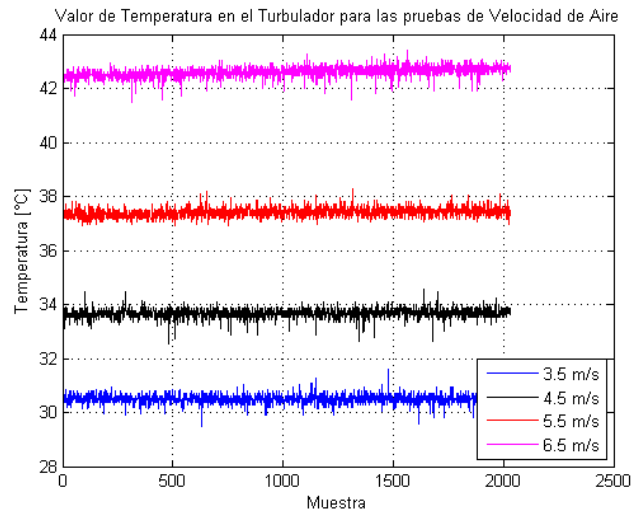


Figura 51. Valores de temperatura para las pruebas de velocidad de aire

Como se puede observar en la figura 51 la temperatura en las pruebas de velocidad aumenta, este efecto está asociado al instrumento utilizado para la generación de aire de diferentes valores de velocidad, durante la prueba se pudo observar que al aumentar la potencia en la sopladora, esta inyectaba aire con mayor temperatura, este efecto no se pudo mitigar e inevitablemente afecta la medida.

B. Presión

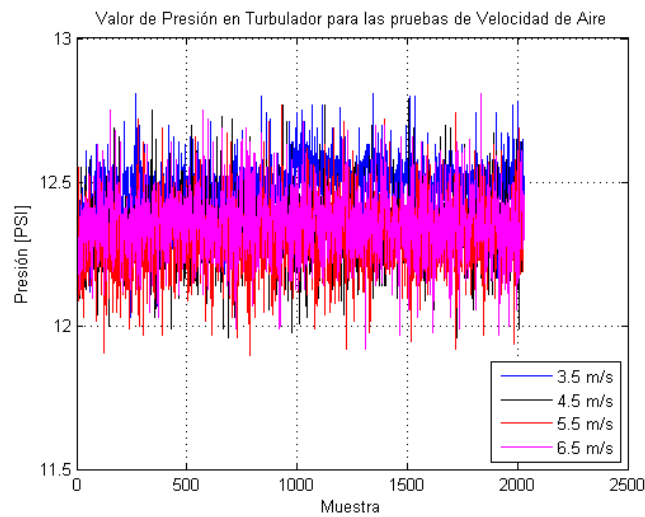


Figura 52. Valores de presión para las pruebas de velocidad de aire

La presión durante las pruebas de velocidad de aire no presenta variaciones apreciables, los valores de este parámetro oscilan alrededor del valor de presión ambiente.

C. Humedad relativa

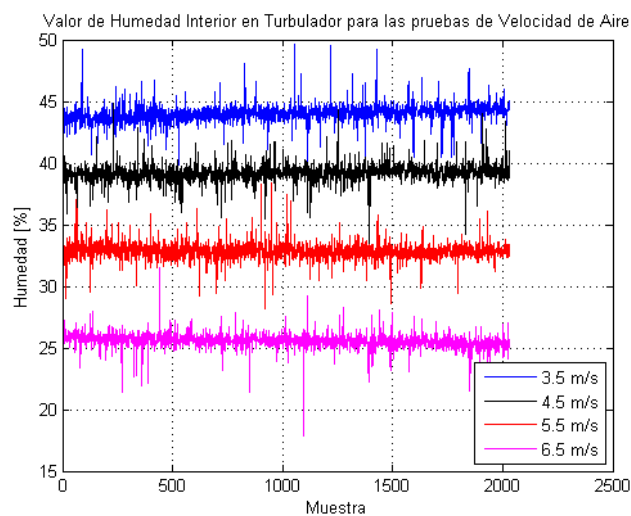


Figura 53. Valores de humedad para las pruebas de velocidad de aire

Al igual que en la figura 47, apreciamos la dependencia inversa que sostienen los parámetros de Humedad y Temperatura, puesto que, los incrementos en la velocidad del aire implican un incremento en la temperatura de la moléculas de aire dentro del turbulador, en tanto, existe una disminución en la humedad relativa interna, esto se puede observar en la figura 53.

5.1.3 Pruebas de Presión En la figura 54 se observa el comportamiento temporal de los valores de las pruebas de presión establecidos para este estudio, estos datos fueron adquiridos por medio del esquema experimental que se muestra en la figura 33.

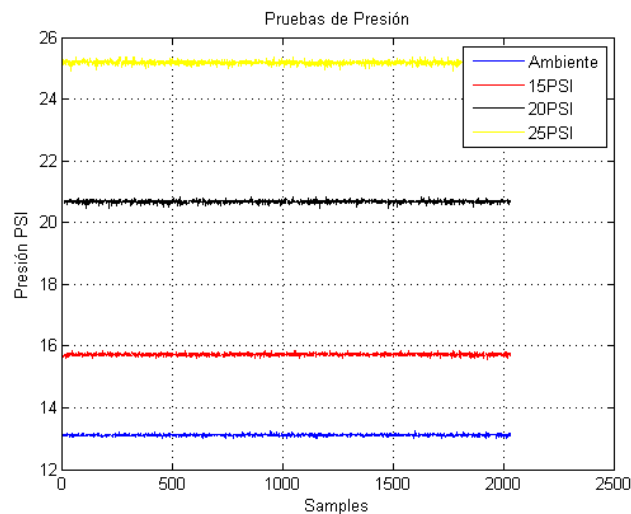


Figura 54. Valores de Pruebas de Presión

I. Comportamiento de los parámetros medidos durante las pruebas de Presión

A. Temperatura

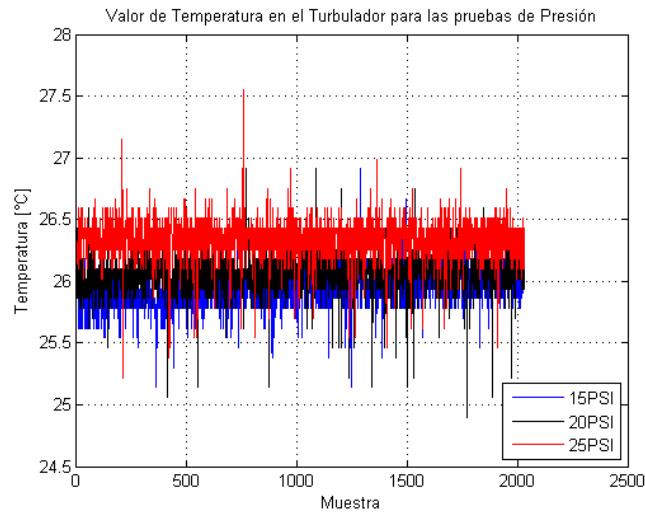


Figura 55. Valor de temperatura para las pruebas de Presión.

La temperatura al interior del turbulador presenta una variación aproximada a 1°C centígrado entre las pruebas de diferentes valores de presión, este pequeño gradiente obedece a la ley de los gases ideales, dado que, un aumento de la presión en las moléculas de aire confinado en el turbulador admite una dependencia directa con la temperatura, en tanto que, ésta también aumenta.

B. Humedad interior

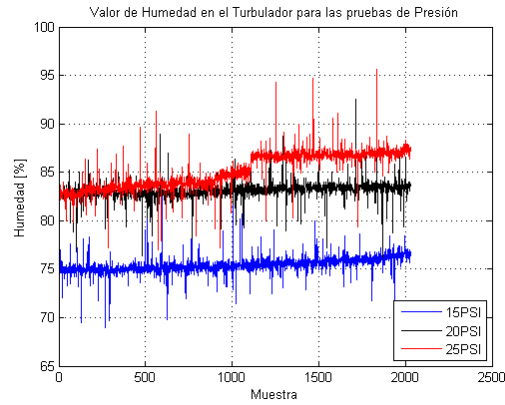


Figura 56. Valor de humedad para las pruebas de Presión

Durante la prueba de presión se observa que la humedad aumenta a medida que la presión también lo hace. Se aclara que la presión al interior del turbulador se inyectó con un compresor de aire desde el exterior del dispositivo (turbulador) con un valor de humedad diferente a la humedad interior.

C. Velocidad de aire

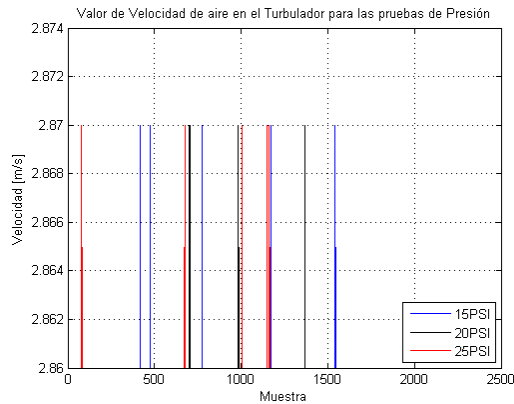


Figura 57. Velocidad de aire para las pruebas de Presión

La velocidad de aire permanece invariante para las pruebas de presión, salvo unas pocas muestras que presentan una variación poco apreciable en una centésima de m/s.

5.1.4 Pruebas de Humedad relativa En la figura 58 se observa el comportamiento temporal de los valores de las pruebas de presión establecidos para este estudio, estos datos fueron adquiridos por medio del esquema experimental que se muestra en la figura 35.

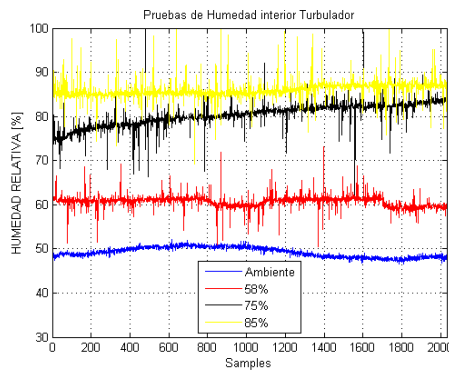


Figura 58. Valores de Pruebas de Humedad relativa

I. Comportamiento de los parámetros medidos durante las pruebas de Humedad relativa

A. Temperatura

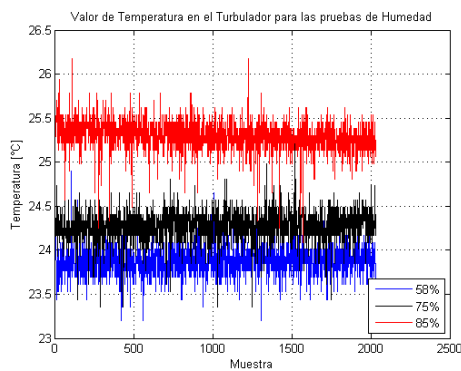


Figura 59. Valor de temperatura para las pruebas de humedad.

Este resultado no se relaciona con el argumento presentado para la figura 83, en donde se observó que la temperatura y la humedad guardan una relación inversa, en la figura 59 se inyecta vapor de agua como se mostró en la figura 34, este vapor de agua es generado a partir del ingreso al turbulador de un volumen de agua con cierta temperatura, es por esto que la temperatura en esta prueba guarda una relación directa con la humedad

B. Presión

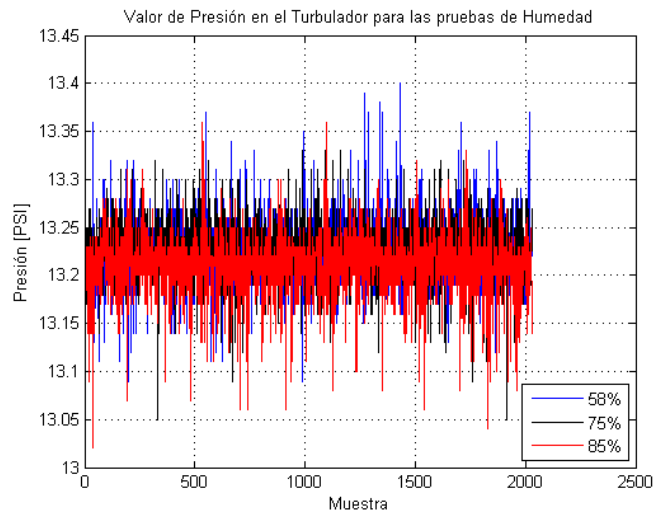


Figura 60. Presión para las pruebas de Humedad

En la figura 60 se observa que la presión permanece invariante ante los cambios de humedad.

C. Velocidad de aire

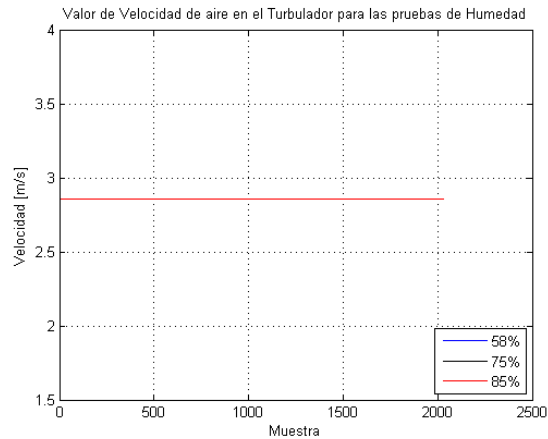


Figura 61. Velocidad de aire para las pruebas de humedad

La velocidad de aire es un parámetro que no cambia mientras se realizan cambios en la humedad relativa, esto se puede observar en la figura 61.

Como se observó anteriormente, para cada una de estas pruebas se sensoron simultáneamente todos los parámetros presentes en la turbulencia. A continuación, se presentan resultados asociados a la Orientación espacial, Periodo espacial, Paralelismo y Visibilidad de las franjas de interferencia de Young.

5.2 Orientación espacial de las franjas

5.2.1 Temperatura:

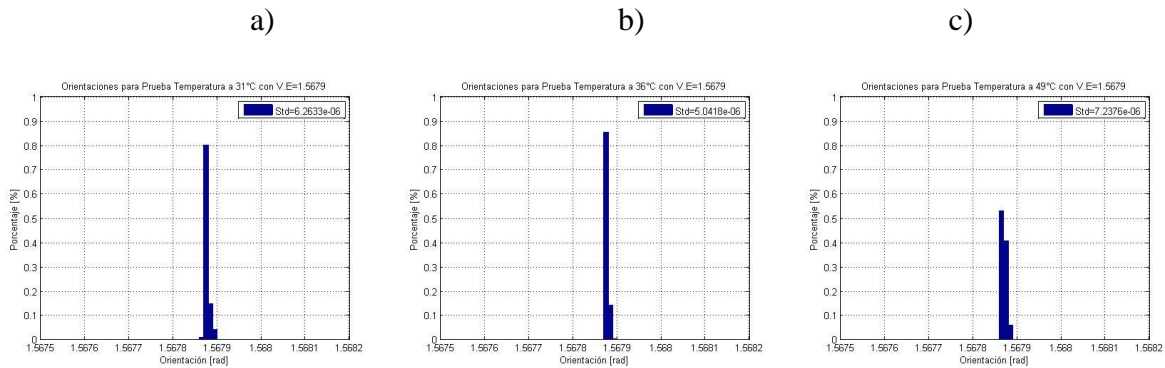
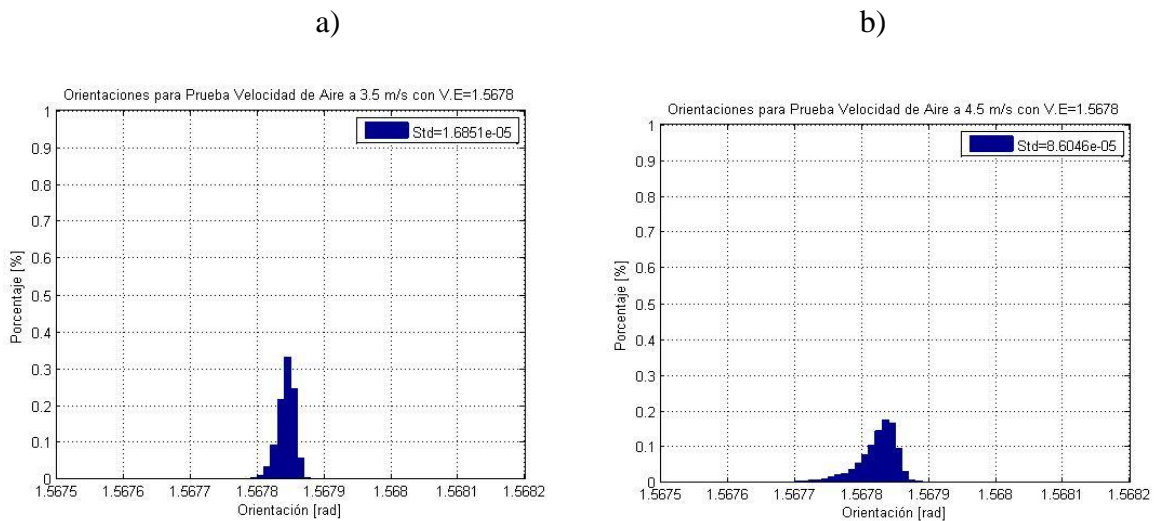


Figura 62. Distribución de orientación de las franjas, para pruebas de temperatura: a) 31°C, b) 36°C y c) 49°C.

5.2.2 Velocidad de Aire



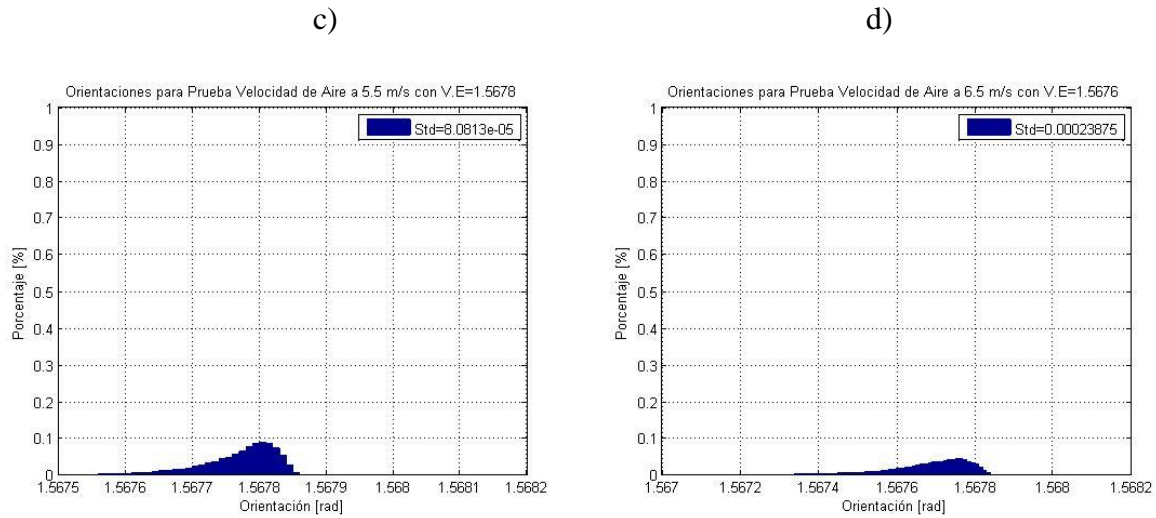


Figura 63. Distribución de orientación de las franjas, para pruebas con velocidad de aire: a) 3.5 m/s, b) 4.5 m/s c) 5.5 m/s y d) 6.5 m/s

5.2.3 Presión

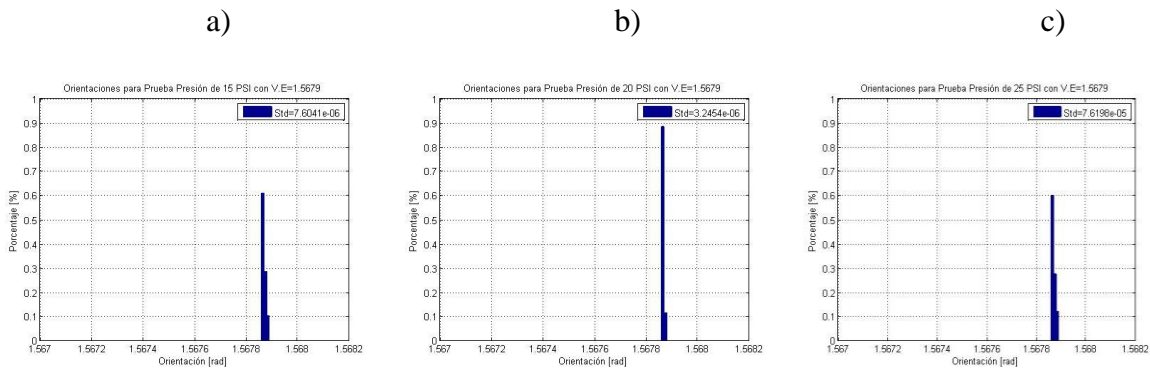


Figura 64. Distribución de orientación de las franjas, para pruebas con presión a) 15 PSI, b) 20 PSI y c) 25 PSI

5.2.4 Humedad Relativa (H.R.)

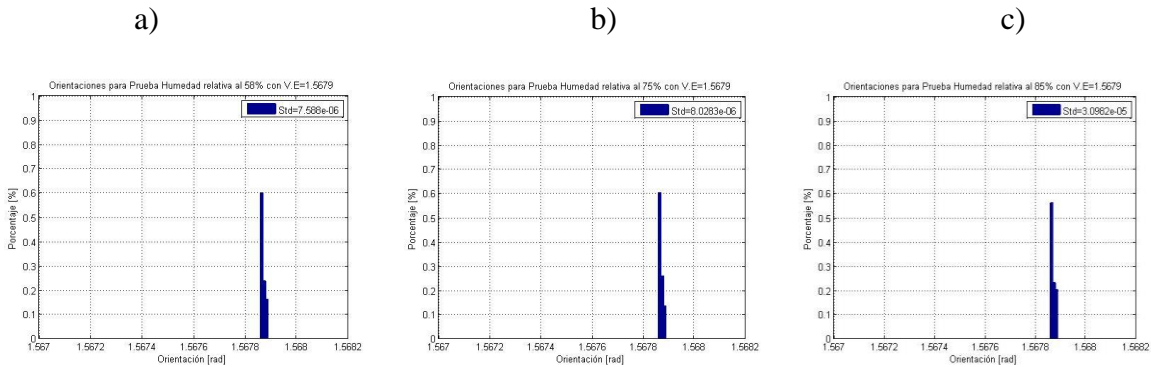


Figura 65. Distribución de orientación de las franjas, para pruebas de Humedad a) H.R. 58%, b) H.R. 75%, c) H.R. 80% y d) H.R. 85%

5.2.5 Condiciones Ambientales

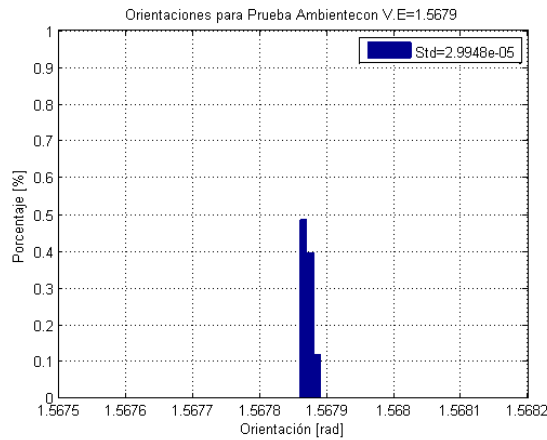


Figura 66. Distribución de orientación de las franjas, para prueba en condiciones ambientales.

De las distribuciones anteriores se puede resaltar el hecho que la orientación permanece casi invariante para los diferentes valores de temperatura, presión y humedad, en tanto que, para la velocidad de aire se destaca una desviación estándar superior cada vez que este parámetro aumenta

su magnitud. A continuación, se resumen los resultados de la orientación de las franjas para las pruebas en cuestión

Tabla 6.

Orientación de las franjas de las pruebas realizadas.

Parámetro	Valor	Valor esperado [rad]	Desviación estandar [rad]
Temperatura	31°C	1,5679	6,2630E-06
	36°C	1,5679	5,0418E-06
	49°C	1,5679	7,2376E-06
Rapidez de Aire	3,5 m/s	1,5678	1,6851E-05
	4,5 m/s	1,5678	8,6046E-05
	5,5 m/s	1,5678	8,0810E-05
	6,5 m/s	1,5676	2,3800E-04
Presión	15 PSI	1,5679	7,6040E-06
	20 PSI	1,5679	3,2454E-06
	25 PSI	1,5679	7,6198E-05
Humedad	58%	1,5679	7,5880E-06
	75%	1,5679	8,0283E-06
	85%	1,5679	3,0982E-05
Ambiente	-----	1,5679	2,9948E-05

5.3 Periodos de las franjas

5.3.1 Temperatura

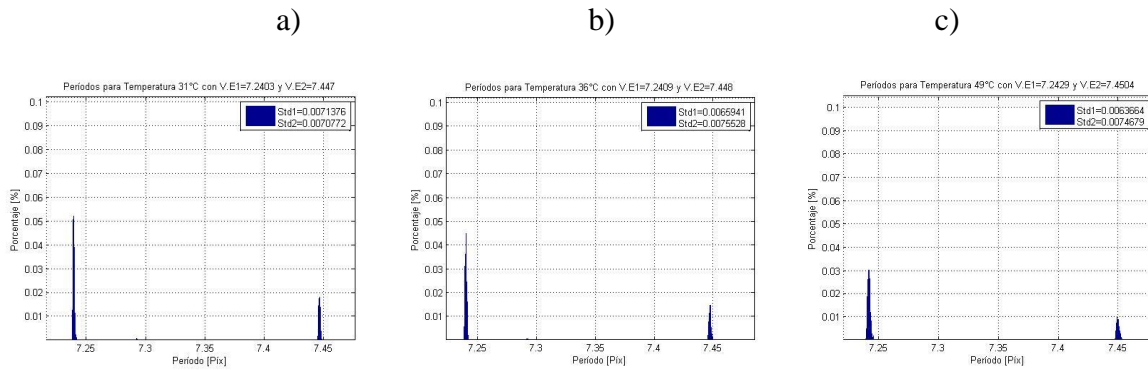
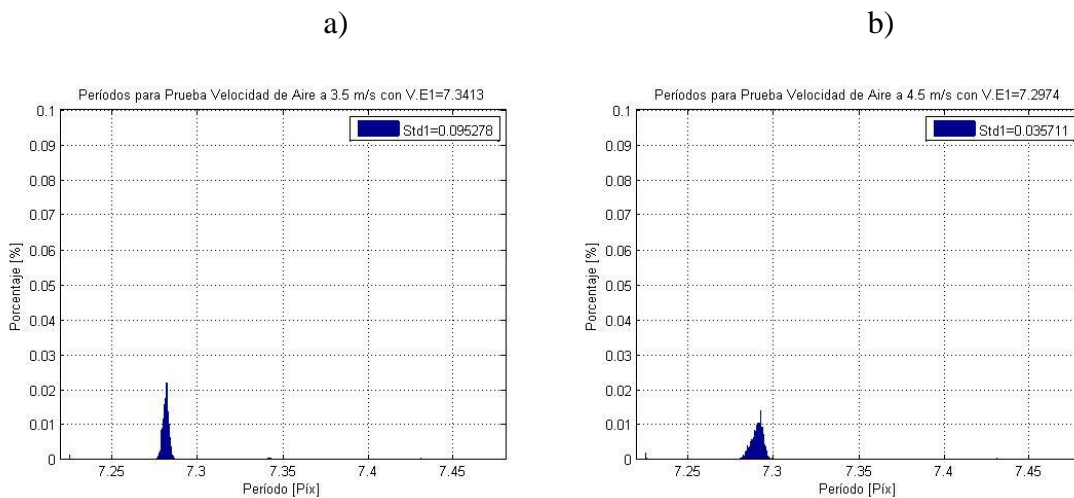


Figura 67. Periodos de las franjas para las tres pruebas de temperatura, a) temperatura a 31°C, b) temperatura a 35°C y c) temperatura a 49°C

5.3.2 Velocidad del aire



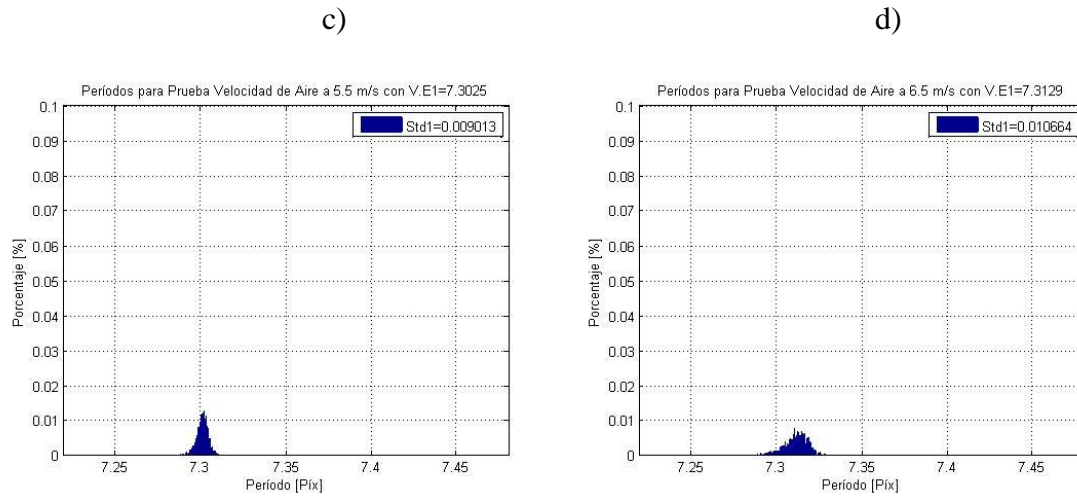


Figura 68. Periodos de las franjas para las pruebas con diferentes velocidades de aire: a) 3.5 m/s, b) 4.5 m/s, c) 5.5 m/s y d) 6.5 m/s

5.3.3 Presión

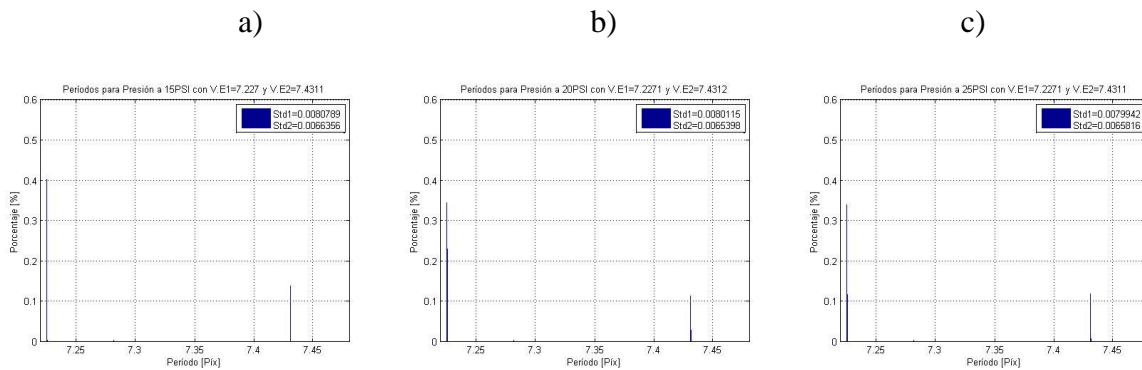


Figura 69. Periodos de las franjas para las pruebas con diferentes valores de presión: a) 15 PSI, b) 20 PSI y c) 25 PSI

5.3.4 Humedad Relativa

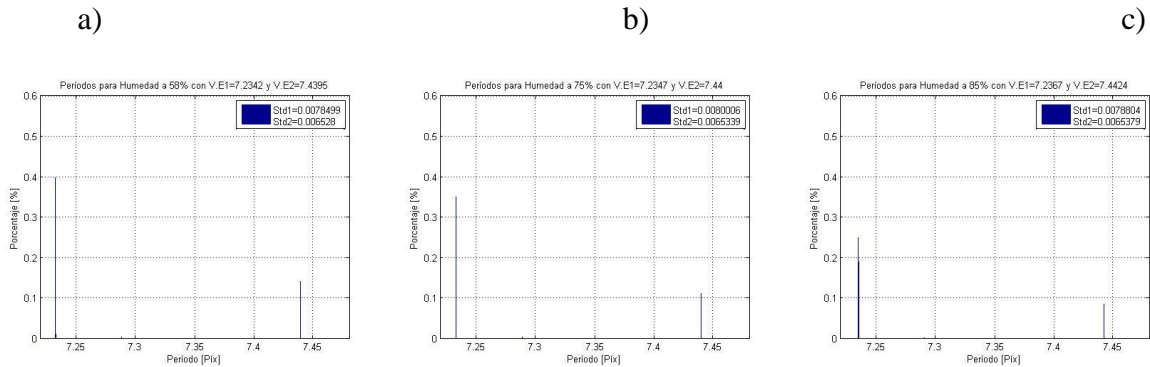


Figura 70. Periodos de las franjas para las pruebas con diferentes valores de H.R: a) 58%, b) 75%, c) 85%.

5.3.5 Condiciones ambientales

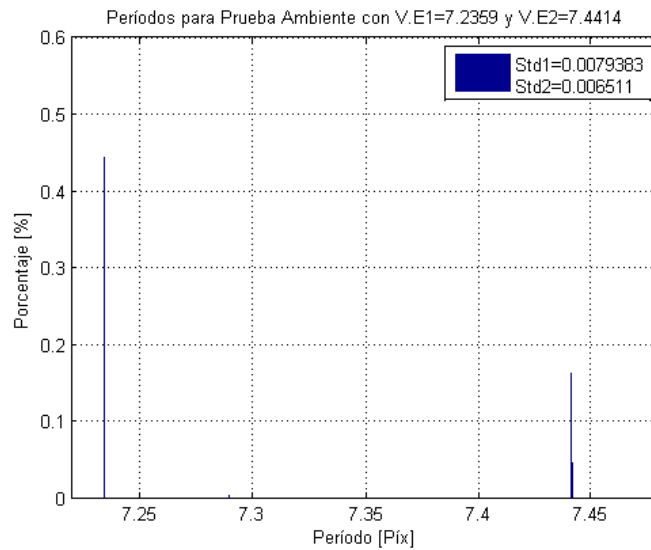


Figura 71. Periodos de las franjas para la prueba en condiciones ambientales

Los resultados obtenidos para el periodo espacial de las franjas sugieren que existe una representación bimodal de esta medida, excepto para la prueba de velocidad de aire, esto obedece

a que el movimiento de las franjas para esta prueba es mayor y el periodo de las franjas oscila alrededor de su valor medio, como se evidencia en la figura 68. A continuación, se resumen los resultados del período de las franjas para las pruebas en cuestión

Tabla 7.

Período de las franjas de las pruebas realizadas.

Parámetro	Valor	Valor esperado [píxeles]	Desviación estandar [píxeles]
Temperatura	31°C	7,2403	7,1376E-03
		7,4470	7,0772E-03
	36°C	7,2407	6,5941E-03
		7,4480	7,5528E-03
	49°C	7,2429	6,3664E-03
		7,4504	7,4679E-03
Rapidez de Aire	3,5 m/s	7,3413	9,5278E-02
	4,5 m/s	7,2974	3,5711E-02
	5,5 m/s	7,3025	9,0130E-03
	6,5 m/s	7,3129	1,0664E-02
Presión	15 PSI	7,2270	8,0789E-03
		7,4311	6,6356E-03
	20 PSI	7,2271	8,0115E-03
		7,4312	6,5398E-03
	25 PSI	7,2271	7,9942E-03
		7,4311	6,5816E-03
Humedad	58%	7,2342	7,8499E-03
		7,4395	6,5280E-03
	75%	7,2347	8,0006E-03
		7,4400	6,5339E-03
	85%	7,2367	7,8804E-03
		7,4424	6,5379E-03
Ambiente		7,2359	7,9383E-03
		7,4414	6,5110E-03

5.4 Paralelismo de las franjas

5.4.1 Pruebas de Temperatura

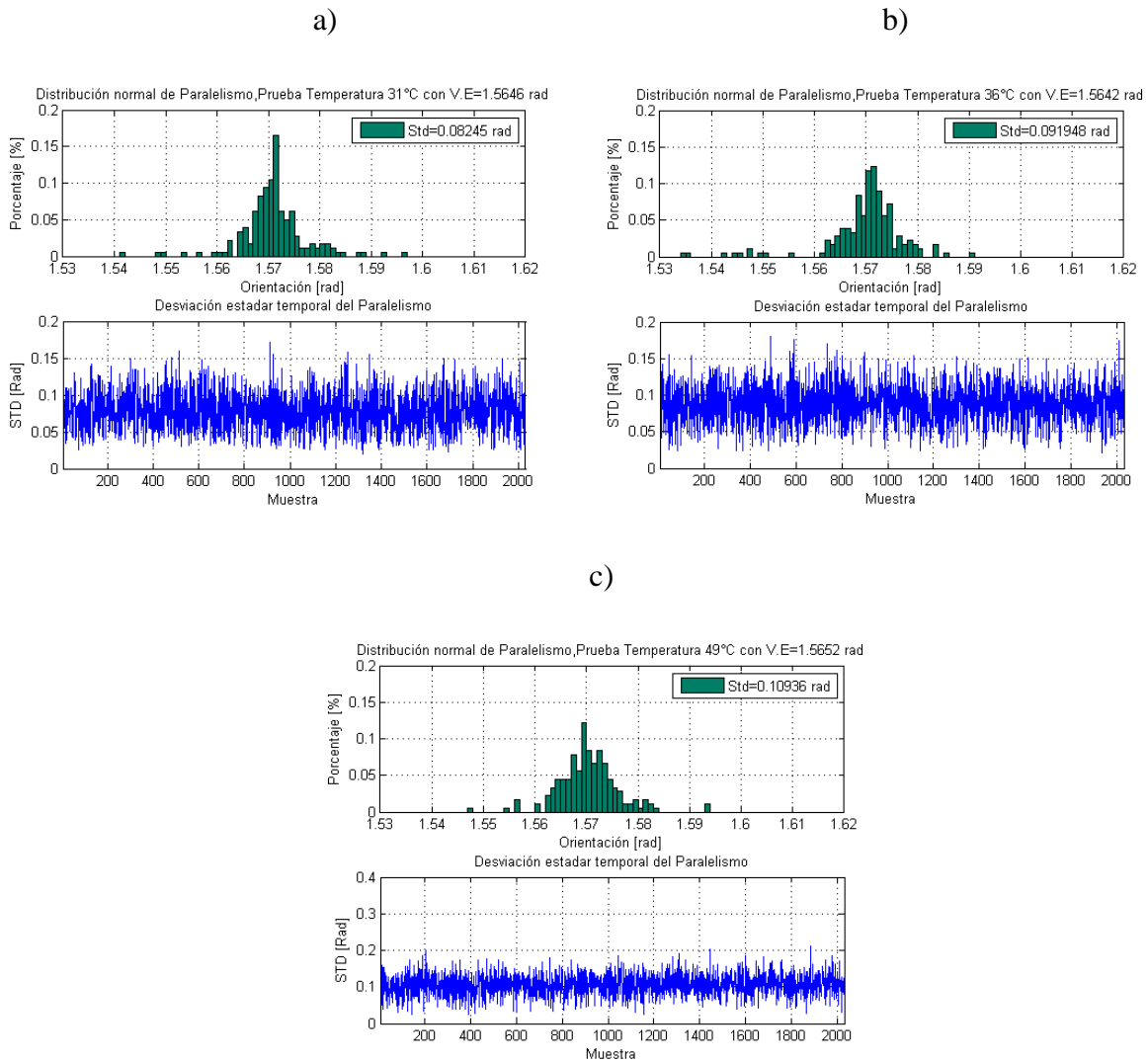


Figura 72. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de temperatura respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Temperatura de 31°C, b) Temperatura de 36°C y c) Temperatura de 49°C.

5.4.2 Pruebas de Velocidad del Aire

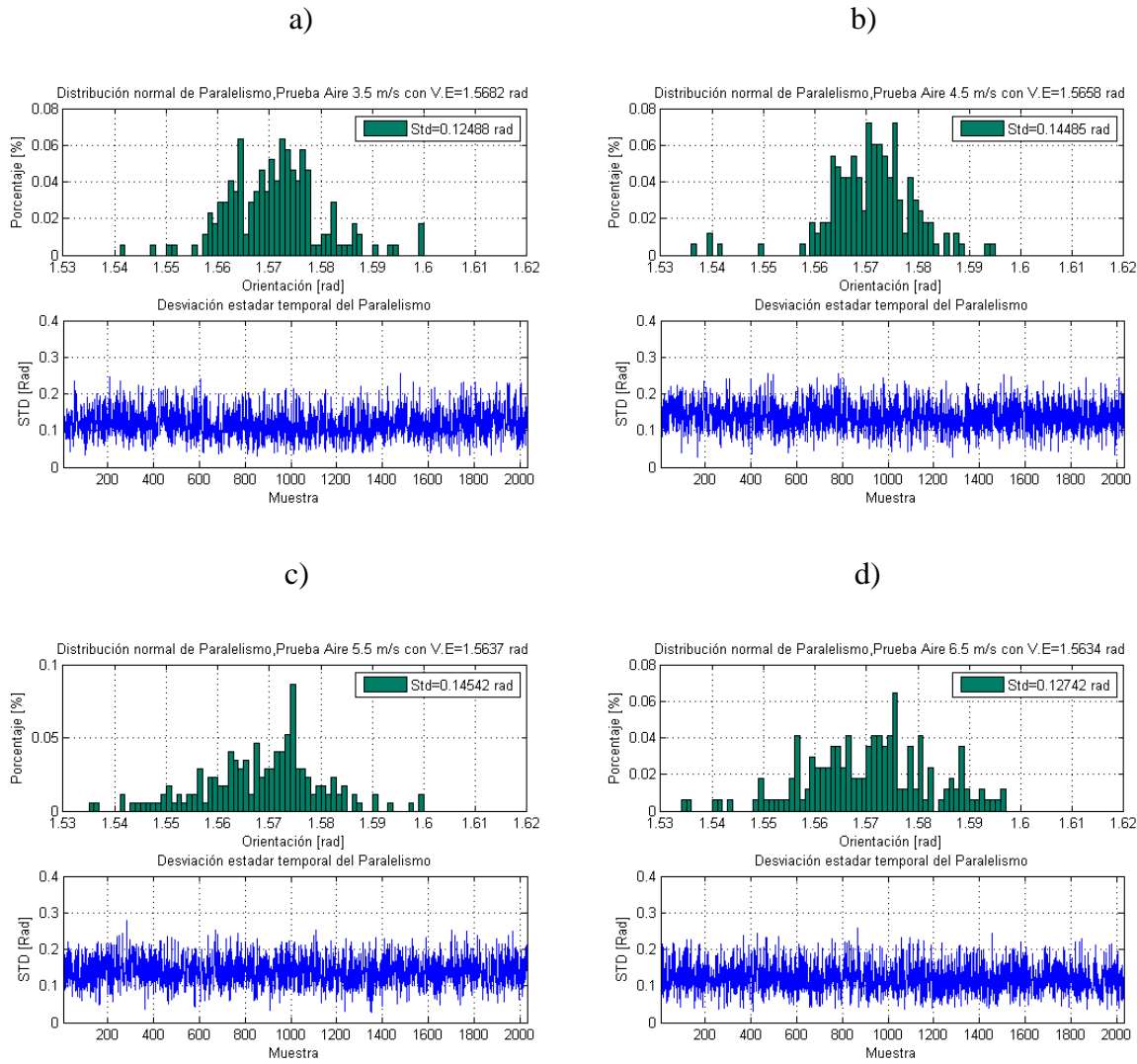


Figura 73. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de velocidad de aire respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Velocidad de 3.5 m/s, b) Velocidad de 4.5 m/s, c) Velocidad de 5.5 m/s y d) Velocidad de 6.5 m/s.

5.4.3 Pruebas de Presión

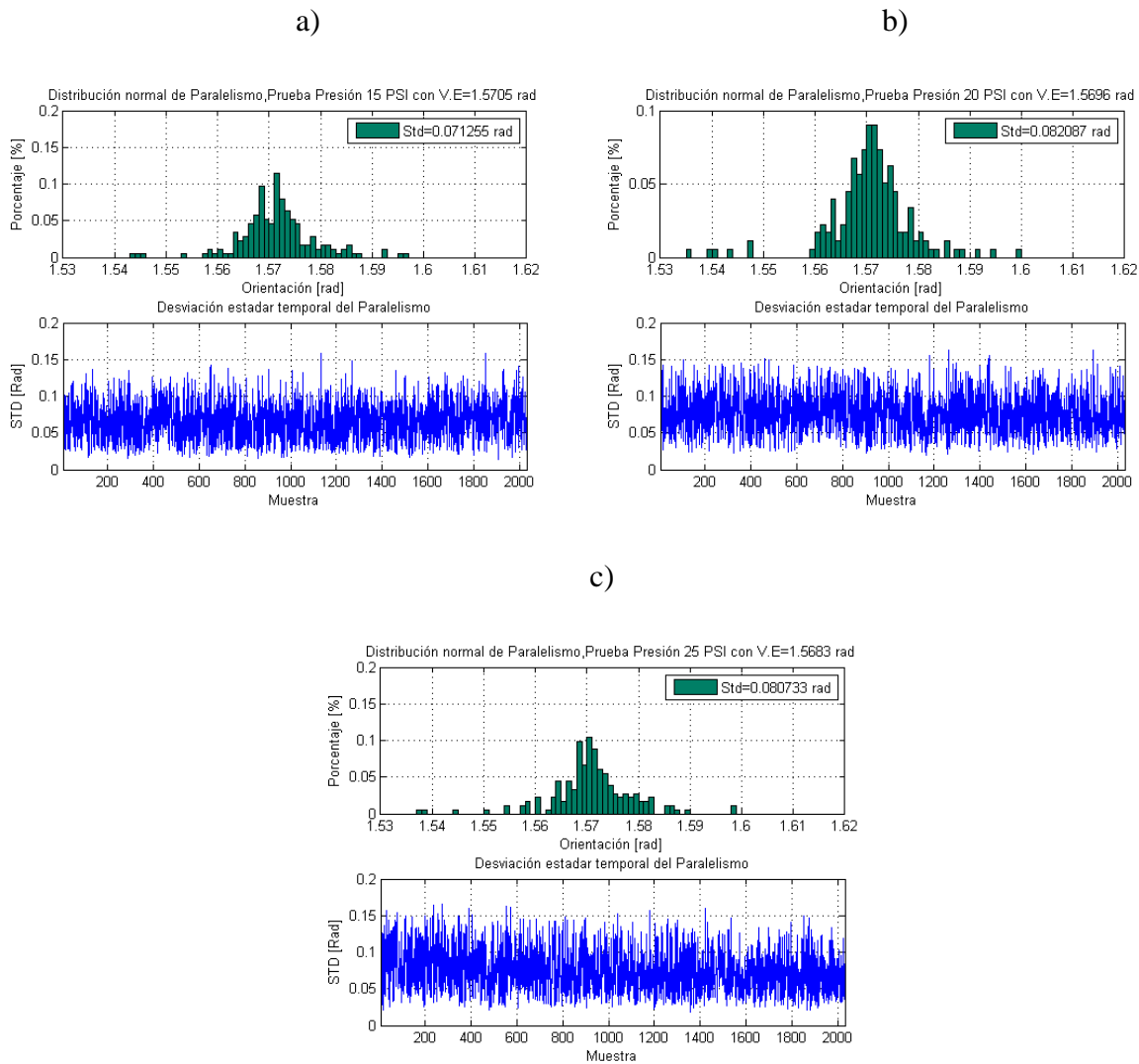


Figura 74. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de presión respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Presión de 15 PSI, b) Presión de 20 PSI y c) Presión de 25 PSI.

5.4.4 Pruebas Humedad Relativa

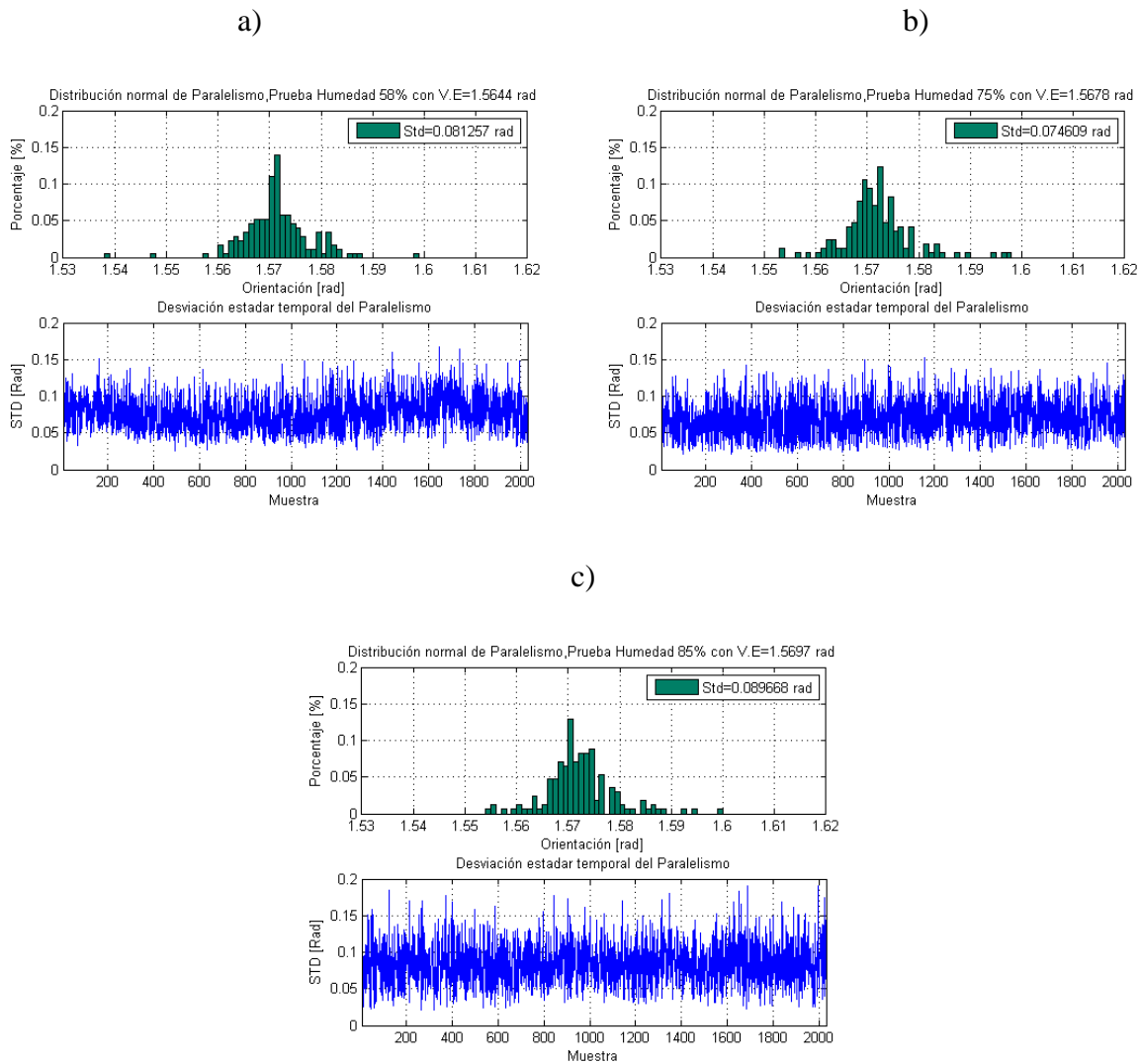


Figura 75. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas de Humedad relativa respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior) a) Humedad relativa de 58%, b) Humedad relativa de 75% y c) Humedad relativa de 85%

5.4.5 Condiciones ambientales

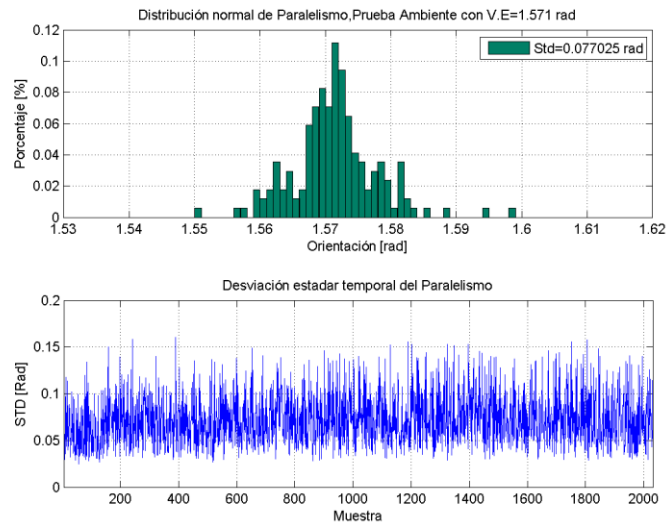


Figura 76. Distribución espacial del ángulo entre los vectores de las imágenes de las pruebas en condiciones ambientales respecto a un vector coplanar del plano interpolado (Superior) y evolución temporal de la desviación estándar de los ángulos para cada muestra (Inferior).

Los resultados obtenidos para el paralelismo de las franjas muestran que el parámetro que presenta mayor pérdida del paralelismo entre franjas es la rapidez de aire, en donde la desviación estándar es un orden mayor con respecto a las otras pruebas. A continuación, se resumen los resultados del paralelismo de las franjas para las pruebas en cuestión

Tabla 8.

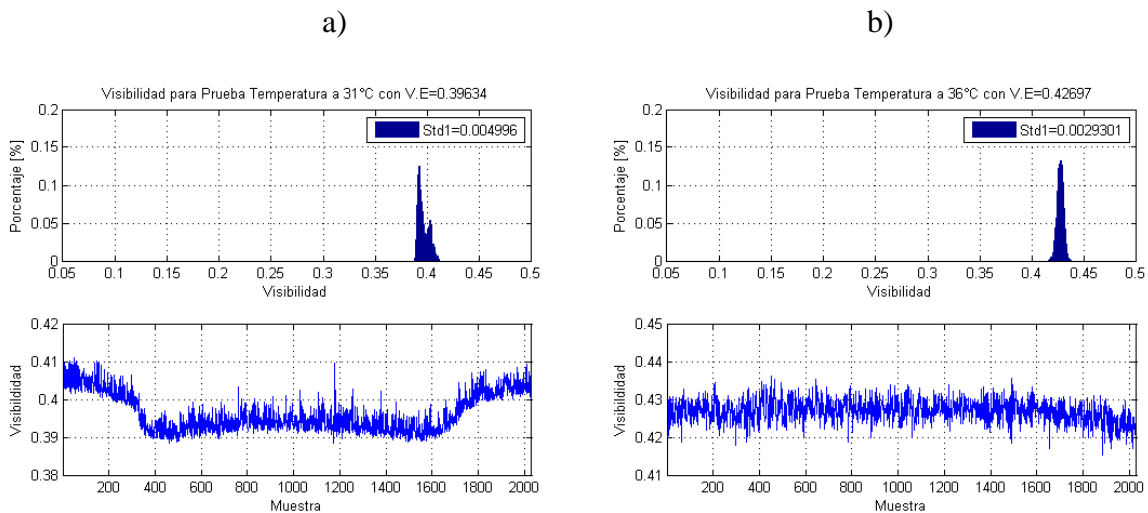
Resultados de los valores asociados al paralelismo de las franjas en las diferentes pruebas.

Parámetro	Valor	Valor esperado [rad]	Desviación estandar [rad]
Temperatura	31°C	1,5646	8,2450E-02
	36°C	1,5642	9,1948E-02
	49°C	1,5652	1,0936E-01

Parámetro	Valor	Valor esperado [rad]	Desviación estandar [rad]
Rapidez de Aire	3,5 m/s	1,5682	1,2488E-01
	4,5 m/s	1,5658	1,4485E-01
	5,5 m/s	1,5637	1,4542E-01
	6,5 m/s	1,5634	1,2742E-01
Presión	15 PSI	1,5705	7,1255E-02
	20 PSI	1,5696	8,2087E-02
	25 PSI	1,5683	8,0733E-02
Humedad	58%	1,5644	8,1257E-02
	75%	1,5678	7,4609E-02
	85%	1,5697	8,9668E-02
Ambiente	-----	1,5679	7,7025E-02

5.5 Visibilidad

5.5.1 Pruebas de Temperatura



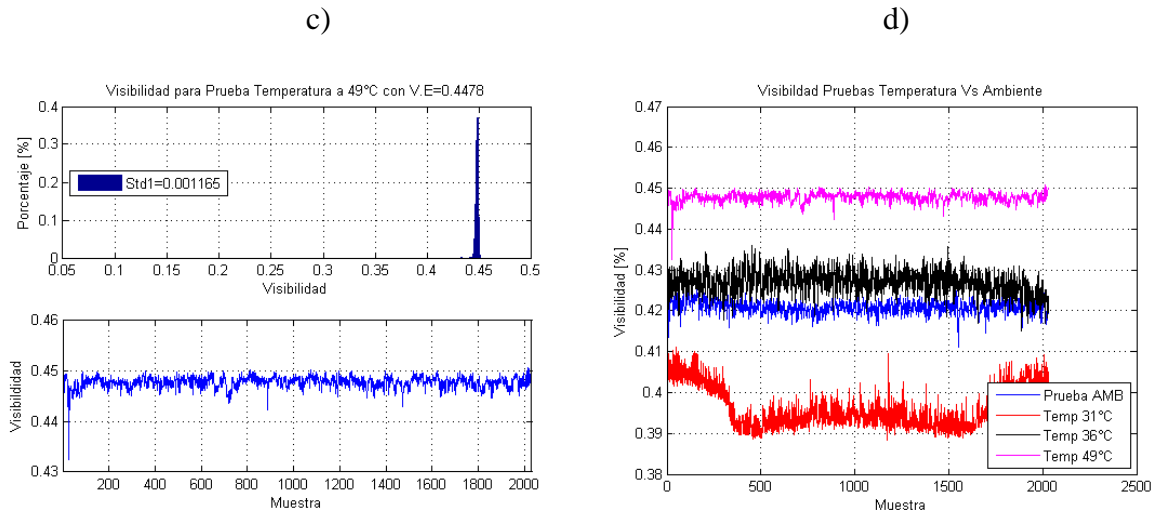


Figura 77. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Temperatura, a) Visibilidad para Temperatura de 31°C, b) Visibilidad para Temperatura de 35°C, c) Visibilidad para Temperatura de 49°C y d) Visibilidad para todas las pruebas de temperatura.

Se observó que cuando la temperatura al interior del turbulador disminuía, también lo hacía la visibilidad del patrón de franjas, es de aclarar que las pruebas de temperatura se realizaron tomando como primer valor, la temperatura más alta (49°C) y se fue disminuyendo la tensión en el reóstato hasta que esta se estableció en el valor de 31°C, en esta última prueba se observa que la medida registrada por el sensor CMOS, fue defectuosa, es posible que en el laboratorio ocurrió un ingreso de luz dirigida hacia el sensor CMOS y no hacia el medidor de potencia; esto se constata más adelante cuando se verifique la medida de intensidad reportada en el medidor de potencia, luego para caracterizar la turbulencia de esta prueba se optó por utilizar los valores de intensidad registrados en el medidor de potencia, en tanto se sugiere no centrar su atención en el resultado de visibilidad para la prueba de temperatura a 31°C.

5.5.2 Prueba de Velocidad de Aire

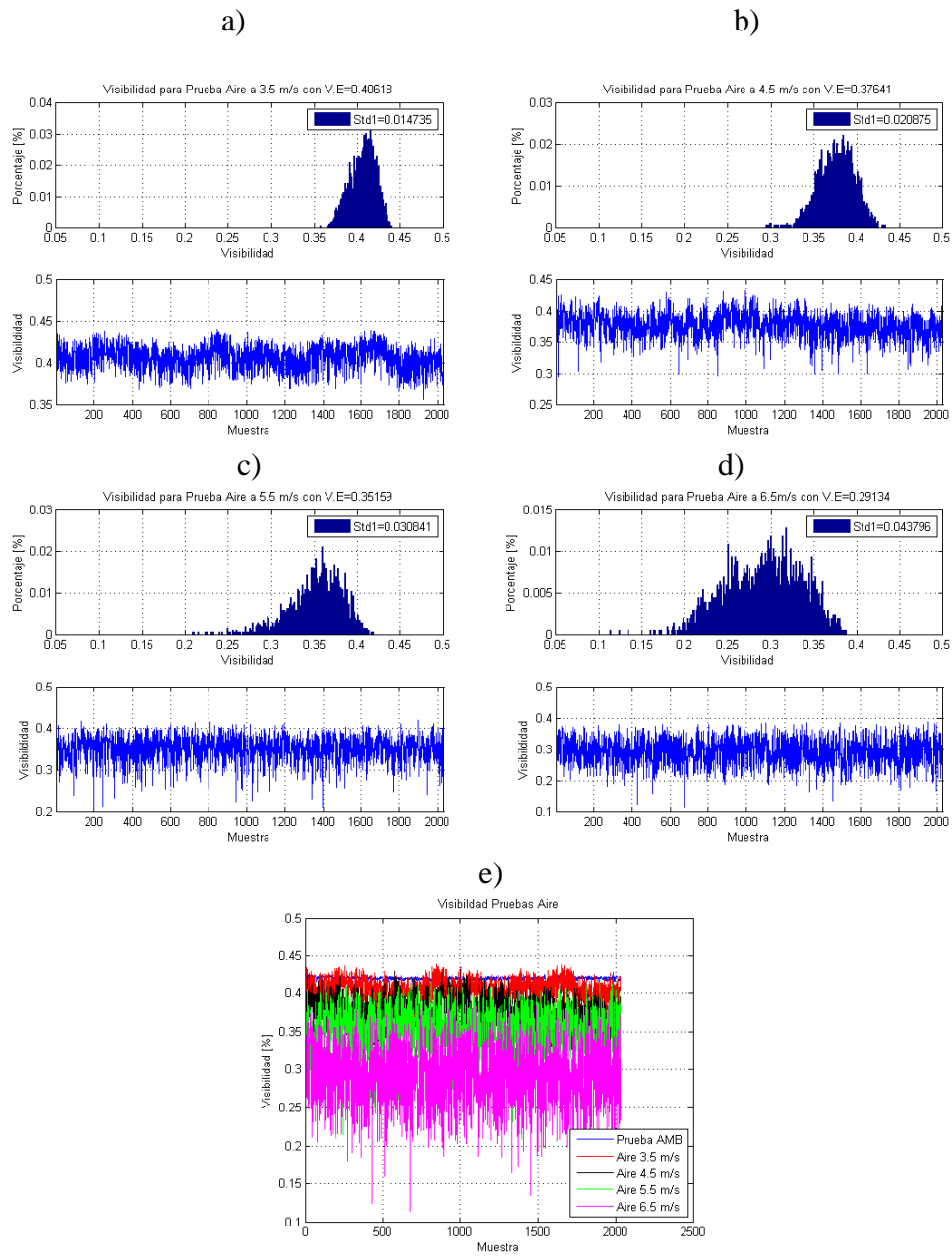


Figura 78. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Velocidad de Aire. a) Visibilidad para velocidad de aire a 3.5 m/s, b) Visibilidad para velocidad de aire a 4.5 m/s, c) Visibilidad para velocidad de aire a 5.5 m/s, d) Visibilidad para velocidad de aire a 6.5 m/s y e) Visibilidad para todas las pruebas de velocidad de aire.

En esta prueba se aprecian más claramente los efectos que tiene el parámetro velocidad de aire en las franjas de interferencia, se observa que cuando la velocidad de aire aumenta, la visibilidad de las franjas disminuye en gran medida, es así, que para una velocidad superior a 6.5 m/s se pierden completamente las franjas y, por tanto, la información que estas portan.

5.5.3 Prueba de Presión

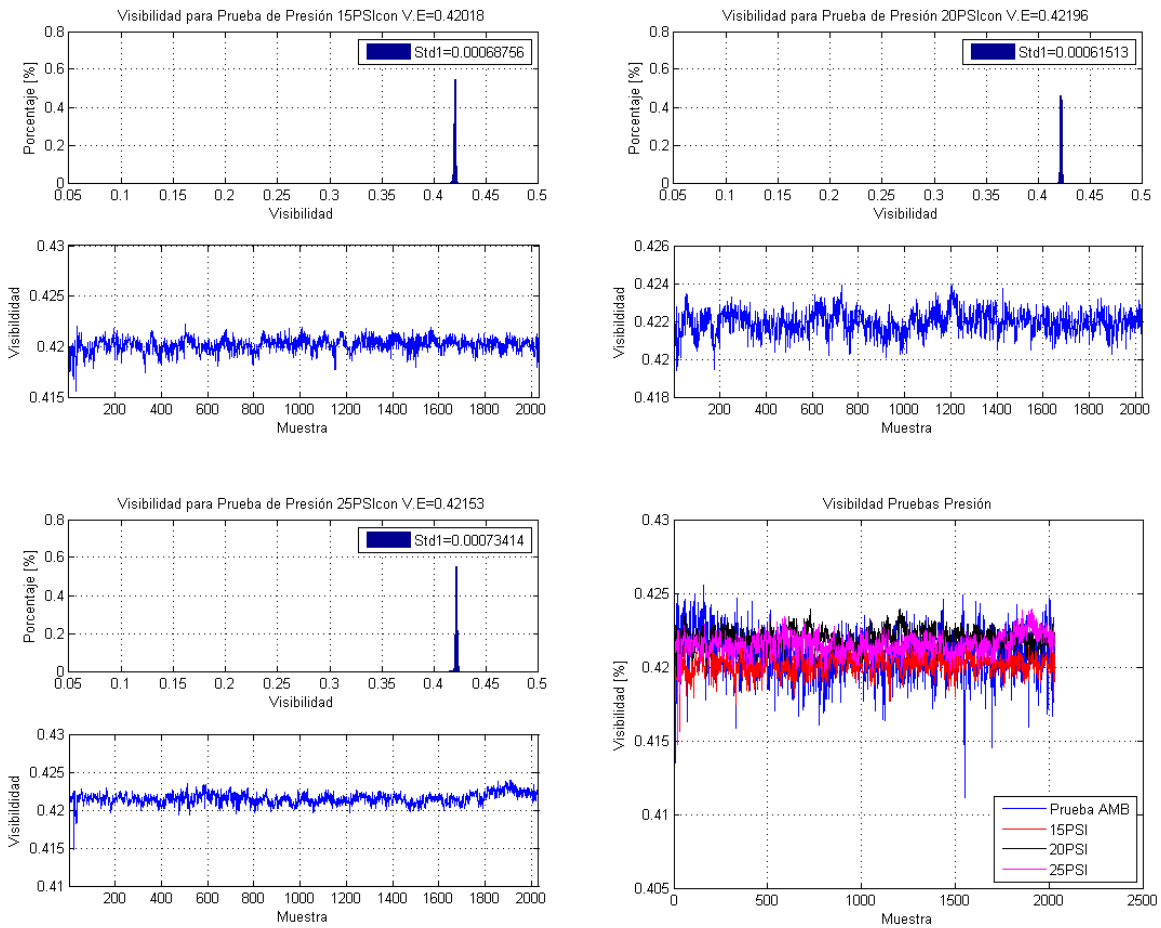


Figura 79. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Presión

Los efectos de la presión no cambian en gran medida la visibilidad de las franjas, esto se puede constatar en los resultados que se muestran en la figura 79, en donde se muestra la visibilidad obtenida para cada valor de presión establecido en los diferentes experimentos.

5.5.4 Prueba Humedad

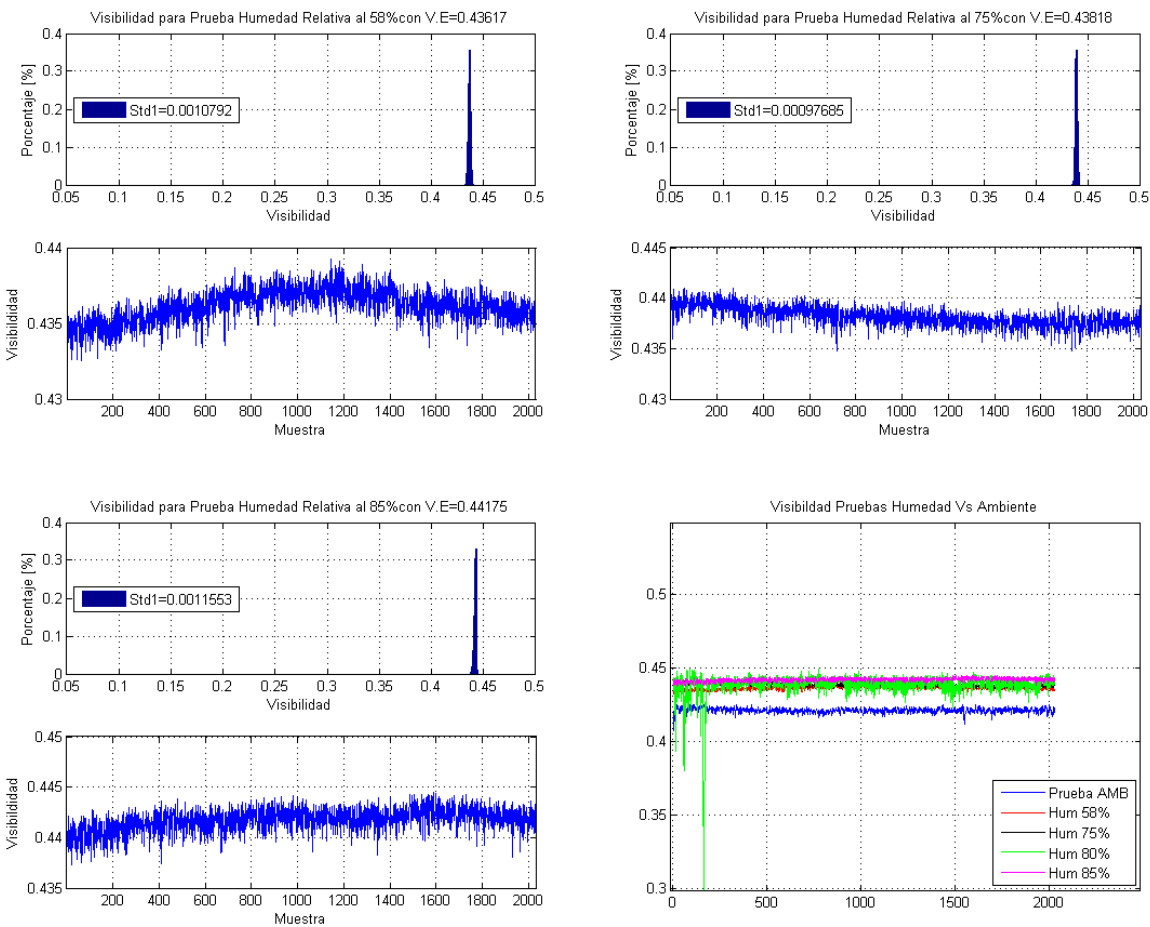


Figura 80. Visibilidad de las franjas de interferencia de Young para las pruebas de Humedad.

Similar al caso de las pruebas de presión, la humedad relativa presente en la atmósfera no modifica la visibilidad de las franjas, para realizar las pruebas de humedad relativa se requirió

elevant la temperatura de un volumen de agua, este cambio en la temperatura evidencia lo expuesto anteriormente, en donde se observó que para valores de temperatura mayor en el interior del turbulador, se tenían valores de visibilidad mayor, en tanto que, analizando la figura 80 se puede apreciar un gradiente entre los diferentes valores de humedad.

5.6 Estudio de la turbulencia

Dado que tratamos con efectos aleatorios es necesaria la implementación de ciertas definiciones y herramientas de estadística de conjuntos o ensambles, estas definiciones fueron definidas en el capítulo 0. A continuación, se presenta el análisis de las variables asociadas a la turbulencia atmosférica como lo son: hipótesis de Taylor en laboratorio, el centelleo y la constante de estructura de índice de refracción.

5.6.1 Hipótesis de Taylor Con el objeto de verificar la hipótesis de atmosfera congelada o hipótesis de Taylor a escala de laboratorio, se realizó una prueba que consistió en adquirir 3001 imágenes de dimensión 256x260 pixeles, como la de la figura 81, a una tasa de 214,35 fps, esto es, con período de muestreo de 4.6 ms, de esta manera se garantizó que las condiciones entre imágenes sucesivas eran similares.

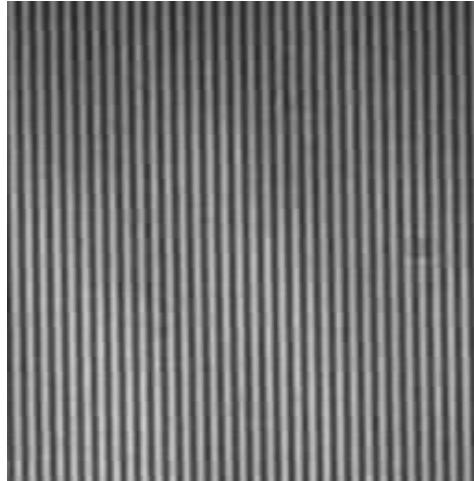


Figura 81. Imagen para la prueba de atmósfera congelada.

Se optó por analizar el paralelismo de las franjas y la desviación estándar del paralelismo de manera similar que, en las anteriores pruebas, el resultado se puede observar en la figura 82.

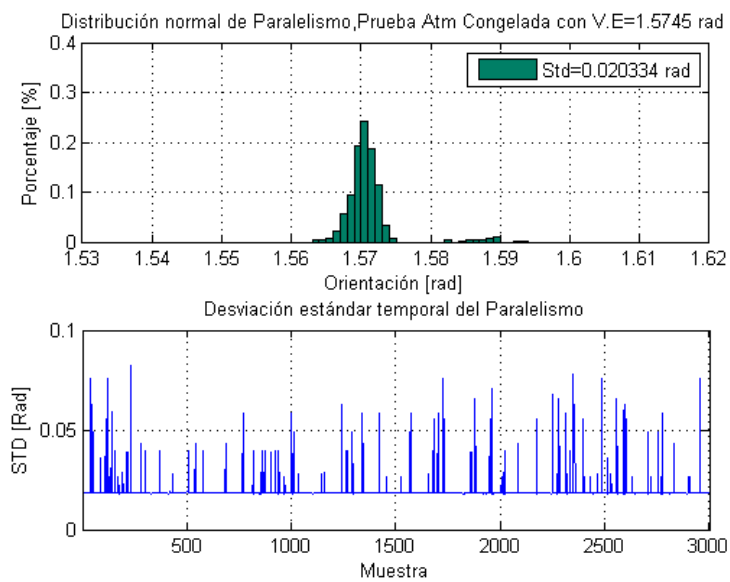


Figura 82. Paralelismo y desviación estándar del Paralelismo de las franjas de atmósfera congelada.

En la parte baja de la figura 82 se puede observar que entre intervalos de muestras la desviación estándar permanece constante, esto indica que en este tiempo la atmósfera no ha realizado cambios apreciables y las muestras entre estos intervalos son dependientes.

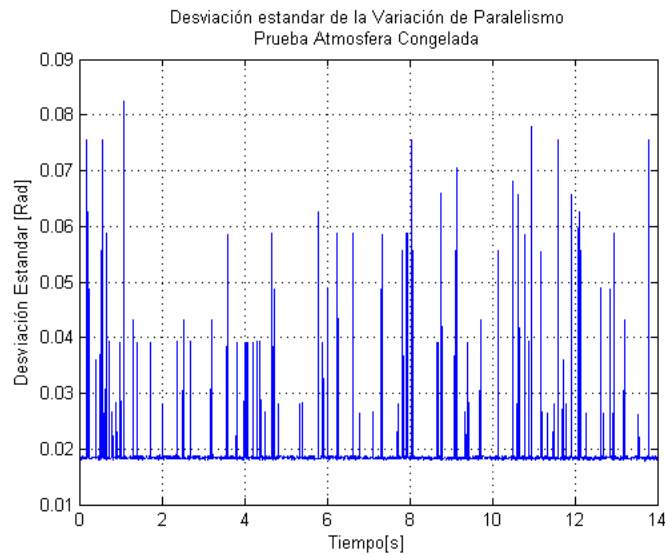


Figura 83. Desviación estándar temporal de la prueba de atmósfera congelada

En la figura 83 se muestra la desviación estándar en la escala temporal, los picos evidencian un cambio en el frente de onda espacial del patrón de franjas, por tanto, se analizó estadísticamente el tiempo entre picos, buscando encontrar el tiempo promedio de cambio del frente de onda.

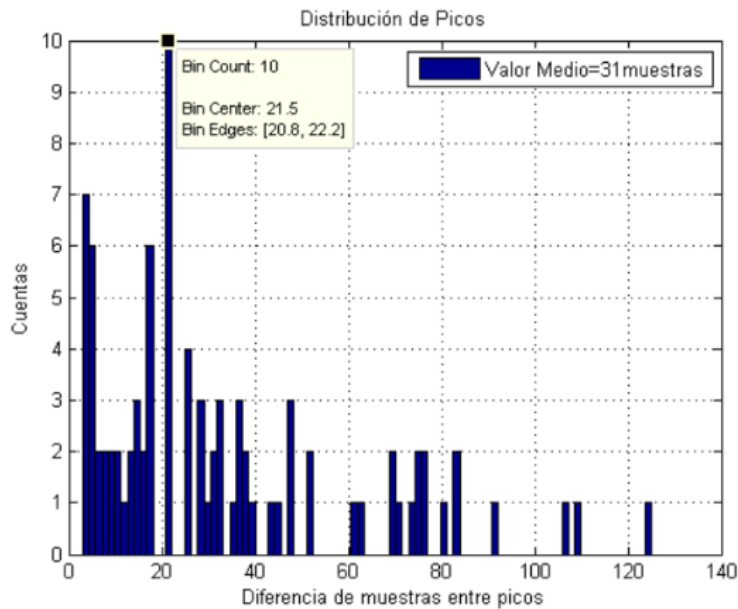


Figura 84. Distribución de las muestras entre picos

La figura 84 representa la distribución de picos entre muestras, se observa que la distancia entre muestras promedio es de 31 muestras esto equivale a 144,6 milisegundos, entendiendo así, este valor con el tiempo de atmosfera congelada en laboratorio, el valor más frecuente de cambios en la atmosfera (la moda) ocurrió entre 21 muestras, lo que equivale a un tiempo de **97,9 milisegundos**.

5.6.2 Centelleo Los valores de intensidad determinada por la cámara CMOS se encuentran en una escala de 1 a 255 niveles de gris y las imágenes fueron adquiridas a una tasa de muestreo de 74 ms, es por esto, que para las medidas del centelleo de las diferentes pruebas (cuadrado normalizado de las fluctuaciones de intensidad), se registró el valor de la potencia por unidad de área con el medidor de la figura 17, dispuesto como en el esquema experimental mostrado en la figura 32, Estos valores corresponden con gran aproximación a la intensidad real registrada en la

cámara CMOS, para verificar esto, se llevó a cabo la correlación de las dos medidas las cuales mostraron ser altamente correlacionadas:

```
>> l=corr(Icp1', Ir_A)

l =

    0.979036081123881
```

Tabla 9.

Correlación entre los valores registrados en el sensor CMOS y en el medidor de potencia.

Parametro	Valor	Coefficiente de correlación
Temperatura	31°C	0.07
	36°C	0.98
	49°C	1.00
Rapidez de Aire	3,5 m/s	0.65
	4,5 m/s	0.99
	5,5 m/s	0.86
	6,5 m/s	0.95
Presión	15 PSI	0.97
	20 PSI	0.99
	25 PSI	0.86
Humedad	58%	0.94
	75%	0.84
	85%	0.90

Lograr una sincronía entre el medidor de potencia con la tasa de muestreo de la cámara fue un aspecto que en el momento de la experimentación se omitió, por esta razón fue necesario hacer un remuestreo de los datos adquiridos por el medidor de potencia a la frecuencia de muestreo del sensor CMOS. Se ajustaron los valores de intensidad registrados en el medidor por medio de

interpolación, cambiando la tasa de muestreo a la tasa de muestreo de la cámara, en la figura 85 se puede observar la interpolación y posterior remuestreo de los datos en el medidor de potencia.

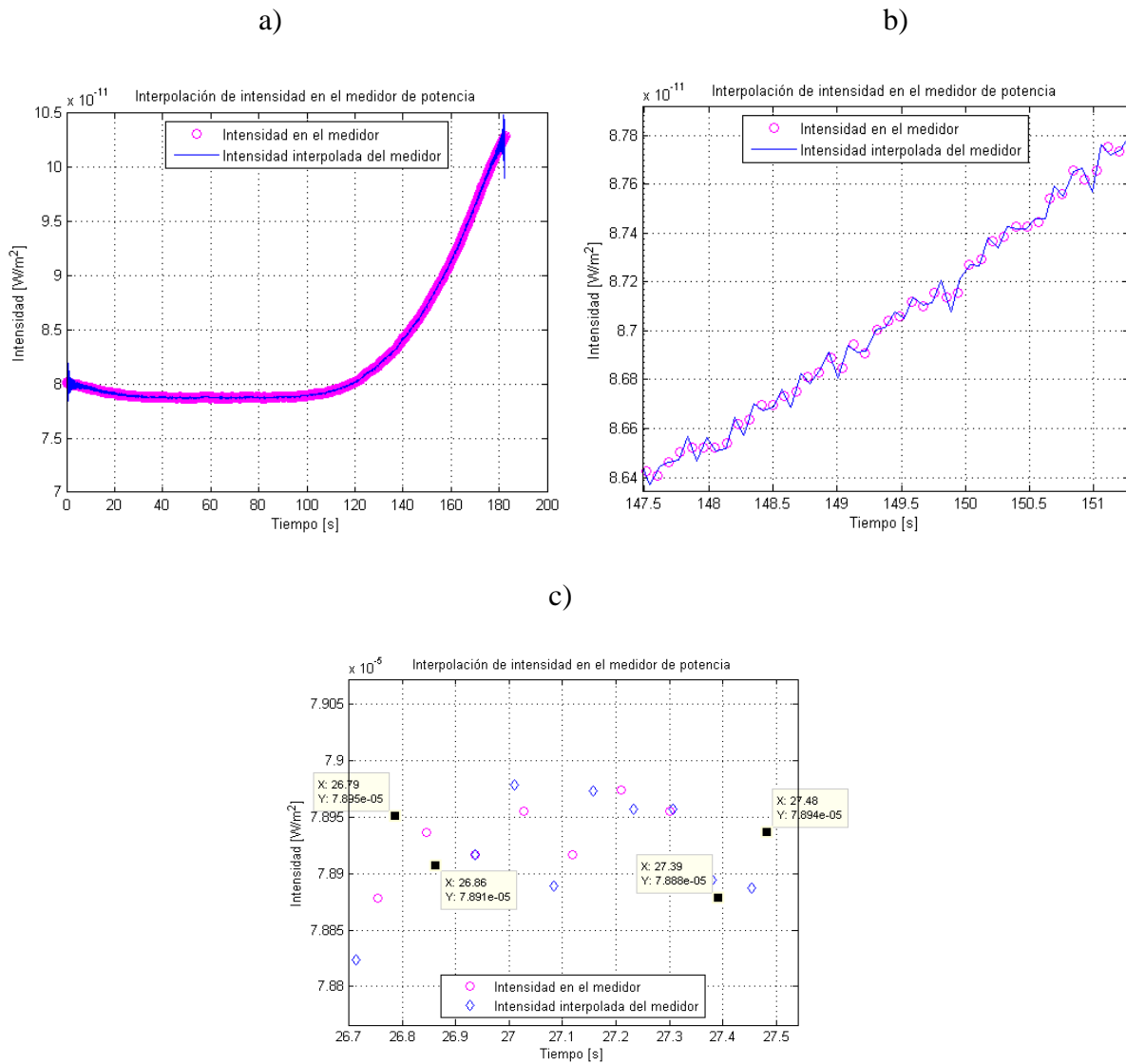


Figura 85. Ejemplo de (a) interpolación y submuestreo realizado a la medida de la intensidad registrada en el medidor de potencia para la prueba de temperatura a $36^{\circ}C$, (b) ampliación de una zona de la figura para observar la interpolación, y (c) evidencia del submuestreo

Ya con los datos optimizados por medio de la interpolación y remuestreo, a continuación, se determinó el centelleo asociado a las diferentes condiciones dispuestas en los experimentos, para lo cual se hizo uso de la expresión (15) utilizando ventanas de tiempo con un número de 10 muestras. A manera de ejemplo se muestra el resultado obtenido para la prueba de temperatura a 36°C, y posteriormente se tabulan en la tabla 10 los resultados obtenidos de la misma forma para la totalidad de las pruebas realizadas.

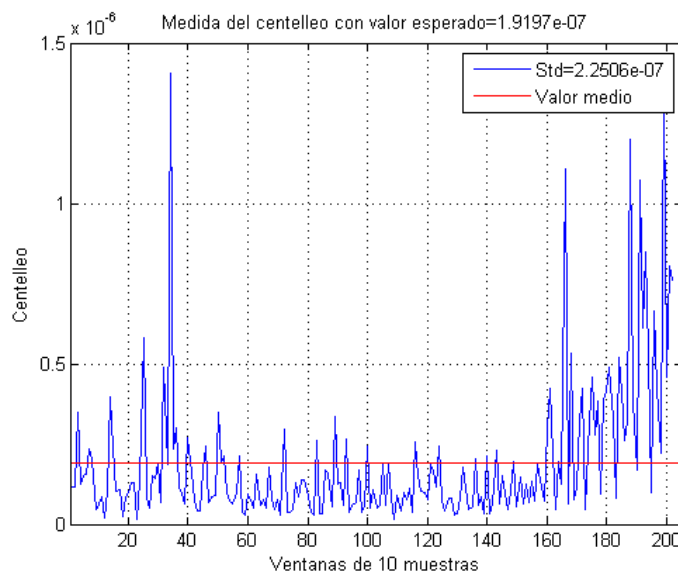


Figura 86. Centelleo para la prueba de temperatura a 36°C

Tabla 10.

Valores de centelleo para las pruebas realizadas.

Parametro	Valor	Valor esperado	Desviación estandar
Temperatura	31°C	2.4972E-07	3.1019E-07
	36°C	1.9197E-07	2.2506E-07
	49°C	3.2337E-07	3.8884E-07
Rapidez de Aire	3,5 m/s	6.5758E-06	6.1167E-06
	4,5 m/s	2.0259E-05	4.0645E-05

Parametro	Valor	Valor esperado	Desviación estandar
	5,5 m/s	3.3311E-05	2.2731E-05
	6,5 m/s	5.5666E-05	2.7181E-05
Presión	15 PSI	7.0771E-08	5.4687E-08
	20 PSI	7.3337E-08	6.2759E-08
	25 PSI	5.9925E-08	3.9146E-08
Humedad	58%	2.1136E-07	1.7516E-07
	75%	1.2343E-07	8.3987E-08
	85%	1.0327E-07	1.5668E-07
Ambiente	--	7.5771E-08	4.6870E-09

En la tabla 10 se observa que el centelleo presenta valores más grandes para la prueba de rapidez de aire, en donde tenemos valores del orden de 10^{-5} .

5.6.3 Constante de Estructura del índice de refracción A partir de los datos de centelleo y utilizando el método de varianza de Rytov (19), se determina la constante de estructura del índice de refracción la cual caracteriza la fuerza de la turbulencia, a manera de ejemplo se muestra en la figura 87 el resultado de una de las pruebas realizadas y los demás resultados se tabulan en la tabla 11.

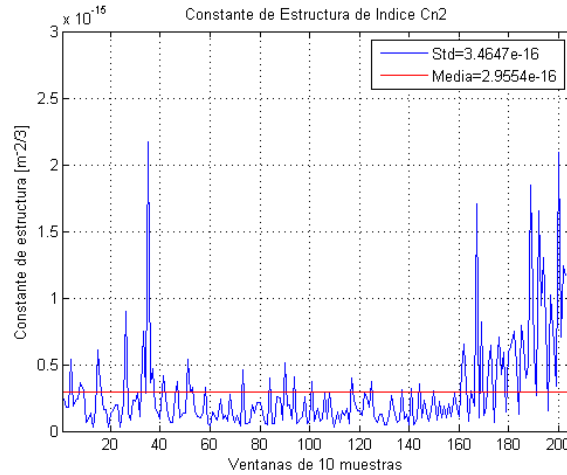


Figura 87. Constante de estructura de índice de refracción para la prueba de temperatura a 36°C.

Este resultado muestra que la turbulencia asociada a la prueba de temperatura de 36°C corresponde a una turbulencia débil, verificado en la literatura por estar caracterizada por una constante de estructura del orden de $10^{-16}m^{-2/3}$ y un índice de centelleo de 10^{-5} .

Tabla 11.

Constante de estructura del índice de refracción.

Constante de estructura del índice de refracción			
Parametro	Valor	Valor esperado [m ^{-2/3}]	Desviación estandar [m ^{-2/3}]
Temperatura	31°C	3.8444E-16	4.7753E-16
	36°C	2.9554E-16	3.4647E-16
	49°C	4.9783E-16	5.9861E-16
Rapidez de Aire	3,5 m/s	1.0123E-14	9.4167E-15
	4,5 m/s	3.1189E-14	6.2572E-14
	5,5 m/s	5.1282E-14	3.4994E-14
	6,5 m/s	8.5698E-14	4.1845E-14
Presión	15 PSI	1.0895E-16	8.4190E-17
	20 PSI	1.1290E-16	9.6617E-17

Constante de estructura del índice de refracción

Parametro	Valor	Valor esperado [$m^{-2/3}$]	Desviación estandar [$m^{-2/3}$]
	25 PSI	9.2254E-17	6.0265E-17
Humedad	58%	3.2538E-16	2.6966E-16
	75%	1.9002E-16	1.2930E-16
	85%	1.5898E-16	2.4122E-16
Ambiente	--	1.7442E-16	1.1753E-16

Los resultados de la tabla 11, permiten comparar la fuerza de la turbulencia en cada prueba, los valores muestran que para el caso de la rapidez de aire se tiene un grado de turbulencia mucho mayor que para las demás pruebas.

6. Conclusiones

- El presente trabajo de maestría presenta una nueva propuesta para medir experimentalmente los parámetros utilizados comúnmente en la caracterización de la turbulencia atmosférica a ras del piso y horizontalmente. En particular, aplicada al caso de su evaluación a escala de laboratorio.
- Actualmente se conducen experimentos con esta nueva propuesta metodológica esta vez a escala de campo abierto, con algunos resultados ya obtenidos o en proceso de evaluación muy prometedores, mostrando su validez y utilidad.

- Se caracterizaron los parámetros de la turbulencia atmosférica horizontal a baja altura y a escala de laboratorio, utilizando Telescopía de Fourier de tiempo promedio, mediante el análisis de la fase de las franjas obtenidas utilizando un interferómetro de Young.
- Se construyó un dispositivo electromecánico, llamado Turbulador, capaz de recrear las condiciones de la turbulencia atmosférica para desarrollar un estudio detallado a baja altura. Dicho dispositivo se instaló en uno de los brazos del interferómetro de Young. Se incluyeron cuatro variables físicas: Presión, Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire que pueden ser medidas con todo el detalle y la resolución requerida. Normalmente una de las variables se modifica controladamente en el turbulador, mientras que las demás son medidas simultáneamente.
- Se implementaron todos los algoritmos necesarios en Matlab™ para determinar los diferentes parámetros presentes en la turbulencia atmosférica a partir de las imágenes en intensidad de las franjas adquiridas en el plano de interferencia.
- Se caracterizaron las modificaciones del frente de onda a partir de la adquisición sincronizada de las variables físicas, por medio de sensores electrónicos dispuestos adecuadamente y basados en estudios previos, al interior del turbulador con el procesamiento de imágenes interferométricas en intensidad. Dichas modificaciones fueron abordadas estudiando el frente de onda del haz propagado a través de la turbulencia.
- Se realizaron mediciones a los valores de los parámetros de la turbulencia, dentro del sistema turbulador implementado a escala de laboratorio. Las variables físicas involucradas fueron medidas utilizando dispositivos electrónicos debidamente calibrados. Los parámetros obtenidos para la turbulencia atmosférica fueron comparados con los resultados reportados hasta el momento en la literatura.

- Es de esperar que la caracterización de la turbulencia atmosférica conduzca a facilitar la aplicación de técnicas a la formación de imágenes de alta resolución más allá del límite clásico por difracción, ya sea mediante la Telescopía de Fourier o no, también para optimizar los canales de comunicación en el espacio libre con el fin de aumentar la cadencia de información o bien aumentar la seguridad al atacar el canal, entre otras aplicaciones.
- Los resultados experimentales evidenciaron que es posible la generación de turbulencia fuerte en el laboratorio, se observó que la prueba que arrojó un orden de turbulencia mayor ($C_n^2 \sim 10^{-14}$), fue la prueba con diferentes valores de rapidez del aire.
- Se pudo comprobar la hipótesis de Taylor de atmósfera congelada en laboratorio, el cual fue equivalente a 97,9 milisegundos, este resultado es muy similar al reportado en la literatura, algunos autores han reportado valores de 100 milisegundos para este tiempo.

Referencias Bibliográficas

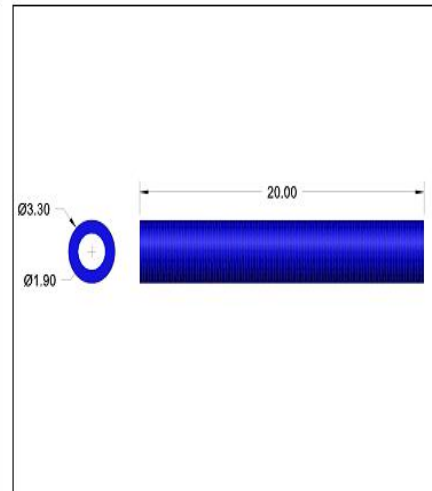
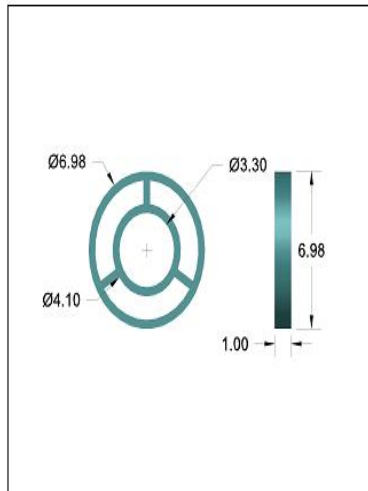
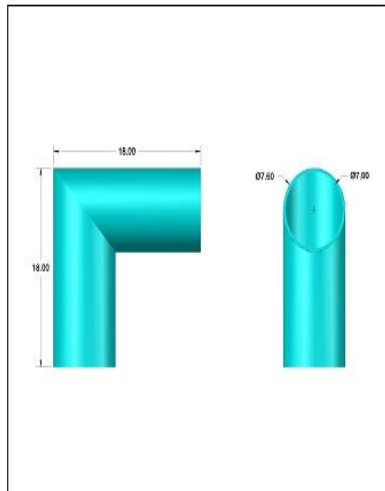
- Been, M., Hughes, K., C, T. B., & Oldenettel, J. (2002). Effect of turbulence on downlink and horizontal path on high-order coherence moments in Fourier telescoping system, *4821(505)*, 62–73. Conference Paper in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.450636>
- Canales, V. F. (2010). Formación de imágenes en óptica adaptativa. In *Formación de imágenes en óptica adaptativa* (pp. 17–23).
- Consortini, A., Sun, Y. Y., Innocenti, C., & Li, Z. P. (2003). Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation. *Optics Communications*, *216(1–3)*, 19–23. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02294-0](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02294-0)
- Contreras, J. (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*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.
- DiComo, G., Helle, M., Peñano, J., Ting, A., Schmitt-Sody, A., & Elle, J. (2016). Implementation of a long range, distributed-volume, continuously variable turbulence generator. *Applied Optics*, *55(19)*, 5192. <https://doi.org/10.1364/AO.55.005192>
- Feldkhun, D., & Wagner, K. H. (2010). Doppler encoded excitation pattern tomographic optical microscopy. *Applied Optics*, *49(34)*, H47. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000H47>
- Fried, D. L., & CLOUD, J. D. (1966). Propagation of an Infinite Plane Wave in a Randomly Inhomogeneous Medium. *Journal of the Optical Society of America*, *56(12)*, 1667. <https://doi.org/10.1364/JOSA.56.001667>
- Herreño, M., & Vanegas, J. (2016). *Estudio de los efectos de la humedad en la caracterización de la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica a bajas alturas en trayectorias horizontales*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.

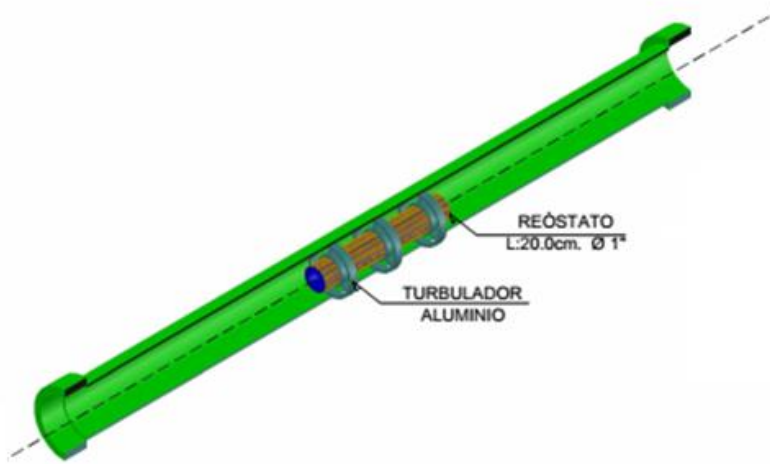
- Kolmogorov, A. N. (1991). The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1098/rspa.1991.0075>
- Labeyrie, A., Lipson, S. G., & N. (2006). *An introduction to Optical Stellar Interferometry*. (Cambridge University Press, Ed.).
- Meneses, J., Gharbi, T., & Humbert, P. (2005). Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram, *Applied Optics* 44(7).
- Quintero, J., & Rincón, J. (2016). *Caracterización de los efectos de la velocidad del aire en la turbulencia atmosférica por medio de la propagación de un haz láser a través de una trayectoria horizontal a bajas alturas*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.
- Rasouli, S., & Rajabi, Y. (2016). Investigation of the inhomogeneity of atmospheric turbulence at day and night times. *Optics and Laser Technology*, 77, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.08.017>
- Reyes, S., & Vásquez, A. (2018). *Caracterización de los efectos de la turbulencia sobre el camino de propagación de un haz láser a diferentes distancias horizontales y baja altura*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.
- Rhodes, W. T. (2012). Time-average Fourier telescropy: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Applied Optics*, 51(4), A11. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000A11>
- Rhodes, W. T., Pava, D., Dalglish, F., Nootz, G., & Silva, S. R. (2011). High-resolution imaging through horizontal path turbulence. *Proc. of SPIE Vol. 8122*, 8122, 812202. <https://doi.org/10.1117/12.895405>
- Rhodes, W., & Torres, Y. (2014). *Imaging through horizontal path turbulence: “Calculation of Young’s fringe phase variance.”*
- Sierra, W. Y. P. (2017). *Caracterización del efecto de la presión en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander.

ST. (2015). UM1907 User manual Discovery kit for STM32F7 Series with STM32F746NG MCU.
St, (June 2015), 1–46.

Apéndices

Apéndice A. Planos de Turbulador





Apéndice B. Código cálculo de parámetros

```
distance=2.2;
separation=0.07;
lambda=632e-9;
l=1;
%This algorithm tries to find global phase from Takeda algorithm. So, it
%takes the images, executes FFT2, find fundamental frequencies and separate
%them of spectrum, after it applies hamming windowing and return to direct
%space where is calculated phase.
M=1600; N=1200;
close all
path='D:\Trabajo tesis\ALEXANDER\Variables_Compactas2\Videos_Aire';

vidObj_ph = VideoWriter([path '/fulc_phase_3_5_m_s.avi'],'Motion JPEG AVI');

vidObj_ph.FrameRate=5;
open(vidObj_ph);
V=VideoReader([path '/aire3_5.avi']);
nFrames=V.NumberOfFrames;
az = 90;
el = 0;

tic;
for i=spi:nFrames
    I=read(V,i);
    D1=double(I(:,:,1));
    D=(hanning(N)*hanning(M)).*D1;
```

```

I1=fftshift(fft2(double(D)));
if (i==spi)
    [a1,ind]=max(abs(I1(600,805:end))); %Se toma en la mitad del espectro (600)
    %para verificar di/2nde aparece la fundamental, tambii/2n se toman 4 pixeles
    %despuü/2s de la DC para encontrar el centro de masa.
    ind1=804+ind;
    %Aquü/2 se verifica la posiciü/2n del centro de masa del lobulo.
    [a2,ind2]=max(abs(I1(:,ind1)));
    % A partir del centro de masa del li/2bulo se sacan las posiciones
    %alternas y así/2 recortar el li/2bulo
    posicini=find(abs(I1(:,ind1))>a2/100);
    %Aquü/2 se toma el primer valor separado de fo/3 para poder encontrar el
    %i/2rea a filtrar
        deltau=round((ind+4)/3)+1;
end
disp(i)
%Buscamos extraer la imagen sin el fondo continuo
%Se busca una copia para llevar si lo los cambios de la fundamental al
%espacio directo
I1takeda=I1;
I1takeda(1:ind2-deltau,:)=0;
I1takeda(ind2+deltau:end,:)=0;
I1takeda(ind2-deltau:ind2+deltau,1:ind1-deltau)=0;
I1takeda(ind2-deltau:ind2+deltau,ind1+deltau:end)=0;
% i1takeda=ifft2(I1takeda); No se utiliza porque se observa la
% modulaciÃ³n de la onda cuadrada
% Aquí se pasa un filtro hanning de suavizado
I1takeda(ind2-deltau:ind2+deltau-1,ind1-deltau:ind1+deltau-1)=...
I1takeda(ind2-deltau:ind2+deltau-1,ind1-deltau:ind1+deltau-
1).*(hanning(deltau*2)*hanning(deltau*2));
i1tak=ifft2(fftshift(I1takeda));

```

```

%Esta es la fase para ambas imii1/2genes
% phase11takeda=angle(i11takeda);
phase11tak=angle(i11tak);
%Aquí está la amplitud de esa fase
% magni11takeda=abs(i11takeda);
magni11tak=abs(i11tak);    %Aquí es donde se ve el filtro hanning.

Mask=((magni11tak-min(magni11tak(:)))/(max(magni11tak(:))-min(magni11tak(:))))>=1/exp(2);
Mask2=((magni11tak-min(magni11tak(:)))/(max(magni11tak(:))-min(magni11tak(:))))>0;

se=strel('disk',30);
b11=imerode(Mask,se);
Mask1=imdilate(b11,se);

sizeIm=size(D);
phase11tak_u=phase11tak;
[PhaseC,MaskF,tiempo]=unwrap2DClasico([ind1 ind2],phase11tak_u,Mask2);

%Trazar líneas de fase a partir del contorno con alta resolución

s1=contourc(PhaseC,round((PhaseC(round(sizeIm(1)/2),1):PhaseC(round(sizeIm(1)/2),end))*2*
pi));

%%Determinación de Plano de Fase interpolado y comparación de las fluctuaciones de Fase

p11(:, :, i)=PolyVal2D_1(Polyfit2D_1(PhaseC,Mask1,1:M,1:N,1),1:M,1:N,1);
pl(:, :, i)=p11(:, :, i).*Mask1;
figure(1),mesh((pl(:, :, i)-PhaseC).*Mask1), colorbar% Las fluctuaciones de fase NO son
superiores a pi/4, es decir,
title(['Fluctuaciones de la fase. Muestra ' num2str(i) '/' num2str(nFrames)])

```

```

axis([1 1600 1 1200 -0.8 0.8]);
plane_timex(i,:)=(pl(600,:,i)-PhaseC(600,:,i)).*Mask1(600,:);
plane_timey(i,:)=(pl(:,800,i)-PhaseC(:,800,i)).*Mask1(:,800);
if (i==spi)
%   axis tight manual
    set(gca,'nextplot','replacechildren');

end
view(az, el);
currFrame_ph=getframe(gcf);
writeVideo(vidObj_ph,currFrame_ph);

%Líneas de contorno para plano inclinado interpolado
s2=contourc(pl1(:, :, i),round((pl1(round(sizeIm(1)/2),1,i):pl1(round(sizeIm(1)/2),end,i))*2*pi));

figure(7); imagesc(D); colormap('gray')
title(['Interpolación de las franjas. Imagen ' num2str(i) ' de ' num2str(nFrames)])
hold on, plot(s2(1,:),s2(2:,:),'g.')
hold off

pos_s1=[];

%Se busca separar cada línea (el valor de 10 es por el periodo de las franjas)
pos_s1=find(diff(s1(1,:))>10);
pos_s2=find(diff(s2(1,:))>10);
%Con este algoritmo se dibujan las líneas
pix_eras=10;

[orientacion,medianXg,puntoiniY,puntofinY,coefY1,mu1,sttd,mux]
=parametros_lineas(pos_s1,pix_eras,s1,Mask1,'LÃ-neas curvas encontradas',3);

```

```
[orientacion_i,medianXg_i,puntoiniY_i,puntofinY_i,coefY1_i,mu1_i,std_i,mux_i]  
=parametros_lineas(pos_s2,pix_eras,s2,Mask1,'Líneas del plano interpolado',4);
```

```
[period_i errorx_i errory_i]=periodos(pos_s2,pix_eras,s2,-1/median(coefY1_i),M);
```

```
% Colecciones para estimación en el tiempo Curvas  
orient(i-spi+1,1:length(orientacion))=orientacion;  
medX(i-spi+1,1:length(medianXg))=medianXg;  
piniY(i-spi+1,1:length(puntoiniY))=puntoiniY;% Ver puntos iniciales de las líneas en la  
mascara  
pfinY(i-spi+1,1:length(puntofinY))=puntofinY;% Ver puntos finales de las líneas en la mascara  
pendient(i-spi+1,1:length(coefY1))=coefY1;  
meaOrigX(i-spi+1,1:length(mu1))=mu1;  
stdOrigX(i-spi+1,1:length(std))=std;  
meaIntX(i-spi+1,1:length(mux))=mux;  
periodos_int(i,1:length(period_i))=period_i;  
errorx_int(i,1:length(errorx_i))=errorx_i;  
errory_int(i,1:length(errory_i))=errory_i;  
% figure(5), plot(orientacion(5:end)-mean(orientacion(5:end)))  
% title('Fluctuaciones de la Orientacion Espacial');  
% grid
```

Apéndice C. Código de cálculo de la Orientación

```
pf1(i-spi+1,1:length(medianXg)-1)=diff(medianXg); %Original
pr1(i-spi+1,1:length(medianXg)-1)=pf1(i-spi+1,1:length(medianXg)-
1).*sin(mean(orientacion));
pf2(i-spi+1,1:length(mux)-1)=diff(mux); %Interpolado
pr2(i-spi+1,1:length(mux)-1)=pf2(i-spi+1,1:length(mux)-1).*sin(mean(orientacion));

end
vidObj_ph.close();
close all
```