

Adquisición y Procesamiento de Imágenes Provenientes de un Interferómetro, A partir de un  
Sistema Embebido Arm Cortex M7.

Anjher Gustavo Sandoval Vera

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director:

Omar Javier Tíjaro Rojas

Doctor en

Codirector:

Yezid Torres Moreno

Doctor en

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A Dios.

### **Agradecimientos**

El autor expresa su agradecimiento:

A Dios, cuya voluntad y generosidad hicieron posible culminar este proyecto. Gracias por estar presente no sólo en esta importante etapa, sino en todo momento, y por convertir cada período de este proyecto en un reto de aprendizaje y lecciones.

Al profesor Omar Javier Tíjaro, mi director, por su apoyo y confianza en muchos momentos difíciles, por permitirme ser parte del grupo de investigación GOTS, y por tomarse el arduo trabajo de transmitirme todos sus conocimientos sobre el tema. Gracias por orientarme en cada paso de mi desarrollo como ingeniero.

A Yezid Torres Moreno, mi codirector, por su apoyo, disposición y acompañamiento a lo largo del proyecto. Por ser un modelo dentro del ámbito académico, a quien debo mi total admiración.

A los integrantes del grupo de investigación GOTS y CPS por su constante apoyo, especialmente a Jesús y Alexander, quienes me acogieron y brindaron sus conocimientos para la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por ser el pilar de mi desarrollo como ingeniero, y a la Escuela de Física y de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por ser partícipes de mi proceso de formación, permitiéndome tener un progreso tanto intelectual como personal.

A don Jaime por su apoyo mientras estuve en comedores: recordar sus sabias palabras siempre fue una luz en medio del camino y por último a mi esposa, padres y demás familiares, quienes siempre me apoyaron en este proceso.

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
1. Generalidades.....	10
1.1 Planteamiento del problema y justificación.....	10
2. Objetivos.....	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivo Específicos.....	13
3. Alcances.....	14
4. Metodología.....	14
4.1 El interferómetro de Young.....	15
4.2 El microcontrolador STM32F746.....	17
4.3 Procesamiento digital de imágenes.....	20
5. Resultados.....	22
5.1 Montaje óptico.....	22
5.2. Procesamiento de imágenes.....	24
5.3 Adquisición y almacenamiento de imágenes.....	25
6. Conclusiones.....	38
7. Trabajos futuros a partir de este proyecto.....	39
Referencias.....	40
Apéndices.....	42

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Características relevantes del sensor OV9655</i> .....	19
Tabla 2. <i>Estructura del tratamiento digital de imagen aplicado</i> .....	20
Tabla 3. <i>Características generales del láser</i> .....	22
Tabla 4. <i>Pruebas para determinar el mejor tamaño de franjas</i> . .....	29
Tabla 5. <i>Variables de interés, posterior al tratamiento de imágenes</i> .....	37

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Etapas en las que se desarrolla</i> .....	15
Figura 2. <i>Interferómetro de Young</i> .....	16
Figura 3. <i>Tarjeta STM32F746G-Disco</i> .....	18
Figura 4. <i>Esquema Interferómetro de Young</i> .....	23
Figura 5. <i>Interferómetro de Young</i> .....	23
Figura 6. <i>Procesamiento de la imagen</i> .....	24
Figura 7. <i>Diagrama de flujo, adquisición y almacenamiento de la imagen.</i> .....	26
Figura 8. <i>Diagrama de la arquitectura para la adquisición de imágenes</i> .....	26
Figura 9. <i>Resultados STSIVA</i> .....	27
Figura 10. <i>Arreglo de redes de Ronchi</i> .....	28
Figura 11. <i>Resultados para diferentes frecuencias espaciales</i> .....	30
Figura 12. <i>Detección de franjas en la frecuencia y resolución seleccionadas.</i> .....	31
Figura 13. <i>Tratamiento de imágenes, patrón ideal</i> .....	33
Figura 14. <i>Tratamiento de imágenes, imagen 480x272</i> .....	34
Figura 15. <i>Tratamiento de imágenes, imagen 320x240</i> .....	35
Figura 16. <i>Tratamiento de imágenes, imagen 160x120</i> .....	36

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. <i>Componentes de un sistema de procesamiento óptico</i> .....	42
Apéndice B. <i>Microcontrolador ARM – Córtes Mx</i> .....	48
Apéndice C. <i>Medición de la variable S en el montaje óptico</i> .....	52
Apéndice D. <i>Reconocimiento de imágenes planteado por Takeda.</i> .....	56

## Resumen

**Título:** Adquisición y procesamiento de imágenes provenientes de un interferómetro, a partir de un sistema embebido ARM Cortex M7\*

**Autor:** Anjher Gustavo Sandoval Vera\*\*

**Palabras clave:** Interferómetro, sistema embebido, procesamiento de imágenes.

### Descripción:

En múltiples aplicaciones industriales, los instrumentos para la adquisición de imágenes en campo abierto necesitan ser portátiles, independientes energéticamente y con memoria integrada para procesamiento y almacenamiento. Los sistemas embebidos brindan una solución sencilla a las carencias de los sistemas portátiles.

El sistema embebido escogido fue el STM32F746Discovery®, ya que provee características que facilitan la captura de imágenes y su almacenamiento para posterior tratamiento. Las imágenes adquiridas son franjas interferométricas que se obtuvieron en un montaje de laboratorio implementando un interferómetro de Young, usando como haz de luz un láser; el procesamiento de imágenes se implementó usando el software Matlab.

---

\* Trabajo de Grado

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

**Abstract**

**Title:** Acquisition and images processing from an interferometer, using an Arm Cortex-M7 embedded system\*

**Author:** Anjher Gustavo Sandoval Vera\*\*

**Key words:** Interferometer, embedded system, image processing.

**Description:**

In multiple industrial applications, instruments for open field image acquisition need to be portable, with independent power supply and with integrated processing and storage memory. Embedded systems provide a simple solution to the shortcomings of portable systems.

The embedded system used was the STM32F746 Discovery, since it provides characteristics that facilitates the images acquisition and their storage for later processing. The acquired images are interferometric fringes that were obtained in a laboratory setup using a Young's interferometer, using a laser as a light beam; their processing was implemented using Matlab® software.

---

\* Bachelor Thesis

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

## 1. Generalidades

El uso de sistemas embebidos permite reducir costos, en algunas empresas, utilizando PLC's o microcontroladores, además se diseñan para trabajar en ambientes hostiles como la intemperie, temperaturas extremas, entre otros.

En óptica, las cámaras con los sensores CMOS se acoplan fácilmente a sistemas embebidos que tienen bajo consumo energético y costo comercial (Sandoval, Tíjaro, & Moreno, 2019, págs. 1-5). Y por tal motivo, el presente trabajo se centra en la adquisición de patrones de franjas de interferencia, generadas por un interferómetro, utilizando un sensor CMOS de bajo costo, el OV9655.

En el ámbito práctico, durante la implementación se habilitaron los módulos necesarios en el microcontrolador STM32F746GN para la adquisición de imágenes provenientes del sensor CMOS OV9655. Estas imágenes de franjas interferométricas, fueron analizadas debido a que contribuyen en el estudio de la turbulencia atmosférica ya que, por medio de éstas, se pueden calcular varios parámetros, tales como el centelleo, la escala interna entre otros, que se basan en las deformaciones que las franjas interferométricas puedan presentar.

Finalmente, en el cuerpo de este trabajo de grado, se determinan los ángulos de inclinación de dichas franjas, a partir de las imágenes adquiridas por medio del sistema embebido.

### 1.1 Planteamiento del problema y justificación

La implementación de los sistemas embebidos en trabajos de campo abierto tiene un potencial enorme teniendo en cuenta que, al utilizar dispositivos que cumplan labores específicas, se optimiza el hardware, se reducen costos y en ocasiones se aumenta el tiempo de procesamiento, mejorando el intervalo de respuesta ante estímulos.

Ahora bien, la adquisición de imágenes generalmente se hace usando un computador portátil con un sensor CMOS (cámara) conectado a él, dificultando la toma de muestras por tiempos prolongados y el deterioro de dicho dispositivo en ambientes hostiles. Una solución ingeniosa y barata es el uso de un sistema embebido que, cumpla las funciones principales del computador (reconocer y acoplar el sensor o la cámara en cuestión, energizarlos y guardar los datos en una memoria extraíble, para su posterior análisis y procesamiento), sea mucho más fácil de transportar y sea menos propenso a daño por altas temperaturas, o periodos largos de uso.

Por esto, el actual trabajo de grado, en conjunto con el grupo de investigación GOTS, busca implementar la adquisición y almacenamiento de imágenes interferométricas, trabajo que tiene importantes aplicaciones en otros campos de trabajo afines a la óptica.

El presente trabajo de grado estuvo asociado al proyecto de Colciencias 110256933773: “Uso de la Telescopía de Fourier de tiempo promedio, para caracterizar la turbulencia a baja altura”, desarrollado por varios miembros del grupo de investigación de Óptica y tratamiento de señales GOTS, de la escuela de Física, de la Universidad Industrial de Santander.

Teniendo en cuenta que se busca medir la turbulencia en distancias medidas a bajas alturas, surge un problema importante: se necesitan equipos portátiles, económicos y que soporten las condiciones climatológicas propias de nuestra región geográfica, que permitan medir las variables de control de interés: tamaño de las franjas ópticas de interferencia, velocidad del aire, temperatura, presión y humedad.

Así pues, el presente trabajo de grado brinda una solución a un problema concreto en uno de los proyectos desarrollados por un miembro del grupo de investigación y busca almacenar en un sistema embebido los patrones ópticos de interferencia generados en un interferómetro de Young en campo abierto, bajo condiciones climatológicas adversas con dispositivos de muy bajo

costo. Por ello se selecciona un sistema embebido, ya que soluciona de manera eficiente los problemas mencionados: Por una parte, su tamaño pequeño facilita su transporte. Por otro lado, el dispositivo requiere de manera óptima, una fuente de alimentación portátil, como una batería común a salida de 5V, para poder dejarlo en funcionamiento durante un tiempo prolongado.

Otra ventaja del sistema embebido es el sencillo cambio de algunos de sus elementos esenciales, tal como la cámara, el sensor CMOS o la tarjeta microSD: la cámara se conecta al sistema embebido mediante un 30-pin FPC conector, por lo cual, en caso de daño o deterioro, se puede reemplazar fácilmente. La memoria microSD se puede cambiar fácilmente, ya que el microcontrolador permite la conexión de la tarjeta microSD como dispositivo periférico. Así pues, el bajo precio en sus componentes facilita el cambio de objetos dañados y el mantenimiento del sistema embebido.

Este desarrollo también tiene alcances académicos destacables en otras ramas de la ingeniería, puesto que la industria utiliza la interferometría para medir distancias del orden de la longitud de onda del láser utilizado, abriendo un sinfín de aplicaciones, por lo cual este proyecto puede servir de soporte a otras ramas de investigación de la Universidad Industrial de Santander.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Implementar un sistema de adquisición de franjas interferométricas propagadas a nivel horizontal, usando un sistema embebido ARM CórteX M7 para un posterior análisis de las múltiples características de la turbulencia.

### **2.2 Objetivo Específicos**

Analizar y comprender el funcionamiento de un sistema óptico, durante la producción de franjas interferométricas.

Implementar un algoritmo para la adquisición de imágenes provenientes de un sistema de franjas de interferencia implementado en laboratorio, usando un sistema embebido CórteX M7.

Hallar los ángulos de inclinación de las franjas adquiridas en un sistema de cómputo utilizando un software para el procesamiento de imágenes.

Evaluar la característica correspondiente a la turbulencia atmosférica a partir de los ángulos de inclinación encontrados.

### 3. Alcances

Actualmente en la UIS, una rama de investigación del grupo de óptica y tratamiento de señales (GOTS) de la escuela de física, está centrada en la medición de parámetros de turbulencia a bajas alturas. Dicha investigación requiere el almacenamiento de diferentes datos registrados por sensores a lo largo de una trayectoria horizontal, así como de la adquisición de imágenes (Vanegas & Conde, 2016), específicamente de franjas de interferencia Óptica (Pinzón Sierra, 2017).

Así pues, el presente proyecto de grado busca implementar una solución al problema de la adquisición de imágenes en un sistema embebido. Dicho sistema usado será el STM32F746 de la empresa Discovery, usado anteriormente en proyectos similares del grupo de investigación.

Como resultado, el presente proyecto hace entrega de:

1. El algoritmo de adquisición y almacenamiento de imágenes, usando el microcontrolador STM32f746 y el periférico sensor CMOS OV9655.
2. El algoritmo de cálculo de las franjas interferométricas
3. El presente libro con la descripción del desarrollo y finalización de proyecto.

### 4. Metodología

Se desarrollaron 3 etapas.

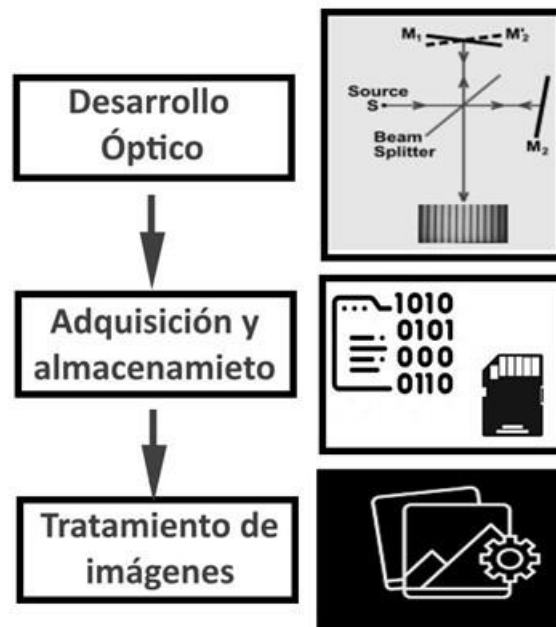
*Primera*, Desarrollo óptico: Allí se implementó un interferómetro de Young, para obtener un patrón de franjas interferométrías (Laboratorio de Óptica del GOTS).

*Segunda*, Adquisición y almacenamiento de los patrones de interferencia. Para esto, se utilizó un sistema embebido compuesto del microcontrolador STM32F746, conectado con el módulo de la cámara S5K5CAG a su vez conectado con el sensor CMOS OV9655.

*Tercera*, Procesamiento de imágenes: se implementó un algoritmo para identificar las franjas verticales y luego calcular su ángulo de inclinación. Las bases teóricas para el desarrollo de estas tres etapas son las siguientes:

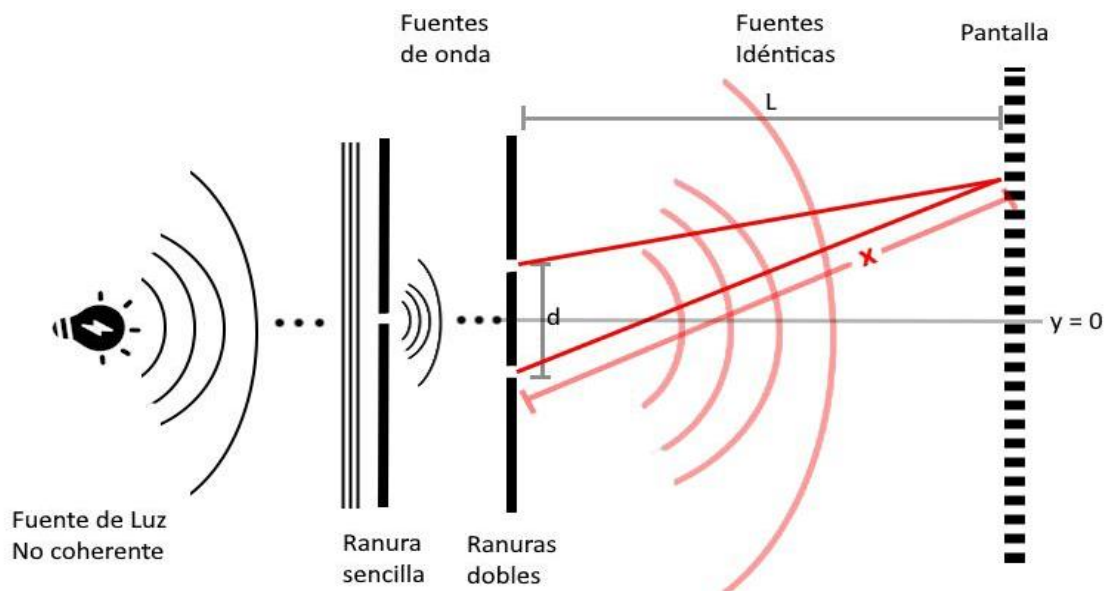
**Figura 1.**

*Etapas en las que se desarrolla*



#### 4.1 El interferómetro de Young

El interferómetro de Young funciona por división de frente de onda. El montaje óptico consiste en hacer incidir el haz de luz sobre 2 rendijas con una separación “d” entre ellas, como se presenta en la Figura 1.

**Figura 2.***Interferómetro de Young*

Fuente: Autor

Así pues, “las rendijas funcionan como nuevos focos de emisión de un mismo haz de luz. Al incidir sobre una pantalla distante, se obtienen una serie de franjas compuestas por máximos y mínimos dispuestos de manera regular, producto de la interferencia del haz consigo mismo (Aranda & López, 2015)”. Esto se conoce con el nombre de diagrama de interferencia; este diagrama tiene su origen en la naturaleza ondulatoria de la luz, donde las ondas que llegan a la rendija están en fase o desfase dependiendo de los caminos o distancias que tome el haz hasta llegar a la pantalla (Villalobos, 2021).

La variable  $x$  en la figura 1, representa la distancia más corta entre la ranura que produce el haz y el punto en la pantalla donde dicho haz incide.

Cuando la diferencia de camino  $L$  es un múltiplo impar de una semi longitud de onda  $\lambda/2$  se produce una región oscura. Por tanto, la condición de amplitud nula sobre la pantalla se da para aquellos ángulos que cumplan la relación:

$$y_{min} = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \cdot L}{d} \quad (1)$$

Los máximos se producirán en aquellos puntos sobre los que inciden las dos ondas en fase, es decir, cuando la diferencia de camino óptico sea nula o un múltiplo de la longitud de onda:

$$y_{max} = \frac{(m \cdot \lambda \cdot L)}{d} \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) son importantes durante el desarrollo del proyecto, porque permiten conocer la distancia “y” en función de “d” y “L”. En el Apéndice A “Componentes de un sistema de procesamiento óptico” se muestra a detalle los componentes involucrados en el montaje óptico.

Así pues, el patrón de franjas forma una frecuencia espacial en función de la longitud de onda y las magnitudes L y d de la siguiente forma:

$$Frecuencia\ espacial = \frac{(\lambda \cdot L)}{d} \quad (3)$$

#### 4.2 El microcontrolador STM32F746

Este procesador es una unidad de alto rendimiento ARM Cortex-M7, de 32 bits RISC (*Reduced Instruction Set Computing*), que puede funcionar a una velocidad de reloj de hasta 216 MHz. Este MCU tiene varias memorias de alta velocidad: 1 Mbyte de Memoria flash, 320 Kbyte de SRAM, 16 Kbyte de instrucción RAM TCM (para rutinas críticas en tiempo real), 4 Kbyte de memoria SRAM de respaldo, disponible en los modos de menor potencia y periféricos conectados a un bus de alto rendimiento (*Advanced High-performance Bus AHB*). Como complemento, el Apéndice B profundiza en la lógica detrás de la selección y uso del microcontrolador STM32F746, además de ofrecer una comparación general con otros dispositivos equivalentes del mismo proveedor.

**Figura 3.***Tarjeta STM32F746G-Disco*

*Nota:* Longair, Malcolm S. (1999). *La evolución de nuestro universo*. Ediciones AKAL, pp.27-29, pp. 32-35.

El dispositivo cuenta con dos controladores DMA (*Direct Memory Access*), un dispositivo configurable en paralelo de 8 a 14 bits con una interfaz para cámara digital (*DCMI*) que puede funcionar a hasta 54 Mbps. Además de una memoria SDRAM externa de 128 Mbit, (se pueden usar 64 Mbit), utilizada para almacenar las imágenes temporales durante las adquisiciones de datos, así como una pantalla LCD-TFT a color de 4,3 pulgadas y 480x272 pixeles de resolución, utilizada para la vista de retroalimentación de la cámara. Otro elemento involucrado es el FPC (*Flexible Printed Circuit*) que es la banda flexible que conecta el periférico de la cámara con el microcontrolador. Este dispositivo específico se utilizó en el desarrollo del proyecto, por dos razones fundamentales:

1. El presente trabajo de grado propone resolver el almacenamiento de patrones ópticos de interferencia generados en un interferómetro de Young, en condiciones climáticas adversas y campo abierto, mediante dispositivos portátiles, de bajo costo y alimentados por baterías.

2. El sistema embebido implementado permite el reemplazo sencillo de componentes como la cámara, el sensor CMOS y la tarjeta microSD, gracias a su diseño con conectores accesibles. Esta flexibilidad, junto con la disponibilidad de componentes a precios bajos, facilita el mantenimiento y la sustitución de elementos dañados.

El sensor de imagen utilizado es el OV 9655, sensor tipo CMOS de Omnivision, en la tabla 1 se mencionan sus características más relevantes.

**Tabla 1.**

*Características relevantes del sensor OV9655*

<b>Características del periférico que contiene la cámara</b>	
Sensor	OV9655
Resolución	1.3 Megapíxeles
Conexión con el MCU	Flexible printed circuit, 24 pines
Buses de datos del periférico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCCB - Serial Camera Control Bus, para inicializar y configurar los parámetros de la cámara.</li> <li>• Bus de datos de píxeles de salida paralela de hasta 10 líneas [formatos RGB 4:2:2, RGB 565, RGB 555), YUV (4:2:2) y YCbCr (4:2:2)]</li> </ul>
Matriz activa	1280x1024 píxeles
Velocidad de transferencia	Hasta 30 fps
Tamaño del pixel	3.18 $\mu\text{m}$ x 3.18 $\mu\text{m}$
Área activa del sensor	4.17 mm x 3.29 mm

*Nota:* Sandoval, A. G., Tíjaro, O. J., & Moreno, Y. T. (2019, April). *Acquisition and storage of optical interference fringes by means of an embedded system*. In 2019 XXII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA) (pp. 1-5)

### 4.3 Procesamiento digital de imágenes

Para identificar y determinar el ángulo de inclinación en un patrón de franjas interferométrías es necesario realizar un reconocimiento de formas, que en este caso es un grupo de franjas cuasi paralelas, con un espaciado cuasi constante. Para identificar los patrones, se sugiere (Mamani Fernandez, 2014) realizarle tratamiento digital a la imagen, a partir de la estructura mostrada en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Estructura del tratamiento digital de imagen aplicado.*

Proceso	Descripción
Adquisición	Esta fase implica la recepción de información a través de sensores, como un sensor CMOS, que puede distinguir características de la luz como tono e intensidad. La adquisición de esta información marca el inicio del proceso de digitalización de la imagen recibida.
Binarización	Durante esta etapa, la imagen recibida se convierte en una imagen binaria, donde se asigna el valor de 1 a la identificación del objeto (información crucial) y el valor de 0 al fondo del objeto (información no esencial).
Análisis	En esta fase se realiza una primera caracterización de la información, se decanta entre información relevante e irrelevante.
Segmentación	En esta etapa, después de identificar la información relevante, se delimitan las regiones de interés, como la parte “blanca” en la figura 5.b. En este proyecto, tanto las partes "blancas" como las "negras" de la imagen son consideradas de interés.
Normalización	Durante esta fase se trabaja en el ajuste de forma, tamaño y posición, con el fin de facilitar la agrupación de imágenes de la misma clase.

Proceso	Descripción
Extracción de información	Esta etapa se refiere al proceso de identificar y aislar los datos relevantes o características significativas de las señales capturadas por el interferómetro. Esto puede incluir la determinación de parámetros como la periodicidad, la amplitud y la fase de las franjas de interferencia, así como cualquier otra información que pueda ser útil para la interpretación y análisis del fenómeno interferométrico en cuestión.
Patrón	Durante esta etapa, basados en la información recopilada en los anteriores pasos, se busca identificar y medir el patrón de interés.

Fuente: Autor

El Apéndice D muestra de manera detallada el trabajo hecho por M. Takeda en (1982), el cual fue tenido en cuenta en el desarrollo de los resultados del presente proyecto de grado.

Así pues, el tratamiento de imágenes realizado consta de los siguientes pasos:

1. Transformación de la señal al dominio de la frecuencia.
2. Filtro pasa banda, para la separación de la señal envolvente y la señal de interés.
3. Desplazamiento al origen para eliminar la frecuencia portadora.
4. Transformada inversa de Fourier realizando el análisis necesario con la señal filtrada en el dominio de la frecuencia.

Estos pasos se implementaron utilizando la herramienta Matlab®.

Al final del siguiente capítulo se profundiza en la aplicación de dicho procesamiento de imágenes.

### 5. Resultados

Para abordar esta temática se divide en las 3 siguientes partes: montaje Óptico, adquisición y almacenamiento de imágenes y procesamiento de Imágenes.

#### 5.1 Montaje óptico

El emisor utilizado durante las pruebas fue el modelo 31005 del láser He-Ne, de la empresa Research Electro-Optics, Inc, sus características son mencionadas en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Características generales del láser*

Característica	Valor
Potencia de salida	1.5 [mW]
Longitud de onda	632.8 [nm]
Ancho del haz (1/e <sup>2</sup> )	1.25 ± 0.1 [mm]
Divergencia del haz	0.66 ± 0.05 [mrad]
Potencia de arranque después de 20 minutos	> 95%
Voltaje de polarización	120 [V]

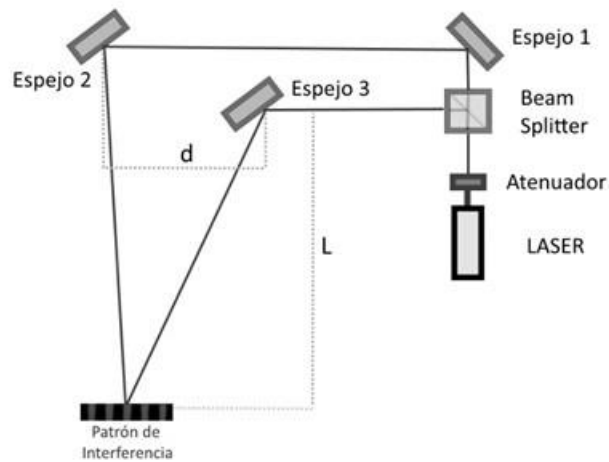
*Nota:* Newport Corporation. (s.f.). DS-10920 HeNe Laser.

[https://www.newport.com.cn/medias/sys\\_master/images/images/h58/hf1/9213571760158/DS-10920-HeNe-Laser.pdf](https://www.newport.com.cn/medias/sys_master/images/images/h58/hf1/9213571760158/DS-10920-HeNe-Laser.pdf)

El montaje en el laboratorio corresponde a un interferómetro de Young, compuesto por un arreglo de 3 espejos, un beam splitter (50%), un atenuador (atenuación del 90%) y el láser ya mencionado, ubicados tal como el esquema de la figura 3. Dicho montaje óptico se implementó en el laboratorio de óptica de la UIS, de la Escuela de Física, tal como se evidencia en la fotografía de la Figura 4.

**Figura 4.**

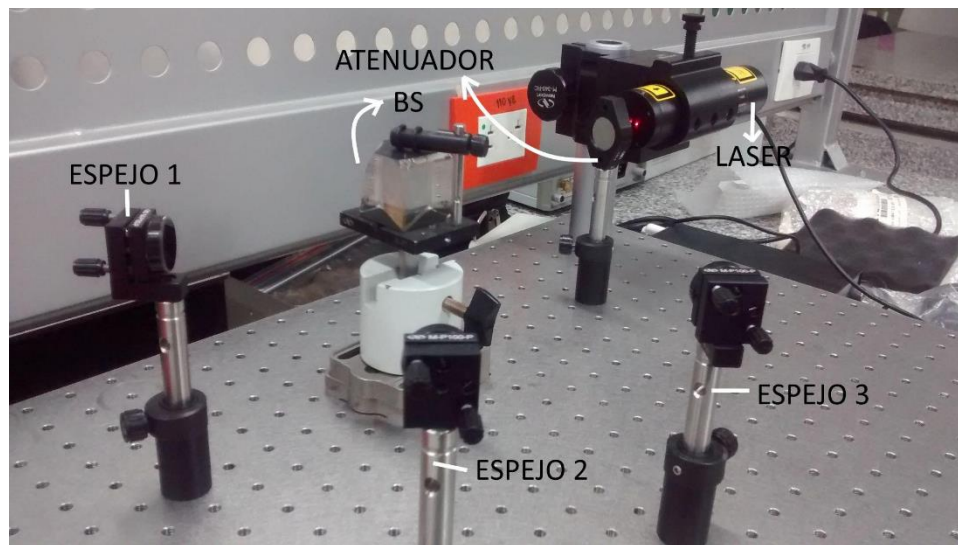
*Esquema Interferómetro de Young*



Fuente: Autor

**Figura 5.**

*Interferómetro de Young*



La presentación de los componentes usados en el montaje óptico se encuentra en el Apéndice A “Componentes de un sistema de procesamiento óptico”.

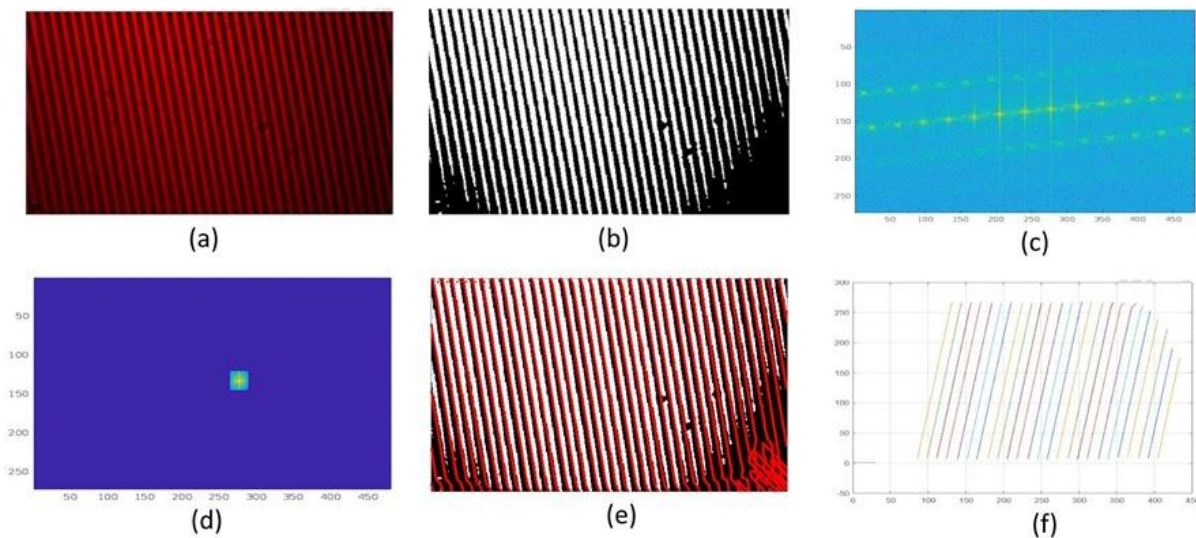
**5.2. Procesamiento de imágenes**

En el anterior capítulo, durante el apartado del tratamiento de imágenes implementado específicamente por Takeda (1982), se evidenció que el método de transformada de Fourier (FTM) tiene 4 pasos generales, junto con un procedimiento adicional de desenvolvimiento de fase propuesto por el profesor Enrique Fonseca del grupo de Óptica de la UIS, para mejorar los resultados del tratamiento de imágenes en el dominio de la frecuencia. Antes de presentar los resultados, es importante aclarar que una parte del tratamiento de imágenes incluye la selección y aplicación de un enventanado en el dominio de la frecuencia, previo a un filtro pasa banda espacial. Para simplificar, este proceso se conoce como filtro de Hanning.

La figura 5 muestra de forma general, los pasos más significativos en el tratamiento de imágenes, descritos en la tabla 2: a. Adquisición, b. binarización, c. transformada de Fourier, d. Filtro Hanning en la transformada de Fourier, e. Detección de franjas, f. Caracterización

**Figura 6.**

*Procesamiento de la imagen*



Fuente Autor

Así pues, durante el presente proyecto de grado, se implementó un algoritmo de tratamiento de imágenes en Matlab, basado en (Takeda, Ina, & Kobayashi, 1982).

1. Lectura de la imagen (imread) y opcional, selección del canal de color de interés
2. Binarización de la imagen para evitar zonas grises
3. Transformada de Fourier 2D (fft2) y posterior desplazamiento (fftshift) del componente de frecuencia cero al centro del arreglo. De aquí se deduce que hay que hacerle un corrimiento al ángulo de  $-90^\circ$ , debido a cómo el algoritmo implementado en Matlab hace las transformaciones.
4. Cálculo del centroide o centro de masa de las frecuencias altas en el dominio de la frecuencia.
5. Se implementa el filtro de Hanning al centroide, para restringir el análisis al área de interés.

Así pues, una vez realizados estos pasos, se calculan las variables de interés a partir de la caracterización de las franjas. Durante el desarrollo del presente proyecto se calculó el ángulo de inclinación de las franjas detectadas.

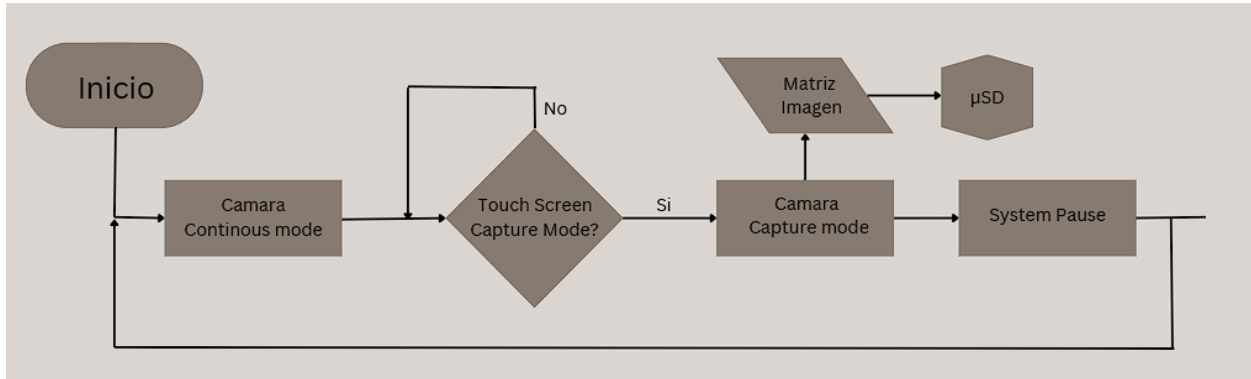
### **5.3 Adquisición y almacenamiento de imágenes**

Uno de los principales objetivos del uso del presente dispositivo es lograr una adquisición de datos confiable, rápida y con bajos requerimientos de potencia. Por ello, el MCU está diseñado con varios periféricos de hardware que se pueden configurar para manejar las diferentes partes de la adquisición. La interfaz de cámara digital (Digital Camera Interface - DCMI) está configurada para capturar imágenes de la cámara y almacenar cada píxel en un registro periférico temporal que se asigna mediante hardware a una región de memoria de la SDRAM externa (Tresanchez, y otros, 2018). Este mapeo se realiza utilizando el Acceso Directo a Memoria (Direct memory access - DMA) que proporciona transferencia de datos en bloque de alta velocidad por hardware entre

periféricos y memorias, y el Controlador de Memoria Flexible (FMC) que permite la transferencia de “paquetes” entre memorias. La Figura 6 muestra el diagrama de flujo del microcontrolador y sus periféricos para este proceso.

**Figura 7.**

*Diagrama de flujo, adquisición y almacenamiento de la imagen.*

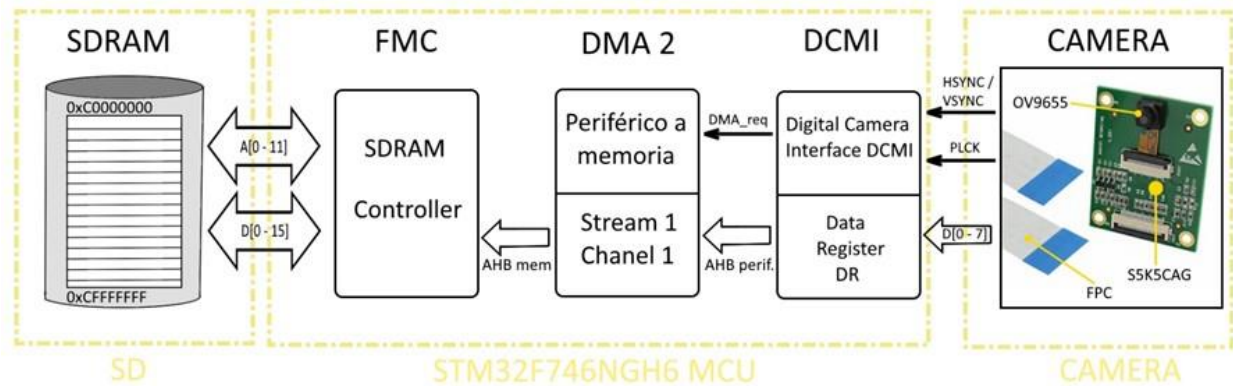


Fuente: Autor

De modo similar, la Figura 7 muestra el diagrama de arquitectura del hardware utilizado para la adquisición de imágenes.

**Figura 8.**

*Diagrama de la arquitectura para la adquisición de imágenes*



Fuente: Autor

La adquisición y el almacenamiento de imágenes se implementó a partir del esquema de la Figura 7 que muestra los distintos hardware y periféricos usados en el montaje, donde el patrón de franjas es captado por el sensor CMOS OV9655 (parte derecha), a su vez conectado con el periférico S5K5CAG, donde las diferentes señales se transportan del periférico al microcontrolador a través del FPC (*Flexible Printed Circuit*) que es la banda flexible de color azul que conecta los dos puntos anteriormente mencionados (Figura 7, parte derecha). Las imágenes captadas por el sensor CMOS son almacenadas en la memoria SD (a partir de la implementación de las librerías asociadas), para posterior extracción y tratamiento de señales offline.

Las primeras imágenes capturadas corresponden a pruebas y ajustes de los parámetros del sensor CMOS a través de funciones durante su programación, con el objetivo de investigar su funcionamiento. Dichas imágenes fueron presentadas en el congreso STSIVA como parte de la ponencia, junto con el director y codirector de proyecto (Sandoval, Tíjaro, & Moreno, 2019).

Algunos resultados obtenidos durante dichas pruebas se presentan en la Figura 9:

### Figura 9.

#### Resultados STSIVA



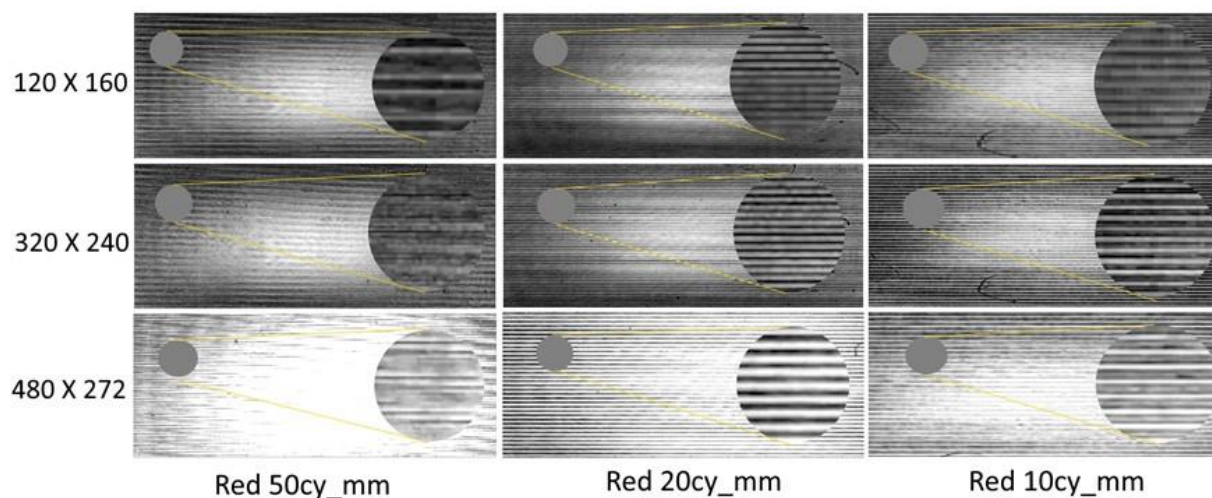
Fuente: Autor

Después de estos resultados iniciales, se realizó un montaje óptico, utilizando una red de Ronchi, para poder determinar de manera preliminar un rango de franjas adecuado para realizar el montaje óptico. El montaje se llevó a cabo retirando el objetivo del sensor CMOS, colocando una

pieza de papel pergamino y sobre ésta, la red Ronchi directamente sobre el sensor CMOS. La Figura 10 muestra un resumen de los resultados de usar 3 redes Ronchi.

**Figura 10.**

*Arreglo de redes de Ronchi*



Fuente: Autor

Se observó del montaje de la red de Ronchi que las franjas son detectadas con mayor facilidad cuando la red tiene valores similares o inferiores a 10 ciclos por milímetro (con un tamaño de franja de 100  $\mu\text{m}$ ). Sin embargo, en algunas ocasiones, el algoritmo de procesamiento de imágenes detectaba mejor las franjas de 20 ciclos por milímetro (con un tamaño de 50  $\mu\text{m}$ ) para las resoluciones de 320 x 240 y 480 x 272, por lo que la prueba no fue concluyente. Por lo tanto, se diseñó un montaje óptico que abarcara valores superiores a 10 ciclos por milímetro para analizar de manera experimental estas opciones. Las franjas de 50 ciclos por milímetro no se consideraron debido a que son demasiado pequeñas para el sensor y el ancho activo (20  $\mu\text{m}$ ). Con esta información, se procedió a realizar el montaje propuesto en la figura 4 utilizando los valores de  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $L = 8.07 \text{ m}$  y de las demás variables descritas en la tabla 4:

**Tabla 4.***Pruebas para determinar el mejor tamaño de franjas.*

Variable	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
d	6.5 cm	10.7 cm	20.5 cm
Frecuencia espacial (Fe)	78.58 $\mu\text{m}$	47.74 $\mu\text{m}$	24.92 $\mu\text{m}$

Fuente: Autor

A partir de la Figura 3, se pudo derivar teóricamente la ecuación (3) mencionada en el capítulo 2. Esta ecuación nos proporciona la frecuencia espacial (Fe), la cual se pudo comparar con los datos obtenidos en la prueba con la red Ronchi. En el Apéndice C la Figura 21 muestra cómo se midió la distancia “d”.

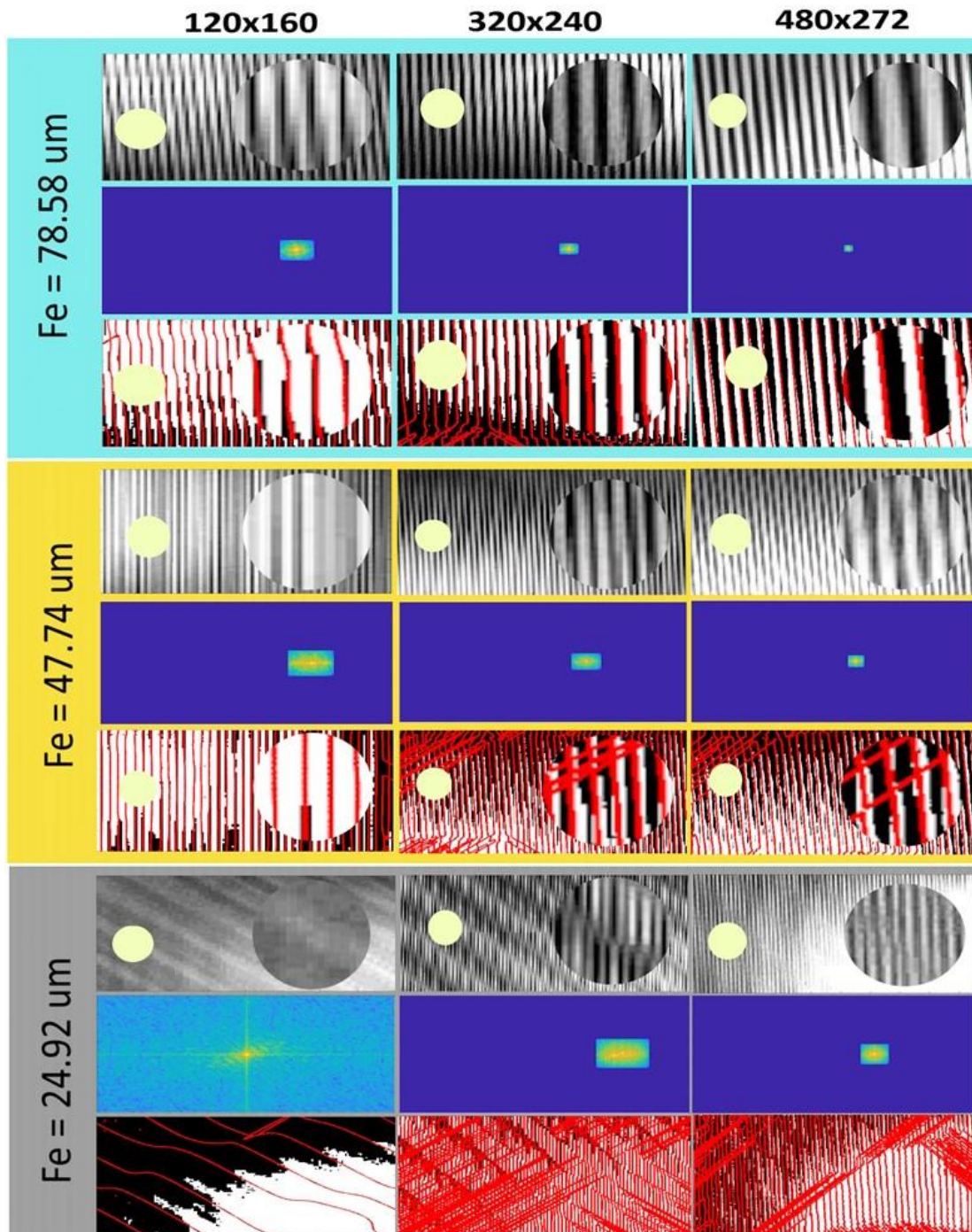
Por lo tanto, las frecuencias espaciales corresponden a la magnitud Fe, detallada en la tabla 4. Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 10.

De esta figura se pudo observar que con una resolución de 320 x 240, se deben utilizar franjas iguales o con un valor superior a  $Fe = 78.58 \mu\text{m}$  la resolución de 120 x 160 es la menos recomendable a usar, puesto que las franjas se solapan y generar errores durante el tratamiento de imágenes.

La resolución de 480 x 272 tiene resultados similares a la de 320 x 240, sin embargo, esta resolución tiene problemas con la saturación y el contraste, generando problemas al momento de calibrar y guardar la imagen, por lo que este análisis nos da una razón válida para usar la resolución de 320 x 240 que tiene las franjas más nítidas de las muestras tomadas.

**Figura 11.**

*Resultados para diferentes frecuencias espaciales*



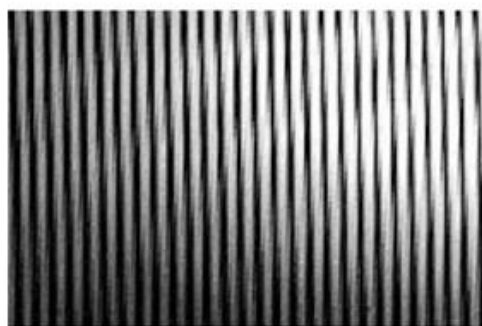
Fuente: Autor

Los resultados mostrados en la Figura 10 son coherentes con los obtenidos mediante la red de Ronchi en la Figura 9, por lo que se decide trabajar con franjas de frecuencia espacial entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ , preferiblemente utilizando una resolución de 320x240 píxeles.

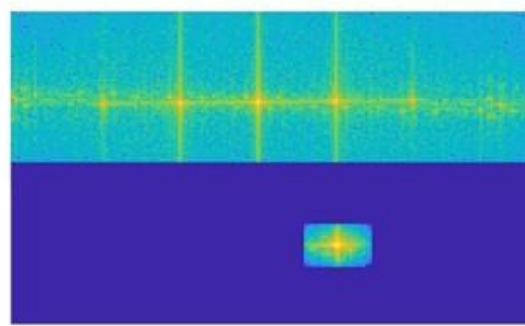
Así pues, teniendo en cuenta las condiciones de resolución y frecuencia espacial mencionadas, se hace el tratamiento de imágenes a un fotograma de 320x240 píxeles con  $f_e = 78,58 \mu\text{m}$ , tal como se muestra en las figuras 12 a, b, c y d.

### Figura 12.

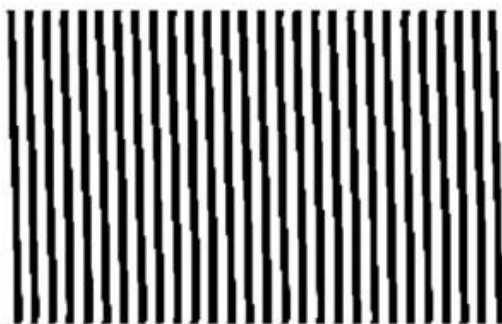
*Detección de franjas en la frecuencia y resolución seleccionadas.*



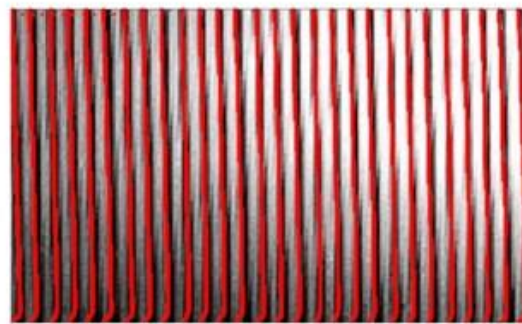
(a) Imagen sin filtros



(b) Dominio de la frecuencia



(c) T. inversa Hanning



(d) Franjas detectadas

Fuente: Autor

La Figura 12.a muestra la imagen sin ningún tipo de filtro. La Figura 12.b presenta la gráfica del dominio de la frecuencia, sin aplicar el filtro a la frecuencia de interés (arriba) y con dicho filtro aplicado (abajo). La Figura 12.c muestra la transformada inversa de la imagen tras aplicar el filtro en forma de ventana o de Hanning. Se puede observar que se elimina todo el ruido y cualquier otra información que no es de interés. Finalmente, la Figura 11.d ilustra las franjas detectadas, superpuestas sobre la imagen sin filtro, para entender gráficamente el proceso realizado por el código en Matlab.

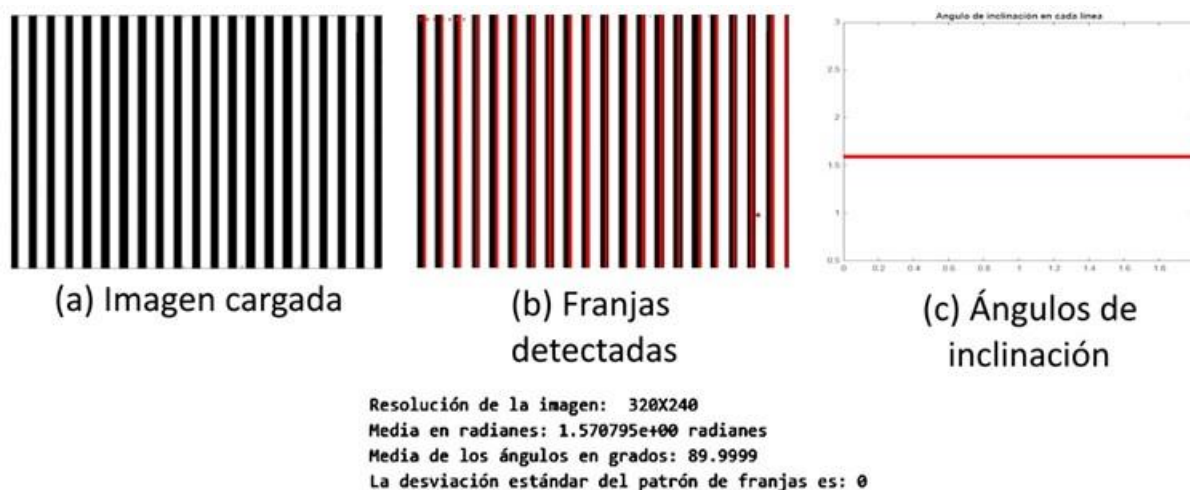
El presente estudio de tratamiento de imágenes se centró en dos aspectos principales: la detección de las franjas y el cálculo del ángulo de inclinación. El ángulo de inclinación general se obtiene como el promedio de los ángulos de inclinación de cada una de las franjas detectadas. A partir de cada medida particular, es posible calcular la desviación estándar con respecto al promedio de los ángulos, lo que permite evaluar la variación o dispersión de cada franja en relación con la media. La desviación estándar es una medida relevante, ya que la deformación de cada franja está influenciada por la turbulencia del medio que atraviesa el haz de luz.

Así pues, el patrón de franjas de la figura 12, que correspondió a una prueba real, se obtuvo una media del ángulo de inclinación de 1.55524 radianes (89.1086 grados), con una desviación estándar de  $2.1059 \times 10^{-4}$ . Se realizó un tratamiento de imágenes similar en tres pruebas adicionales.

La primera prueba, evidenciada en la Figura 12, correspondió a un patrón ideal generado en MATLAB con un ángulo determinado de  $90^\circ$ , que sirvió como patrón de referencia.

**Figura 13.**

*Tratamiento de imágenes, patrón ideal*



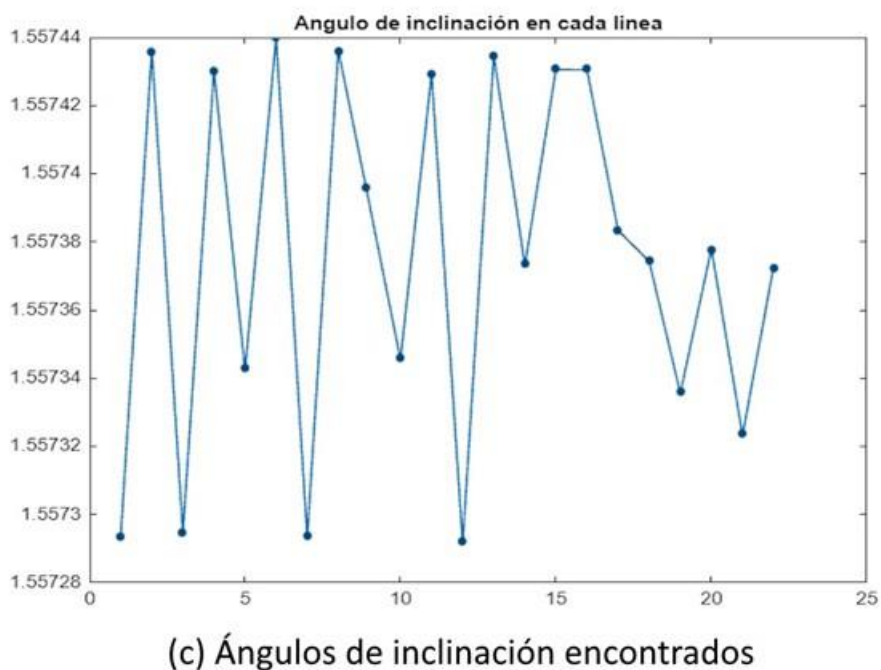
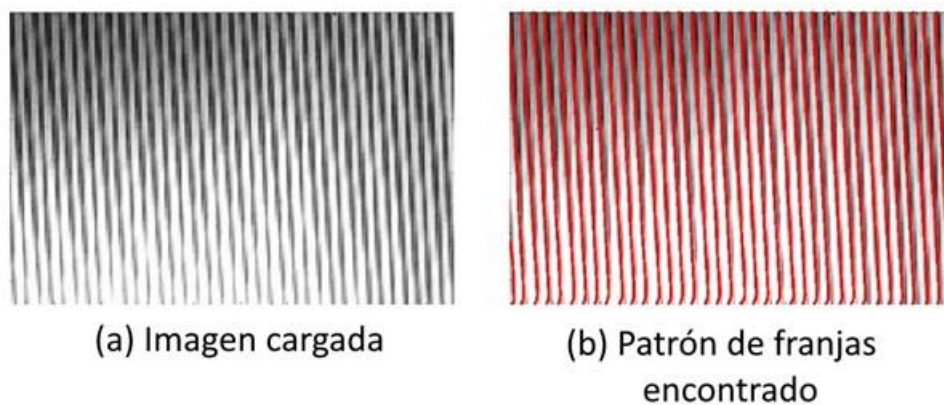
Fuente: Autor

Los resultados indican que el ángulo detectado es muy cercano a  $90^\circ$ , con una desviación estándar de cero. Esta prueba evidenció que el algoritmo detecta el ángulo de inclinación y la desviación estándar de manera muy precisa. En la práctica, este valor podría obtenerse si la prueba se realizara en un laboratorio de óptica sin corrientes de aire y en un medio casi ideal, lo cual es muy difícil de lograr con los recursos actuales. Por ello, se optó por realizar un tratamiento de imágenes utilizando un patrón de franjas ideales generado en MATLAB.

La segunda prueba correspondió a un compilado de tres imágenes, adquiridas en condiciones ambientales similares: la temperatura, la humedad y la velocidad del aire en el interior del laboratorio eran muy similares, ya que estas pruebas se realizaron de manera consecutiva, con una diferencia de aproximadamente un minuto entre ellas, a puerta cerrada, en el laboratorio de óptica de la UIS. A través de estas pruebas, se quiso determinar si existía una afectación significativa en la desviación estándar como resultado de utilizar diferentes resoluciones durante la adquisición de imágenes. Los resultados de este análisis se encuentran en la Tabla 5.

**Figura 14.**

*Tratamiento de imágenes, imagen 480x272.*

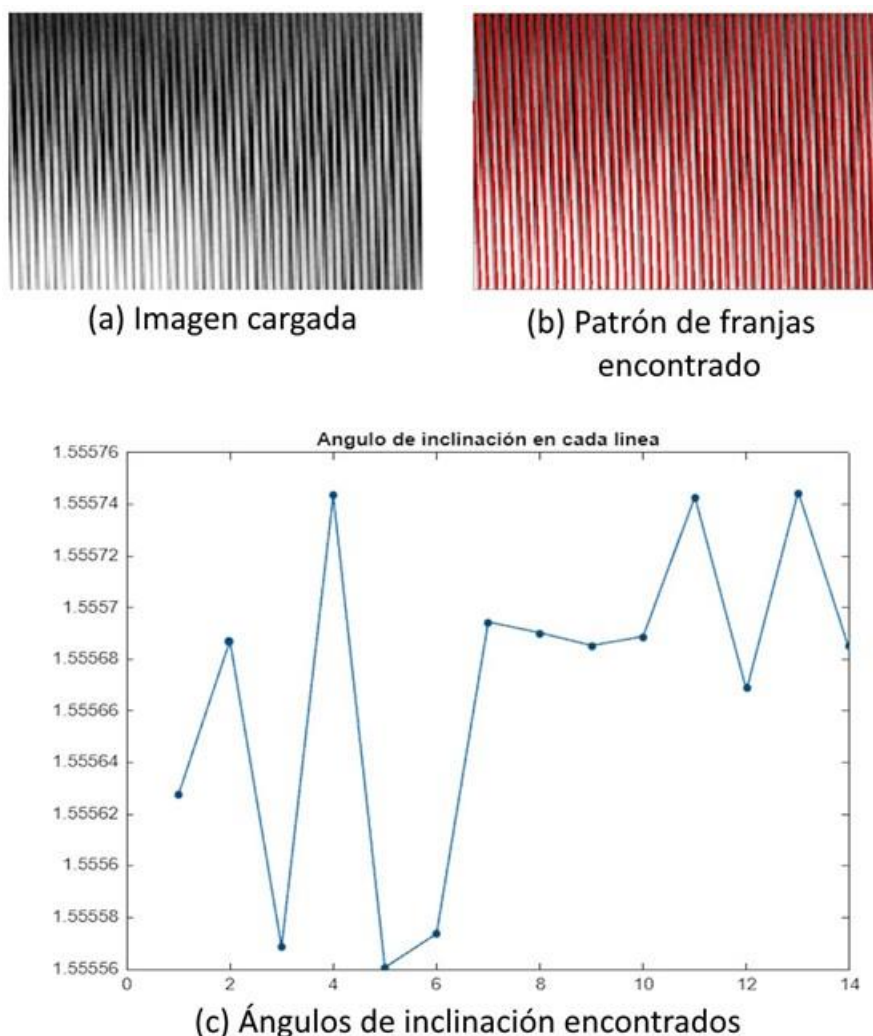


Fuente: Autor

Para obtener el resultado de la Figura 13, se realizaron cuatro capturas de imágenes, ya que la imagen se saturaba y los patrones de franjas se perdían en más de la mitad de la imagen. Sin embargo, en esta prueba se alcanzó un buen nivel de nitidez y saturación sin distorsionar la imagen, lo que permitió al algoritmo determinar con precisión cada una de las franjas presentes en la imagen captada. Los resultados de este tratamiento de imágenes, se encuentra en la tabla 5.

**Figura 15.**

*Tratamiento de imágenes, imagen 320x240*



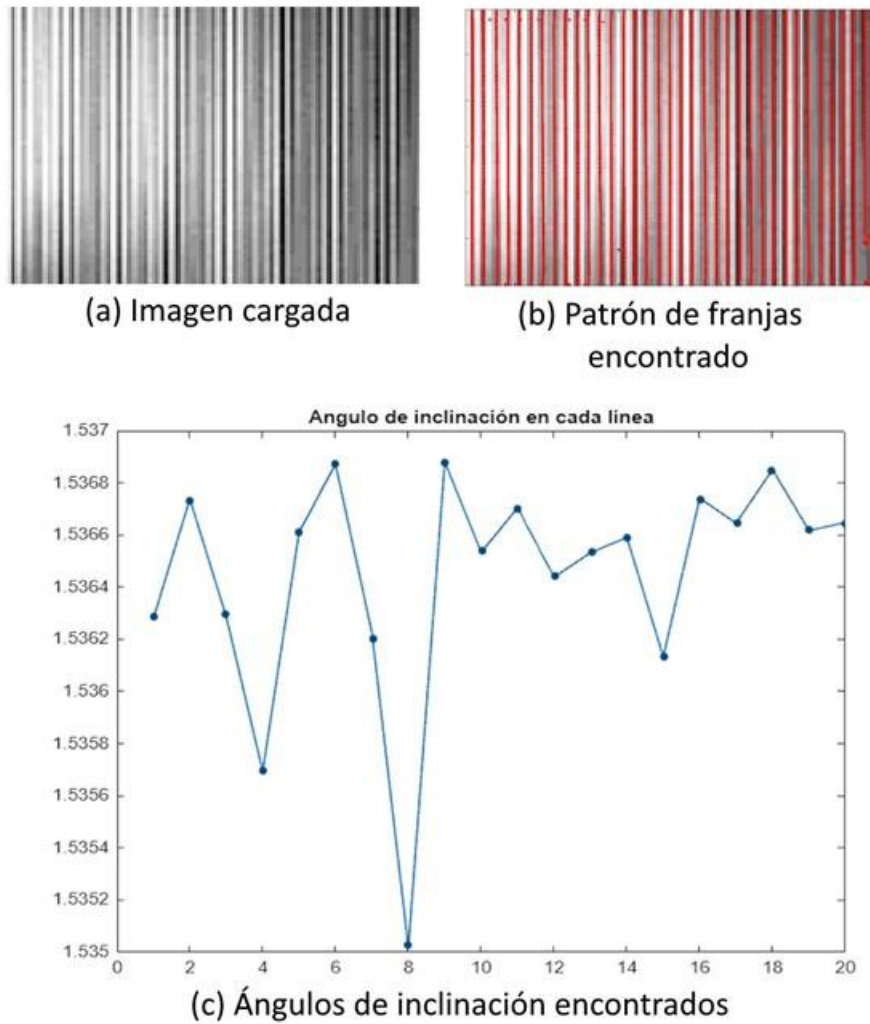
Fuente: Autor

La obtención de la muestra analizada en la Figura 14 requirió una sola toma, ya que no presentó el problema de saturación que se observa en la resolución de 480x272. Se destaca que, a pesar de ser la misma muestra con el mismo periodo espacial, se pueden ver más franjas debido a las diferencias en el área activa de los distintos modos y resoluciones. Para la resolución de 480x272 y superiores, se utiliza 1 píxel real para almacenar cada nivel de color, mientras que para las tomas de 320x240 e inferiores, el software utiliza un arreglo de píxeles para calcular el nivel

de color medio entre ellos. Por lo tanto, el área activa en la resolución de 480x272 y superiores es más pequeña que en resoluciones inferiores, permitiendo captar un menor número de franjas de interferencia. Los resultados de este tratamiento de imágenes, se encuentra en la tabla 5.

**Figura 16.**

*Tratamiento de imágenes, imagen 160x120*



Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en la Figura 16 no son fiables, puesto que las diferentes franjas se solaparon entre sí, debido a la baja resolución de la imagen, produciendo que el algoritmo interprete dicho solapamiento como una franja bien definida.

La Tabla 5 muestra los resultados de las pruebas ya mencionadas:

**Tabla 5.**

*Variables de interés, posterior al tratamiento de imágenes*

<b>Resolución</b>	<b>160x120</b>	<b>320x240</b>	<b>480x272</b>
Media del ángulo en radianes	1.53645	1.55567	1.55738
Media del ángulo en grados	88.0322	89.1332	89.2310
Desviación estándar	4.443e-04	6.304e-05	5.370e-05

Fuente: Autor.

De las dos primeras pruebas, se encontró que el ángulo de inclinación encontrado fue muy similar, y la desviación estándar tuvo valores relativamente cercanos con diferencias de una unidad en la quinta cifra significativa. Por lo tanto, se infiere que la resolución no afecta significativamente la medida de esta variable de interés. Sin embargo, en la resolución de 480x272 la mayoría de las muestras presentaron un nivel de saturación tal que más de la mitad de la imagen aparecía como una sombra negra, lo cual el algoritmo interpretaba como un error con valores infinitos de desviación estándar. A partir de estas pruebas, se recomienda utilizar la resolución de 480x272 y resoluciones superiores reduciendo el tiempo de exposición de la muestra para evitar la sobresaturación.

En trabajos futuros y para la resolución más baja de la cámara 160x120, sólo se puede obtener una toma fiable si se escoge un periodo espacial que evite la superposición de franjas. Aun así, esto no garantiza una buena calidad en la toma de muestras debido a la baja resolución, que provoca que el algoritmo de procesamiento de imágenes “cree” franjas donde no las hay, por lo que se deduce que esta resolución no es recomendable.

La resolución de 320x240 mostró el mejor desempeño en todas las pruebas: no se satura, el espacio de almacenamiento es considerablemente pequeño, y permite utilizar un rango amplio de periodos espaciales, específicamente entre 50 y 100  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, se recomienda el uso de esta resolución en trabajos futuros.

Con relación a la desviación estándar, se concluye que existe una relación entre esta medida y el nivel de turbulencia en el medio por el que viaja el haz del láser. En el caso del patrón de franjas ideales, la desviación estándar fue exactamente cero. Por lo tanto, la desviación estándar se presenta como una variable de interés crucial para la obtención de parámetros de la turbulencia en trabajos futuros.

## 6. Conclusiones

A partir de los resultados, se puede observar lo siguiente:

A partir del montaje óptico, se comprobó que la intensidad del haz de luz influye en la figura resultante, generando regiones oscuras, manchas claras y franjas indistinguibles. Por esta razón, fue necesario emplear un atenuador. Tras la implementación de la red de Ronchi, se sugirió y se determinó un rango adecuado para el tamaño de las franjas en el montaje experimental, teniendo en cuenta las características del sensor CMOS utilizado.

Posteriormente, se implementó el microcontrolador para la adquisición y almacenamiento de las imágenes de las franjas de interferencia. Se comprobó que dichas imágenes pueden utilizarse para calcular posteriormente los ángulos de inclinación y la desviación estándar.

Considerando los resultados de las etapas óptica y de adquisición, se observó que la resolución de 320x240 es una buena alternativa para el desarrollo de este proyecto. Se consideró

que la mencionada resolución logró un despliegue uniforme de franjas a lo largo de toda la imagen, evitando zonas completamente oscuras o muy pálidas, y con mínima pérdida de franjas. Por ello, se recomienda esta resolución para futuros trabajos.

Mediante el procesamiento de imágenes en Matlab, se obtuvo la desviación estándar de los ángulos de inclinación, y se teoriza que existe una relación entre esta medida y ciertos parámetros de turbulencia del medio por el que viaja el haz láser, teniendo en cuenta el cálculo de dicho parámetro en franjas ideales.

## **7. Trabajos futuros a partir de este proyecto**

El presente trabajo puede ser usado como parte del proceso de caracterización de los parámetros de turbulencia, teniendo en cuenta otras variables diferentes a la velocidad del aire, la humedad y la temperatura.

Este trabajo de grado puede marcar un punto de partida para un proyecto orientado en el tratamiento de imágenes realizado directamente en el microcontrolador, evitando la etapa del procesamiento usando un PC y un software como Matlab.

Este trabajo de grado puede ser un punto de referencia en la comparación de la exactitud de los ángulos hallados, así como de la desviación estándar, comparando el análisis en el dominio de Fourier con el uso de redes neuronales.

Por último, este proyecto de grado puede marcar un precedente en la viabilidad de usar este microcontrolador, para cambiar los elementos del laboratorio de óptica.

### Referencias

- Álvarez, M. L., Márquez, A., Puerta, L. A., Estévez, R., Fernandez-Varo, H., Beléndez, A., & Pascual, I. (2007). Caracterización de una pantalla de cristal líquido de baja resolución para su uso como modulador óptico.
- Andovercorp Optical, Standard & Custom Optical Filters and Coatings, catalog 2021, pag. 31. Disponible en línea en: [https://www.andovercorp.com/content/uploads/2021\\_Catalog\\_Rev4.pdf](https://www.andovercorp.com/content/uploads/2021_Catalog_Rev4.pdf).
- Andrews, Larry C.; Phillips, Ronald L. Laser beam propagation through random media. Bellingham, WA: SPIE press, pp. 478, 2005.
- Aranda, A. M. T., & López, J. C. (2015). Manual de teoría y prácticas de óptica geométrica (Vol. 7). Ediciones de la Universidad de Castilla La Mancha.
- ArduCAM. (s.f.). OV9655 1/4" CMOS UXGA (1632x1232) image sensor with OmniPixel technology. [https://www.arducam.com/downloads/modules/OV9655/ov9655\\_full.pdf](https://www.arducam.com/downloads/modules/OV9655/ov9655_full.pdf)
- ARM Developer, Consultado en Internet el 28 de noviembre de 2023. URL: <https://developer.arm.com/documentation/102787/latest>
- Consortini, A.; Sun, Y. Y.; Innocenti, C. and Li, Z. P. “Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation,” Opt. Commun., vol. 216, no. 1–3, pp. 19–23, 2003.
- Dixson, G. “Reducción de costos con un Sistema de automatización integrado”, Dirección de Electrónica Industrial en Phoenix, EEUU, 2011. [Online]. Disponible: <http://www.isa.org>
- Instituto NCB, Conociendo el Microcontrolador ARM MSP432P401, un Cortex-M4f de Texas Instruments. Consultado en Internet el 28 de noviembre de 2023.

<https://newtonbraga.com.mx/index.php/component/content/article?id=1722:conociendo-el-microcontrolador-arm-msp432p401-un-cortex-m4f-de-texas-instruments-mic012s>

Longair, Malcolm S. La evolución de nuestro universo. Ediciones AKAL, pp.27-29, pp. 32-35, 1999.

Muñoz Valero, A.. Principios de color y holopintura. Editorial Club Universitario, pp 34 - 35, 2013.

Newport Corporation. (s.f.). DS-10920 HeNe Laser.  
[https://www.newport.com.cn/medias/sys\\_master/images/images/h58/hf1/9213571760158/DS-10920-HeNe-Laser.pdf](https://www.newport.com.cn/medias/sys_master/images/images/h58/hf1/9213571760158/DS-10920-HeNe-Laser.pdf)

Rastogi, Pramod; HACK, Erwin (ed.). Phase estimation in optical interferometry. Section Fourier Fringe Demodulation by Takeda Mitsuo (pp. 1-30). CRC Press, 2014.

Reyes Resta, M. Á. (2017). Programación de microcontroladores Cortex-M7 usando herramientas de generación de código para el sistema STM32F7 Discovery. (pp. 27-57).

Sandoval, A. G., Tijero, O. J., & Moreno, Y. T. (2019, April). Acquisition and storage of optical interference fringes by means of an embedded system. In 2019 XXII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA) (pp. 1-5).

Takeda, Mitsuo; Ina, Hideki; Kobayashi, Seiji. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. Josa A, 1982, vol. 72, no 1, p. 156-160.

Tresanchez, M., Pujol, A., Pallejà, T., Martínez, D., Clotet, E., & Palacín, J. (2018). A proposal of low-cost and low-power embedded wireless image sensor node for IoT applications. Procedia computer science, 134, 99-106