

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN  
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**



## **Tesis**

**Desarrollo e implementación de un prototipo opto-mecánico de  
caracterización de superficies para el análisis de discos de freno  
automotrices**

Presenta: Ing. Fernando Daniel Aguirre Sagaón.\*

Asesora: Dra. Luz del Carmen Gómez Pavón.

Co-asesores: Dr. Germán Ardul Muñoz Hernandez.

Dra. Carolina Rickenstorff Parrao.

Dr. Carlos Ignacio Robledo Sánchez.

\*Becario CONACYT

Puebla, Pue. Diciembre 2024

# **Jurado**

Dr. Richard Torrealba Melendez

Presidente

M.C. Rodrigo Lucio Maya Ramírez

Secretario

Dr. José Eligio Moisés Gutiérrez Arias

Vocal

# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre, a mi hermana, y a mis sobrino. Su apoyo y amor me han dado la fuerza para seguir adelante a pesar de la adversidad. Gracias por estar siempre a mi lado, animándome en cada paso y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mis asesores, agradezco su valiosa orientación, paciencia, y sabiduría. Su guía ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo y me han inspirado a superarme en mi desarrollo tanto profesional como personal.

A mis amigos y compañeros de la maestría, con quienes no solo conviví como profesionalista, sino como persona. Todos esos momentos, tanto agradables como estresantes, siempre estarán grabados en mi memoria.

A la universidad, agradezco por brindarme las herramientas y la perspectiva con la cual he desarrollado mis habilidades profesionales. Este trabajo no solo es el resultado de mi esfuerzo, sino también del apoyo que he recibido a lo largo de mi formación.

Y finalmente, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, por la beca brindada durante los 2 años que duró mi maestría.

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción . . . . .	2
1.2 Justificación . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.3.1 Objetivo general . . . . .	3
1.3.2 Objetivos específicos . . . . .	3
1.4 Estado del arte . . . . .	4
1.4.1 Térmicos . . . . .	4
1.4.2 Sensores electromecánicos . . . . .	4
1.4.3 Procesamiento de imágenes . . . . .	4
1.4.4 Ópticos . . . . .	4
1.5 Marco teórico . . . . .	5
1.5.1 Fundamentos de óptica . . . . .	5
1.5.2 Teoría de control clásico . . . . .	12
<b>2 Descripción experimental</b>	<b>19</b>
2.1 Descripción general . . . . .	20
2.2 Análisis de vibraciones del disco . . . . .	21
2.2.1 Estudio de frecuencias del disco de freno . . . . .	21
2.3 Sistema de interferometría . . . . .	23
2.3.1 Arreglo óptico . . . . .	23
2.3.2 Diseño e implementación del mecanismo de impacto . . . . .	26
2.3.3 Diseño y evaluación del sistema de adquisición de datos ópticos . . . . .	28
2.4 Sistema de control . . . . .	32

2.4.1	Diseño y manufactura de una estructura metálica para sostener al disco de freno . . . . .	32
2.4.2	Elección del actuador para la rotación del disco . . . . .	33
2.4.3	Diseño e implementación de un tacómetro para la caracterización del actuador . . . . .	34
2.4.4	Diseño de un controlador por retroalimentación de salida. . . . .	36
2.4.5	Simulación del sistema y controlador . . . . .	39
2.4.6	Programación del módulo CP1103 . . . . .	41
2.4.7	Etapa de potencia . . . . .	42
2.4.8	Conexión con el módulo CP1103 . . . . .	43
2.5	Desarrollo del sistema de análisis de la información obtenida . . . . .	46
2.5.1	Caracterización de las zonas del disco . . . . .	46
2.5.2	Selección de píxeles . . . . .	50
2.5.3	Toma de fotografías respecto a la posición del disco . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>56</b>
3.1	Sistema de control de velocidad y monitoreo de la posición . . . . .	56
3.2	Sistema de control para la toma de fotos . . . . .	58
3.3	Análisis de las vibraciones del disco . . . . .	59
3.4	Análisis de los patrones de moteado . . . . .	61
	<b>Conclusión</b>	<b>66</b>
	<b>Anexos</b>	<b>67</b>
	Constancia de primera publicación. . . . .	67
	Constancia de acreditación del idioma inglés. . . . .	68
	<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Esta sección describe los objetivos a alcanzar en este trabajo, junto a los aspectos teóricos a utilizar para lograr dichos objetivos. Igualmente, se presentan trabajos previos a este, que presentan el mismo concepto, pero utilizando métodos de análisis distintos al elegido.

### Contenido

---

<b>1.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificación</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
1.3.1	Objetivo general	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
<b>1.4</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>4</b>
1.4.1	Térmicos	4
1.4.2	Sensores electromecánicos	4
1.4.3	Procesamiento de imágenes	4
1.4.4	Ópticos	4
<b>1.5</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>5</b>
1.5.1	Fundamentos de óptica	5
1.5.2	Teoría de control clásico	12

---

## 1.1. Introducción

Como uno de los componentes más importantes de un automóvil, el sistema de frenos juega un papel importante para garantizar la seguridad del conductor y los pasajeros. Los discos de freno están sujetos a una gran tensión y desgaste mientras el vehículo está en movimiento, por lo que asegurar que su estado sea el correcto es de gran importancia para la prevención de accidentes.

El uso de tecnología de medición óptica permite mejorar el proceso de inspección de los discos de freno. En particular, la aplicación de la interferometría ofrece el potencial de mejorar la inspección de los discos de freno debido a su naturaleza precisa y sin contacto.

El propósito de esta tesis es diseñar un dispositivo que pueda adquirir información acerca de la superficie de un disco de freno, utilizando la interferometría por patrón de moteado como método de escaneo. Puesto que el dispositivo hará girar al disco, éste deberá tener un control para su velocidad y poder determinar su posición, para que con una cámara se registre el patrón de moteado de cada parte del disco de forma precisa.

En general, este trabajo busca la elaboración de un dispositivo con mayores beneficios en la inspección de discos de freno que los existentes actualmente. Esto apoyándose de la interferometría por patrón de moteado como método de escaneo, y de un sistema de control de la rotación del disco con el fin de analizar la mayor parte posible de dichos discos.

Este trabajo fue realizado en colaboración con la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Su Laboratorio de Interferometría proveyó tanto el equipo óptico, como su tiempo y dedicación para realizar los experimentos concernientes a la parte óptica.

## 1.2. Justificación

Como fue planteado previamente, las fallas en los automóviles toman un papel considerable en el número de accidentes reportados al año en México [1], siendo este el primer motivo por el cual se realiza esta tesis. Diseñar un dispositivo que asegure la integridad de los discos de freno ayudaría a la reducción en el número de accidentes vehiculares, asegurando el bienestar físico de muchas personas.

Con el desarrollo de este prototipo se abrirían muchas ventanas de oportunidad, tanto para la investigación como para el sector industrial, siendo este el segundo motivo de este trabajo. Dada la relevancia económica, social y tecnológica de la industria automotriz en México, existen varias empresas dedicadas a la manufactura de los elementos de este ramo. En el caso de las que se dedican a la creación de discos de freno, estas deben de asegurar que sus productos cumplan con las normativas de seguridad necesarias para su venta, tales como la NMX-D-315-IMNC-2015 (Material de fricción para sistema de frenos) [2], o la ECE R90 (Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailers) [3]. Esperamos que esta tesis sea un nicho de oportunidad tanto para el ámbito académico como para la industria.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Desarrollar un prototipo de caracterización óptica de superficies de discos de frenado automotrices usando un sistema de control para la manipulación de dichos discos, y el análisis e interpretación de los datos obtenidos.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- 1) Incorporar la electrónica necesaria para el funcionamiento del sistema de interferometría que analiza las superficies del disco de freno.
- 2) Diseñar un sistema de control para los sensores de medición y el movimiento del disco de frenado, con el fin de asegurar la correcta adquisición de los datos.
- 3) Obtener las imágenes para que sean interpretadas y determinar el estado del disco.

## 1.4. Estado del arte

En el estudio de los discos de freno, y de manera más general en el análisis de superficies, se han desarrollado diversos métodos de caracterización.

### 1.4.1. Térmicos

De manera general estos métodos consisten en someter a estrés a los discos y recabar información relacionada al desgaste a partir de sus lecturas térmicas. En [4] se estudian los "puntos calientes" que se forman en los elementos mecánicos al someterse a estrés y se clasifican dependiendo de sus propiedades. En [5] se realizaron pruebas independientes usando cámaras infrarroja, pirómetros y termopares para la caracterización de los discos de freno.

### 1.4.2. Sensores electromecánicos

Estos métodos aprovechan las propiedades mecánicas de los materiales, específicamente sus frecuencias de resonancia, y determinan cuáles son las frecuencias en las que un elemento en buen estado debe vibrar. Esta metodología fue aplicada en Polonia [6], donde se determina la frecuencia de resonancia de los componentes del disco en un plano, y posteriormente fue extendida a tres planos en [7].

### 1.4.3. Procesamiento de imágenes

Se basan en analizar y determinar el estado del elemento usando fotografías o vídeo. La elección del método depende de 3 factores: el tiempo, los elementos de computación disponibles y la precisión deseada. En Italia se desarrolló un método [8] que ocupa un sistema de visión basado en una cámara de alta velocidad adquiriendo las características de la superficie para evaluar al disco. Otro método apoyado por IAs [9] está basado en el "Deep Learning", siendo más eficaz en la recolección y análisis de información, pero demanda más recursos computacionales.

### 1.4.4. Ópticos

Estos métodos aprovechan las propiedades de amplitud y fase de la luz para recabar información del objeto bajo estudio. La ventaja que ofrecen estos métodos radica en no ser destructivos y poseer resolución espacial alta. En [10] se desarrolló un método que consiste en aplicar un impulso mecánico para que un vibrómetro láser midiera la velocidad del elemento y detectara la respuesta del sistema.

El método que es de relevancia para esta tesis está basado en la interferometría electrónica de patrón de moteado (ESPI) [11]. Dicho método identifica daños apenas visibles extrayendo información de los patrones de moteado, que son analizados por computadora, brindando información detallada de las superficies analizadas.

## 1.5. Marco teórico

### 1.5.1. Fundamentos de óptica

La luz ha sido objeto de estudio desde hace siglos, desde los 500 a.C. con Pitágoras que pensaba que nuestros ojos transmitían rayos que nos hacían capaces de ver objetos, hasta el siglo XX con Max Planck y Niels Bohr dando las bases para la mecánica cuántica y el fotón. Podemos destacar a 2 figuras muy importantes en el desarrollo de la óptica, los físicos Sir Isaac Newton y Thomas Young. El 19 de febrero de 1671, Newton escribió una carta [12] a la Royal Society of London, describiendo a la luz como un fenómeno de partículas, lo cual le permitió explicar 2 de los fenómenos más relevantes para la óptica, mostrados en la Fig. 1.1:

**Reflexión:** el cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre en un mismo medio después de incidir sobre la superficie de un medio distinto.

**Refracción:** el cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre tras pasar de un medio a otro propagándose con distinta velocidad.

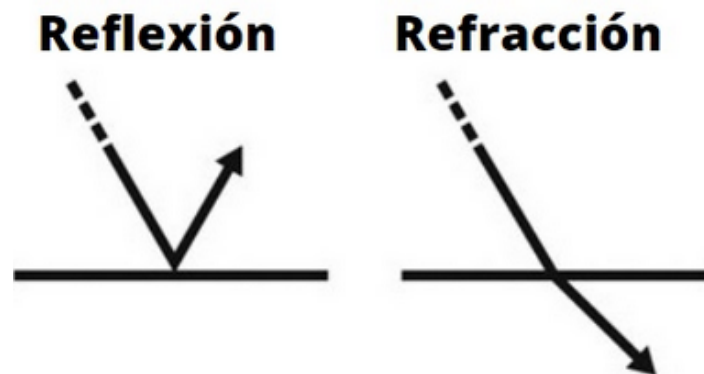


Figura 1.1: Reflexión y Refracción

No fue hasta los años 1800's que Thomas Young presentó una serie de conferencias también a la Royal Society of London, declarando a la luz como un fenómeno ondulatorio, pudiendo explicar 2 fenómenos que no podían ser explicados con la teoría de Newton, mostrados en la Fig. 1.2:

**Difracción:** la desviación de una onda causada por la interacción de esta con los bordes de una abertura.

**Interferencia:** fenómeno en el que dos o más ondas se superponen, provocando en ellas cancelación o amplificación, creando un patrón de amplitud variable.

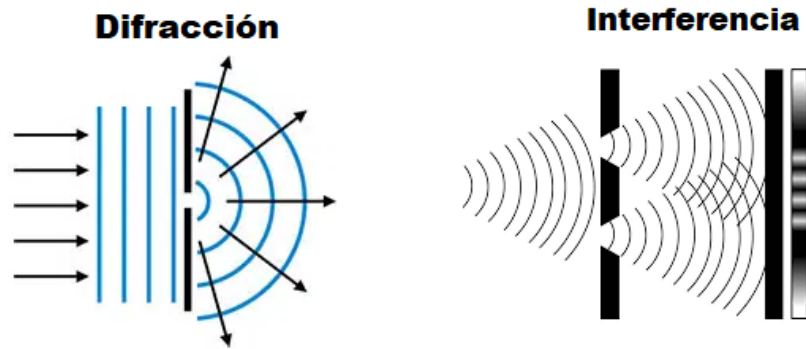


Figura 1.2: Difracción e Interferencia

En su carácter de onda, la luz tiene 2 parámetros intrínsecos su longitud de onda  $\lambda$ , y su velocidad de propagación en el vacío  $c=299,792,458$  m/s, donde su frecuencia queda definida como  $\nu = c/\lambda$ .

En particular, la resolución del problema planteado en esta tesis se basa en el fenómeno de **Interferencia**.

### Interferencia

La interferencia se refiere a la superposición de dos o más ondas en el espacio. James Clerk Maxwell estableció que la luz es una onda electro-magnética, cuyas componentes eléctrica (**E**) y magnética (**H**) son transversales entre si y a la dirección de propagación, como se muestra en la Fig. 1.3. Por el resto de este trabajo, cuando se haga referencia a las ondas de luz, será exclusivamente a la componente eléctrica.

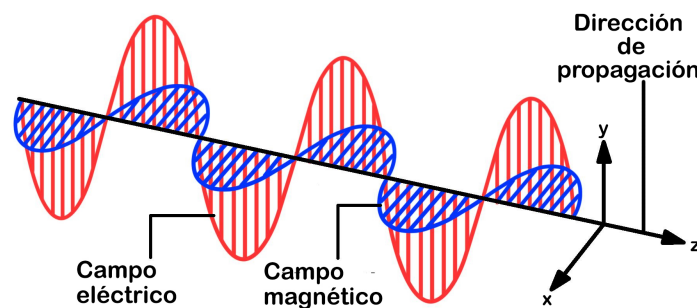


Figura 1.3: Campo eléctrico y magnético.

Cuando 2 ondas se superponen, se genera el fenómeno conocido como **patrón de interferencia**. Para que la interferencia ocurra es necesario que las ondas de luz cumplan las siguientes condiciones:

- Que éstas sean monocromáticas.
- Que sean coherentes.
- Que tengan el mismo estado de polarización.

A continuación se explicarán brevemente cada uno de estos conceptos. El que una onda sea monocromática significa que esta tiene una sola frecuencia, que puede ser descrita matemáticamente como una onda cosenoidal que depende del tiempo y del espacio. La coherencia mide el parecido estadístico de 2 ondas en 2 puntos separados en el espacio/tiempo. Las fuentes de luz naturales tienen un bajo grado de coherencia, debido a que proviene de fuentes térmicas, en donde los electrones oscilan aleatoriamente. Por otro lado, un láser es una fuente de luz que posee alta coherencia debido al modo en que se excita a los átomos del material usado para emitir su luz. Todo esto es ilustrado en la Fig. 1.4

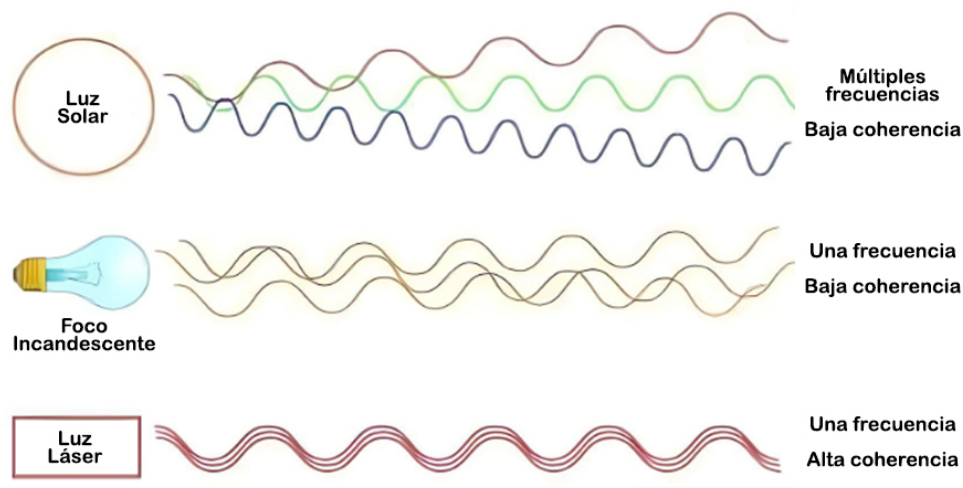


Figura 1.4: Ilustración los fenómenos de coherencia y de monocromaticidad.

La polarización se refiere a la dirección de oscilación del campo eléctrico en propagación; pudiéndose encontrar polarización circular, elíptica, lineal, etc. Hay materiales que pueden seleccionar un estado de polarización, un ejemplo es la película Polaroid. Este fenómeno es ilustrado en la Fig. 1.5

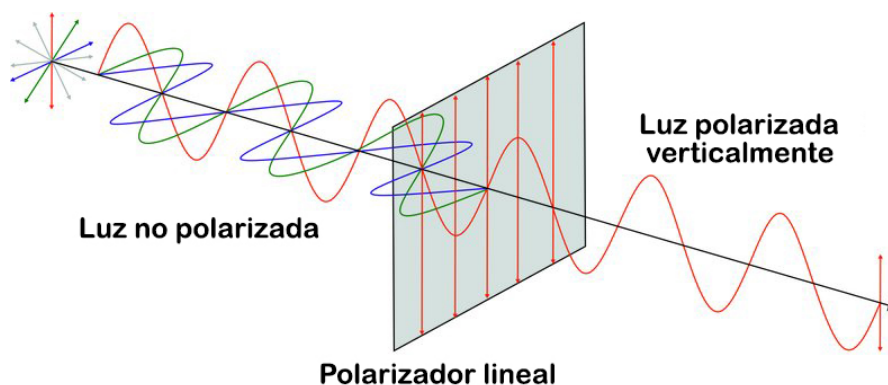


Figura 1.5: Ilustración de la discriminación de los campos eléctricos de un haz de luz parcialmente polarizado utilizando un polarizador.

El modelo matemático del fenómeno de interferencia de describirá a continuación. Considere 2 ondas linealmente polarizadas de la misma frecuencia que se propagan en el espacio, cuyos vectores eléctricos están dados por:  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$  [13].

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (1.1)$$

Siendo:

$\mathbf{k}$ : constante de propagación de la onda, igual a  $\frac{2\pi}{\lambda}$

$\mathbf{r}$ : vector de posición en coordenadas Cartesianas  $x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$

$\omega$ : frecuencia temporal  $\frac{rad}{s}$ .

$t$ : tiempo en segundos.

$\varepsilon$ : fase inicial de la onda.

En algún punto  $P$ , definido por el vector  $\mathbf{r}$ , las ondas intersectan para producir una perturbación cuyo campo eléctrico  $\mathbf{E}_P$  está dado por:

$$\mathbf{E}_P = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (1.2)$$

Ahora,  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$  son funciones que varían muy rápidamente, con frecuencias en el orden de  $10^{14}$  a  $10^{15}$  Hz para la luz visible. De este modo ambas  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$  promedian a cero en intervalos de tiempo muy cortos. La medición de las ondas por el efecto que tienen en el ojo o en cualquier otro detector depende de la energía de el haz de luz. La irradiancia mide el promedio del cuadrado de la amplitud de la onda, siendo sus unidades  $\frac{W}{m^2}$ . La irradiancia se expresa como:

$$I = \epsilon_0 c \langle \mathbf{E}^2 \rangle \quad (1.3)$$

Siendo:

$\epsilon_0$ : la permitividad del vacío ( $8.854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ ).

$c$ : la velocidad de la luz ( $2.998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ).

$\langle \cdot \rangle$ : el promedio temporal.

De este modo, la irradiancia resultante en el punto  $P$  está dada por:

$$I_P = \epsilon_0 c \langle \mathbf{E}_P^2 \rangle = \epsilon_0 c \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \rangle = \epsilon_0 c \langle \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \rangle \quad (1.4)$$

Esta expresión puede reescribirse como:

$$I_P = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (1.5)$$

Siendo:

$I_P$ : irradiancia total.

$I_1, I_2$ : las irradiancias de cada onda.

$I_{12}$ : expresión conocida como **término de interferencia**.

La presencia del término  $I_{12}$  es un indicativo de la naturaleza ondulatoria de la luz. Nótese que cuando  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$  son ortogonales en su dirección de polarización su producto punto

desaparece y no hay interferencia resultante, y cuando los campos eléctricos son paralelos, el término de interferencia alcanza su máximo. El término de interferencia está definido como:

$$I_{12} = 2\epsilon_0 c \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle \quad (1.6)$$

Desarrollando el producto punto se obtiene:

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (1.7)$$

La expresión anterior puede ser simplificada al expandir los factores cosenoidales, para esto, se define:

$$\alpha = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1 \quad y \quad \beta = \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2 \quad (1.8)$$

Quedando:

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \quad (1.9)$$

Expandiendo y multiplicando los factores cosenoidales, se llega a:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle &= \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} [\cos \alpha \cos \beta \langle \cos^2 \omega t \rangle + \sin \alpha \sin \beta \langle \sin^2 \omega t \rangle \\ &+ (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle] \end{aligned} \quad (1.10)$$

Puesto que los términos que dependen del tiempo son demasiado rápidos (considerando la luz visible), su promedio temporal se puede reducir a:

$$\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}, \quad \langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}, \quad \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0 \quad (1.11)$$

Sustituyendo lo encontrado en la Ecuación (11) en la Ecuación (10), se obtiene:

$$\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos(\alpha - \beta) = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \quad (1.12)$$

Ahora, el argumento del coseno se conoce como la **diferencia de fases** entre  $\mathbf{E}_1$  y  $\mathbf{E}_2$ , y se puede reescribir como:

$$\delta = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (1.13)$$

Así, el término de interferencia puede ser escrito como:

$$I_{12} = \epsilon_0 c \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos \delta \quad (1.14)$$

De manera similar, las irradiancias  $I_1$  y  $I_2$  pueden expresarse como:

$$I_1 = \epsilon_0 c \langle \mathbf{E}_1^2 \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c \mathbf{E}_{01}^2 \quad y \quad I_2 = \epsilon_0 c \langle \mathbf{E}_2^2 \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 c \mathbf{E}_{02}^2 \quad (1.15)$$

Considerando el caso en que los componentes  $\mathbf{E}_{01}$  y  $\mathbf{E}_{02}$  son paralelos en polarización, su producto punto es igual al producto de sus magnitudes, haciendo que el término de irradiancia pueda ser reescrito como:

$$I_{12} = 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1.16)$$

Y la irradiancia total se escribiría como:

$$I_P = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1.17)$$

Si  $\cos \delta > 0$ , se obtendrá interferencia constructiva, y si  $\cos \delta < 0$  entonces será interferencia destructiva, siendo entonces que la irradiancia máxima y mínima pueden ser expresadas como:

$$I_{Pmax} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad y \quad I_{Pmin} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (1.18)$$

Por último, considérese que si  $I_1 = I_2 = I_0$ , entonces la irradiancia total se describe como:

$$I_P = 2I_0 + 2\sqrt{I_0^2} \cos \delta = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) \quad (1.19)$$

De la ecuación anterior, se puede observar que la irradiancia total va a variar dependiendo del ángulo  $\delta$ , tomando valores desde 0 hasta  $4I_0$ .

### Análisis de superficies por interferometría de moteado

Los métodos de análisis interferométricos están basados en el fenómeno de la interferencia. Un caso particular de patrón de interferencia es el conocido como moteado o "speckle". Un patrón de moteado se produce cuando luz coherente es reflejada o dispersada desde una superficie o medio esparcidor.

Considérese una superficie que es rugosa en la escala de la longitud de onda de la luz incidente, cuando esto ocurre, las ondas reflejadas tienen la misma frecuencia, pero adquieren diferentes fases y/o amplitudes. Como resultado, un punto en el plano de observación es iluminado por muchas ondas que llegan desde diferentes puntos de la superficie esparcidora como se muestra en la Fig. 1.6.

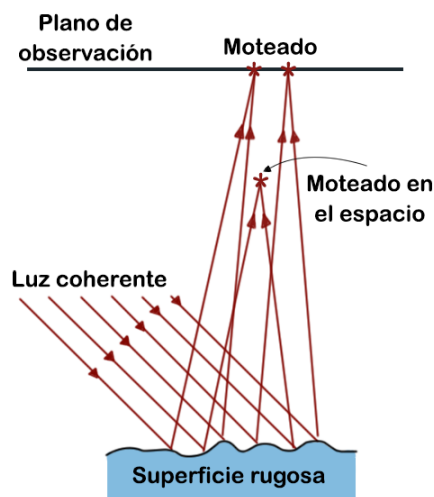


Figura 1.6: Formación de moteado en un plano de observación

La intensidad resultante en un punto está determinada por la adición coherente de las ondas asociadas a la luz reflejada por diferentes puntos del objeto. La intensidad de la luz

en el plano de observación varía espacialmente de un punto a otro y es la causa de la formación de los patrones característicos que son observados al utilizar luz láser. Estos patrones pueden analizarse matemáticamente a través de sus propiedades estadísticas [14].

Una técnica específica de interferometría es la interferometría por patrón de moteado electrónica (ESPI, por sus siglas en inglés). Esta técnica se apoya de equipo electrónico, optoelectrónico y algoritmos computacionales para obtener y analizar la información contenida en los patrones de moteado como se muestra en la Fig.1.7.

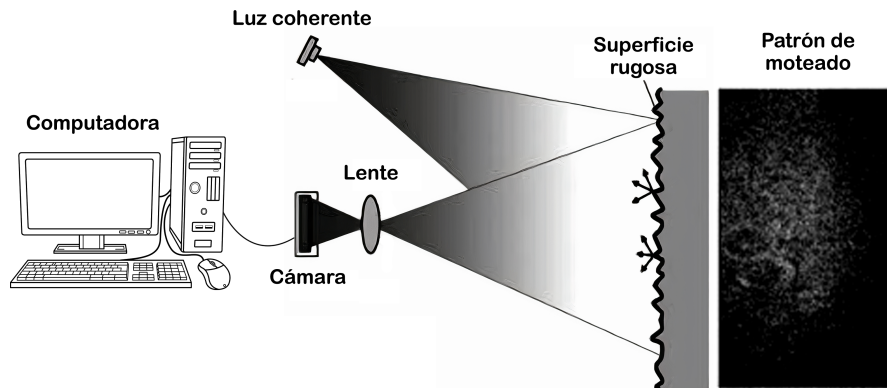


Figura 1.7: Elementos básicos de un sistema ESPI

### Interferómetro de Mach-Zehnder

El interferómetro Mach-Zehnder es un instrumento de medición óptica. Este instrumento divide el haz de un láser (con el fin de obtener 2 haces con la misma longitud de onda, coherentes, y con el mismo estado de polarización), para después hacerlos rebotar en 2 espejos y finalmente recombinar dichos haces dentro de otro cubo divisor. Su configuración básica se puede ver en la Fig. 1.8

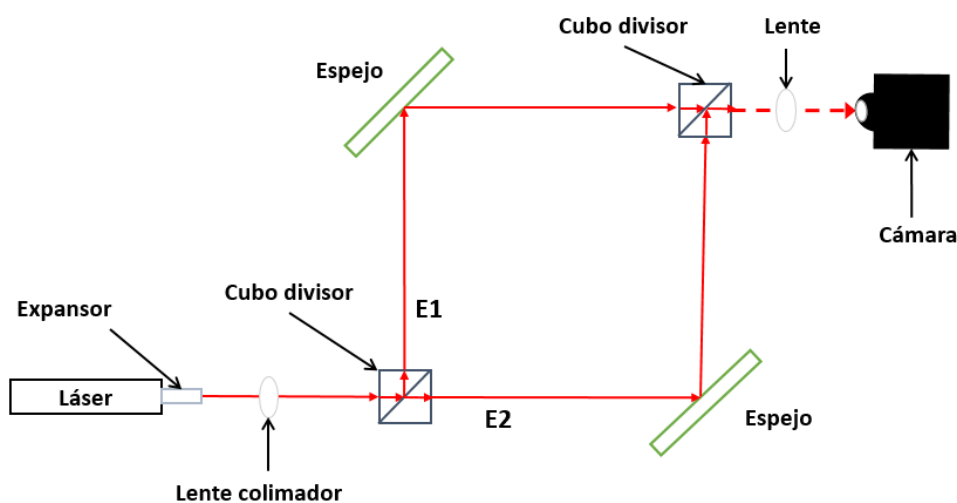


Figura 1.8: Configuración estándar de un interferómetro Mach-Zehnder

El espaciado de las franjas de interferencia se controla variando el ángulo entre los haces que emergen del interferómetro, cambiando la posición del cubo divisor. El interferómetro Mach-Zehnder tiene dos características atractivas. Una es que los caminos ópticos están ampliamente separados y se tocan solo una vez. La otra es que los haces se puedan combinar no dentro de un cubo divisor, sino que estos reboten en una superficie que funciona como espejo. De este modo los haces se recombinan durante la propagación, obteniendo así información de dicho objeto de prueba.

### 1.5.2. Teoría de control clásico

La teoría de control clásico es una rama de la ingeniería que surge de la necesidad de poder controlar el comportamiento de diferentes sistemas, tales como sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos, etc.

Antes de analizar los sistemas de control, deben definirse ciertos términos básicos [15].

- Variable controlada: la cantidad o condición que se mide y controla.
- Variable manipulada: cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
- Controlar: Medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir del valor deseado.
- Planta: puede ser una parte de un equipo o un conjunto de partes de una máquina que funcionan juntas con el propósito de ejecutar una operación particular.
- Proceso: operación o desarrollo natural continuo, marcado por una serie de cambios graduales controlados que son sucesivos y que conducen a un resultado determinado.
- Sistema: combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.
- Perturbación: señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema.
- Señal de error: la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación.

Una vez definido esto, se procederá a explicar lo que es la retroalimentación en los sistemas, y como dependiendo de la dinámica de dichos sistemas, la retroalimentación afecta la respuesta de estos.

### Retroalimentación

. Un sistema dinámico es un sistema que cambia su comportamiento en relación con el tiempo, generalmente en respuesta a estímulos externos o a un esfuerzo. Los sistemas se pueden clasificar en 2 tipos, sistemas en lazo abierto o en lazo cerrado [16].

Los sistemas en lazo abierto son aquellos en los que no se mide el valor de la salida, por lo que los sistemas que estén trabajando juntos solo son controlados por el valor de la entrada [15], tal como se ilustra en la Fig. 1.9.

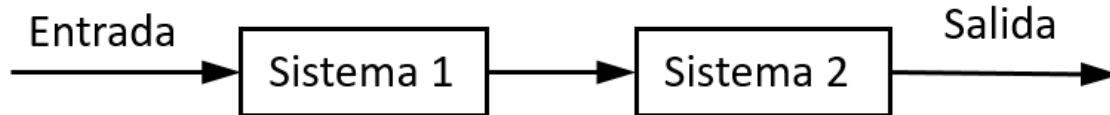


Figura 1.9: Ejemplo de sistemas que trabajan en lazo abierto

Los sistemas en lazo cerrado también son denominados sistemas retroalimentados [15], y en la práctica ambos términos se usan indistintamente.

El término retroalimentación se refiere a una situación en la que dos (o más) sistemas dinámicos están conectados a modo que la dinámica de uno influencia al otro y viceversa, lo que conduce a un argumento cíclico [16]. Esto complica el uso de un razonamiento basado en causa y efecto y requiere que todos los sistemas se analicen como uno solo. Una consecuencia de esto es que el comportamiento de los sistemas retroalimentados a menudo es contra intuitivo y uno debe recurrir a métodos formales para entenderlos, y se muestra un ejemplo de estos sistemas en la Fig. 1.10.

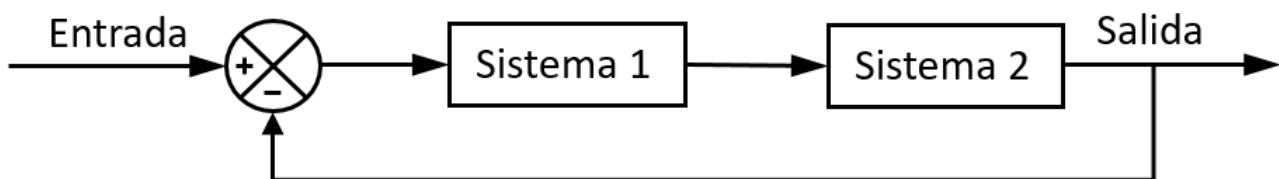


Figura 1.10: Ejemplo de sistemas que trabajan en lazo cerrado

La retroalimentación tiene el fin de reducir el error entre el valor deseado de entrada y el valor obtenido a la salida. Sin embargo, puede crear inestabilidades dinámicas en un sistema, causando oscilaciones o incluso comportamiento descontrolado. Otra desventaja es que la retroalimentación puede introducir ruido indeseado a través de los sensores implementados, requiriendo un filtrado en las señales. Es por estas razones que una porción substancial del estudio de la retroalimentación está dedicada al desarrollo y entendimiento de la dinámica de los sistemas y a las de sistemas dinámicos.

## Control

El término control puede definirse como el uso de algoritmos y retroalimentación en sistemas diseñados [16]. Este lazo de retroalimentación básico es el punto clave en la teoría de control. Apoyados de la retroalimentación, los sistemas de control buscan que la salida del sistema con el que se está trabajando tenga una respuesta acorde a las necesidades que se tengan.

Un sistema de control detecta el funcionamiento de un sistema, lo compara con el comportamiento deseado, calcula las acciones correctivas basadas en un modelo de la respuesta del sistema a las entradas externas y acciona el sistema para efectuar el cambio deseado.

Los puntos clave en el diseño de control son el garantizar que la dinámica del sistema de lazo cerrado sea estable (que las perturbaciones acotadas den errores acotados), y que tengan un comportamiento adicional deseado (buena atenuación de perturbaciones, respuesta rápida a cambios en el punto de funcionamiento, etc). Estas propiedades se establecen utilizando una variedad de técnicas de modelado y análisis que capturan la dinámica esencial del sistema y permiten la exploración de posibles comportamientos en presencia de incertidumbre, ruido y falla de componentes. Un ejemplo de control por lazo cerrado se ilustra en la Fig. 1.11.

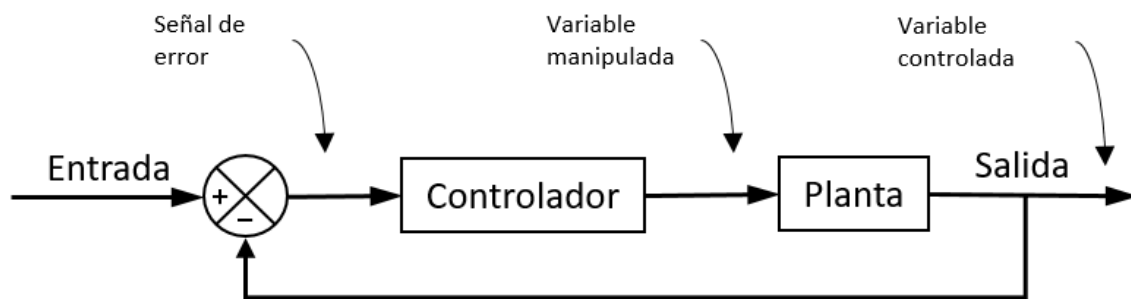


Figura 1.11: Ejemplo de un sistema de control por lazo cerrado

### Acciones del control

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia, determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control [15].

Hay un amplio número de controladores, y usualmente la elección de este depende del sistema a controlar y de las necesidades que se tengan, sin embargo, en este trabajo solo se describirán unos cuantos:

- Control Proporcional (P).
- Control Integral (I).
- Control Proporcional-Integral (PI).
- Control por Retroalimentación de Estados.

### Control Proporcional (P)

Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1.20)$$

Siendo:  $K_p$ : la ganancia proporcional.

O bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace (también denominado como **Función de Transferencia**) se expresaría como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (1.21)$$

El controlador proporcional es un amplificador con una ganancia ajustable, y su diagrama de bloques se puede observar en la Fig. 1.12.

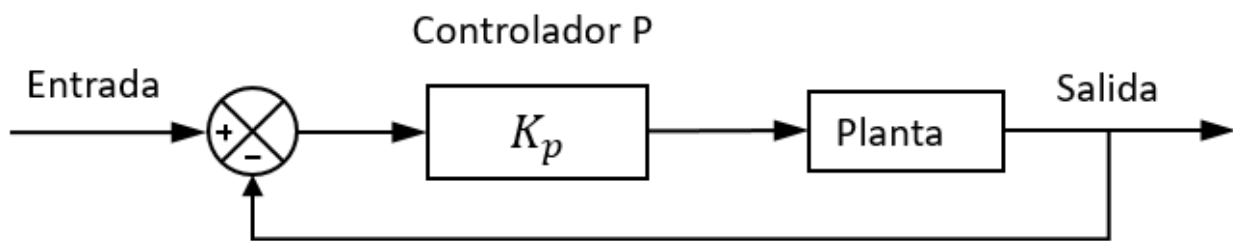


Figura 1.12: Diagrama de bloques de un control P.

### Control Integral (I)

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador  $u(t)$  se cambia a una razón proporcional a la señal de error  $e(t)$ :

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (1.22)$$

Siendo:  $K_i$ : la ganancia integral.

Esto puede ser reescrito como:

$$u(t) = K_i \int_0^T e(t) dt \quad (1.23)$$

O bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace se expresaría como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_i \frac{1}{s} \quad (1.24)$$

La Fig.1.13 muestra su diagrama de bloques.

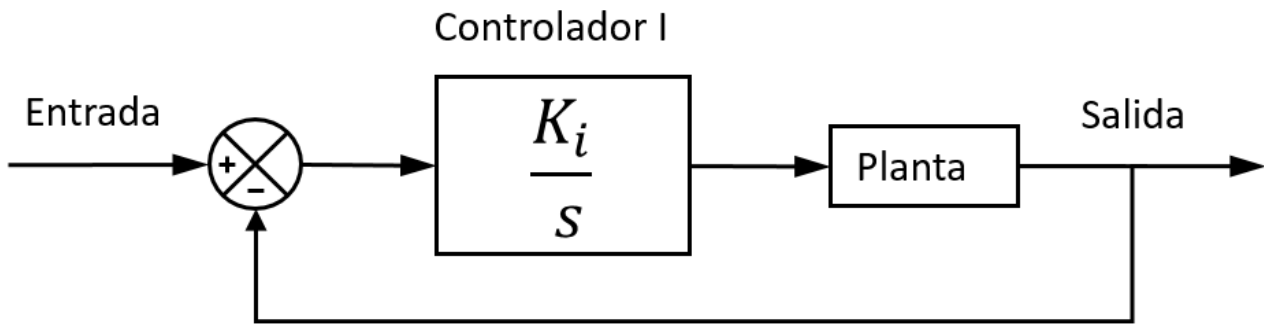


Figura 1.13: Diagrama de bloques de un control I.

### Control Proporcional-Integral (PI)

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) está definida como:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^T e(t) dt \quad (1.25)$$

Siendo:  $T_i$ : tiempo integral.

El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de  $K_p$  afecta tanto a la parte integral y a la proporcional de la acción de control. El diagrama de bloques de un controlador PI puede observarse en la Fig. 1.14

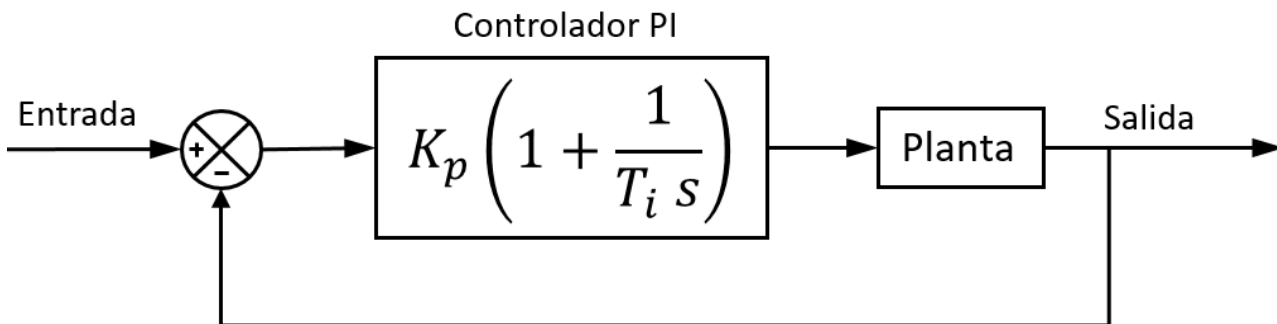


Figura 1.14: Diagrama de bloques de un control PI.

## Control por Retroalimentación de Estados

Debido a que los controladores PID tienen una complejidad limitada, no es difícil imaginar que cuando un sistema tiene una dinámica compleja, un controlador más allá de una estructura PID podría proporcionar una mejora del rendimiento [17].

Los sistemas de control de retroalimentación de estado están diseñados utilizando modelos de espacio de estado del sistema, en lugar de su función de transferencia. Las señales de control se calculan utilizando una matriz de ganancia del controlador de retroalimentación junto con las variables de estado.

Asumiendo que la dinámica del sistema se describe mediante la ecuación de espacio de estados con dimensiones apropiadas para las matrices y vectores:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{1.26}$$

Siendo:

- $x$ : El vector de estado.
- $\dot{x}$ : La derivada del vector de estados.
- $u$ : El vector de entradas.
- $y$ : El vector de salidas.
- $A$ : La matriz de estados.
- $B$ : La matriz de entrada.
- $C$ : La matriz de salidas.

Una configuración básica de control por retroalimentación de estados se ilustra en la Figura 1.15, donde  $K$  es la matriz de ganancia del controlador.

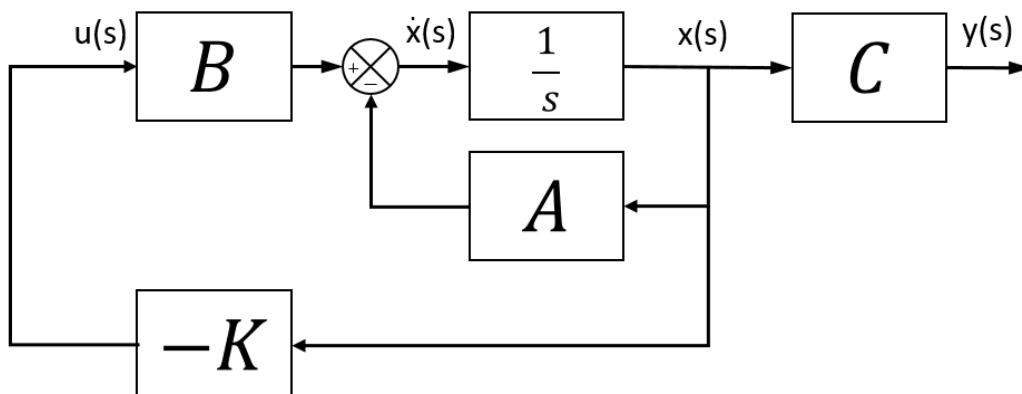


Figura 1.15: Diagrama de bloques de un Control por Retroalimentación de estados

Hay tres puntos que deben ser observados en el control por retroalimentación de estados:

- Este es una retroalimentación negativa de las variables de estado.
- No hay dinámica en el controlador de retroalimentación de estado  $K$ .
- No hay señal de referencia a la salida, lo que significa que el sistema de control de retroalimentación de estado está diseñado para llevar el vector de estado a cero desde un vector inicial  $x(0)$  cuando el sistema el lazo cerrado es estable.

El control por retroalimentación de estados ofrece un marco robusto para analizar y diseñar sistemas complejos. Su capacidad para manejar múltiples entradas y salidas, no linealidades, y sistemas variantes en el tiempo lo vuelve superior a los métodos tradicionales.

Una vez revisada la teoría que describe los fenómenos físicos a estudiar, se procede a describir el desarrollo experimental con el cual se alcanzarán los objetivos establecidos.

# Capítulo 2

## Descripción experimental

En esta sección, se detallará el diseño experimental empleado para la obtención de los patrones de moteado del disco, un sistema de control para el movimiento de dicho disco, y el método para el análisis de los patrones de moteado obtenidos.

### Contenido

---

<b>2.1 Descripción general</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Análisis de vibraciones del disco</b>	<b>21</b>
2.2.1 Estudio de frecuencias del disco de freno	21
<b>2.3 Sistema de interferometría</b>	<b>23</b>
2.3.1 Arreglo óptico	23
2.3.2 Diseño e implementación del mecanismo de impacto	26
2.3.3 Diseño y evaluación del sistema de adquisición de datos ópticos	28
<b>2.4 Sistema de control</b>	<b>32</b>
2.4.1 Diseño y manufactura de una estructura metálica para sostener al disco de freno	32
2.4.2 Elección del actuador para la rotación del disco	33
2.4.3 Diseño e implementación de un tacómetro para la caracterización del actuador	34
2.4.4 Diseño de un controlador por retroalimentación de salida.	36
2.4.5 Simulación del sistema y controlador	39
2.4.6 Programación del módulo CP1103	41
2.4.7 Etapa de potencia	42
2.4.8 Conexión con el módulo CP1103	43
<b>2.5 Desarrollo del sistema de análisis de la información obtenida</b>	<b>46</b>
2.5.1 Caracterización de las zonas del disco	46
2.5.2 Selección de píxeles	50
2.5.3 Toma de fotografías respecto a la posición del disco	53

---

## 2.1. Descripción general

El desarrollo experimental abordará aspectos como la selección del método de análisis, los instrumentos de medición empleados, los métodos de recogida de datos para el análisis de los mismos, y el diseño de un controlador a partir de los parámetros del sistema. Cada etapa del proceso experimental ha sido diseñada con el propósito de garantizar la validez interna y la fiabilidad de los hallazgos

La propuesta inicial para el prototipo consiste en 3 elementos fundamentales:

- **Un sistema de medición óptico para la superficie del disco de freno.** En esta etapa, a través de un arreglo interferométrico, se obtendrán patrones de moteado de la superficie de los discos de freno. Estos patrones nos indicarán si los discos están en buen estado.
- **Un control para la velocidad del disco, el cual permitirá la obtención de su posición.** Puesto que se busca analizar la mayor parte de la superficie de cada disco, estos estarán girando a una velocidad constante. Para esto una etapa de control se encargará de mantener la velocidad constante.
- **Un sistema de control para la velocidad del disco, el cual permitirá la obtención de su posición.** Puesto que los patrones de moteado van a estar girando al igual que el disco, se debe de caracterizar la posición correspondiente con cada zona del mismo. Para esto, se creará un sistema que mandará las señales para la toma de fotos de la cámara utilizando la información de la posición.

El diagrama de bloques de dicha propuesta inicial es el mostrado en la Fig. 2.1.

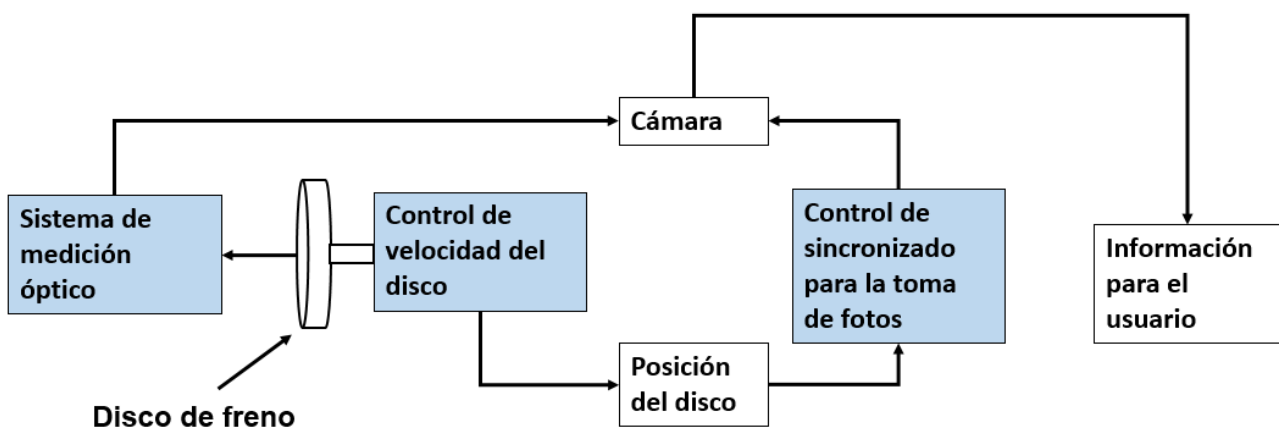


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema propuesto

En las siguientes secciones, se procederá a una descripción detallada y minuciosa de cada aspecto del desarrollo experimental. Se pondrá especial énfasis en identificar las decisiones metodológicas cruciales que han sido tomadas y se proporcionará una justificación de su pertinencia dentro del marco específico de este estudio.

## 2.2. Análisis de vibraciones del disco

En esta sección se mostrará cómo se realizó una simulación para encontrar las frecuencias a las que debe vibrar el disco al momento de aplicar un impulso mecánico. Dichas frecuencias fueron entonces comparadas con las obtenidas de modo experimental ocupando un micrófono de contacto.

### 2.2.1. Estudio de frecuencias del disco de freno

El disco a analizar en este trabajo es de la marca Raybestos, siendo el modelo 96806R [18] de hierro dúctil. Un modelo 3D de este disco se realizó a través del software SolidWorks, y este se puede ver en la Fig. 2.2.

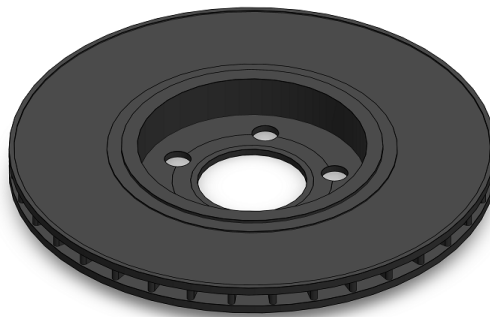
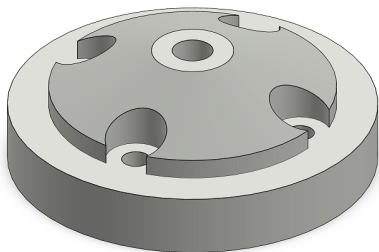
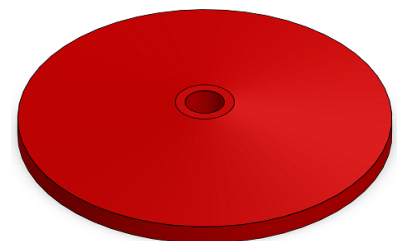


Figura 2.2: Modelo 3D del disco de freno a analizar.

Una vez hecho este modelo, se procedió a realizar un estudio de frecuencia. Para esto, igualmente se dibujaron las piezas que componen a los elementos que sujetan al disco en su base. Estos son una base de aluminio, y una tapa de PLA, los cuales pueden ser vistos en la Fig. 2.3.



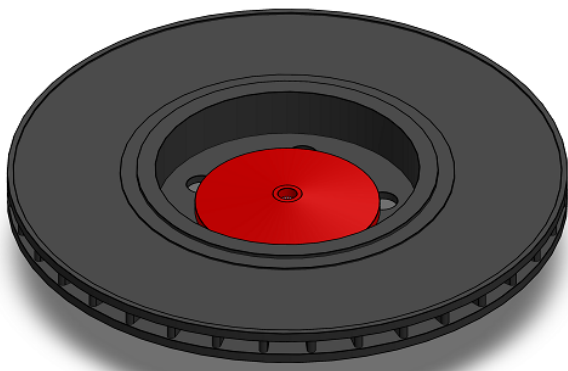
(a) Dibujo 3D de la base de aluminio que sostiene al disco.



(b) Dibujo 3D de la tapa de PLA que sostiene al disco.

Figura 2.3: Dibujos 3D de los elementos que sostienen al disco.

Una vez realizados los modelos 3D de estos elementos, y estableciendo los materiales de cada uno, se procedió a ensamblarlos, se establecieron las relaciones y sujeciones entre ellos, y se realizó el estudio de frecuencias en SolidWorks bajo esas condiciones. El ensamble de estos elementos se puede ver en la Fig. 2.4.



(a) Vista isométrica del ensamblaje.



(b) Vista lateral del ensamblaje.

Figura 2.4: Ensamblaje del disco con su base y su tapa.

En la Fig. 2.5 se puede ver la representación hecha en SolidWorks de las vibraciones del disco. De este estudio de frecuencias, se encontró que las frecuencias resonantes del disco son las mostradas en la Tabla 2.1.

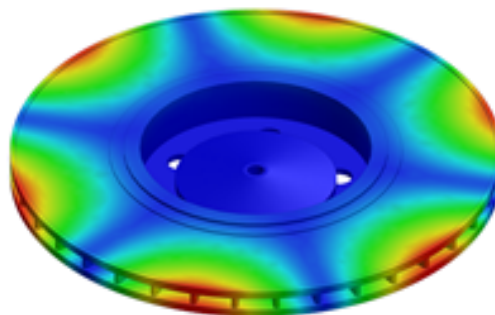


Figura 2.5: Representación de un modo de vibración del disco en SolidWorks.

Tabla 2.1: Modos de vibración del disco obtenidos a través del estudio de frecuencias.

Modo de vibración	Frecuencia del disco
1	757.95 Hz
2	761.55 Hz
3	886.6 6Hz
4	970.57 Hz
5	972.53 Hz
6	1793.6 Hz
7	1795.1 Hz

Estos modos de vibración serán comparados con los resultados obtenidos experimentalmente. Se espera que haya diferencias con dichos resultados, ya que no se considera toda la base donde se sostiene el disco para las simulaciones, y pueden existir diferencias en los materiales utilizados.

## 2.3. Sistema de interferometría

Esta sección describirá las actividades realizadas con el fin de incorporar los elementos electrónicos necesarios para el análisis de las superficies del disco de freno. Se buscó el integrar los componentes necesarios para funcionar con el equipo óptico con el que se contaba con el fin de que el análisis pudiera llevarse a cabo de la manera más controlada y exacta posible.

### 2.3.1. Arreglo óptico

Para realizar las primeras pruebas de interferometría con el disco de freno, se optó por un arreglo basado en la técnica ESPI, el cual es mostrado en la Fig. 2.6.

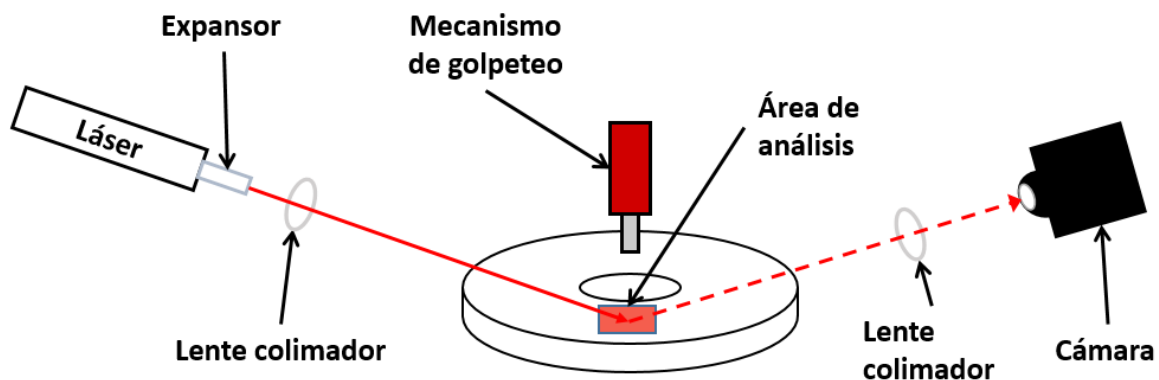


Figura 2.6: Arreglo basado en la técnica ESPI

Este arreglo consiste en hacer incidir un láser sobre la superficie del disco, para posteriormente aplicar un impulso mecánico a dicho disco usando un mecanismo de impacto, esto con el fin de obtener varios patrones de moteado que correspondan con las vibraciones del disco. Dichos patrones son entonces capturados por una cámara ultra rápida para su posterior análisis.

El arreglo óptico para la adquisición de los patrones de moteado consta de:

- Una cámara FASTCAM Mini UX100 de la marca Photron [19], como la mostrada en la Fig. 2.7a.
- Un láser OBIS LX 633 de la marca Coherent de 50 mW y una longitud de onda de 633 nm [20], que puede ser visto en la Fig. 2.7b.
- 2 lentes acromáticos (enfocan cualquier color en una misma área) de 2 pulgadas de diámetro con una distancia focal efectiva de 300 mm, observado en la Fig. 2.7c.
- Un objetivo de microscopio con una magnificación de 10, apertura numérica de 0.25 y una distancia de trabajo de 8.57 mm, el cual es usado como expansor del láser, como el mostrado en la Fig. 2.7d
- Una computadora para procesar la información obtenida de la cámara.



Figura 2.7: Partes del arreglo óptico

Para el tratamiento de la información obtenida se utiliza el software de Spyder (un ambiente de programación en Python), y Matlab. En estos software se desarrollaron programas que realizan un análisis de la intensidad de la luz en el tiempo, para posteriormente hacer un análisis en frecuencia en una posición en específico del disco. Notese como los elementos de este arreglo corresponden con los mostrados en la Fig. 2.6.

Posteriormente, se propuso un interferómetro más especializado, que pueda medir con mayor fiabilidad dichos patrones de moteado, el cual fue un Mach-Zehnder. Esto debido a que, a diferencia de otros interferómetros, cada uno de los haces de luz en la configuración de Mach-Zehnder se recorre solo una vez, lo que lo convierte en un instrumento altamente configurable. Dicho arreglo puede verse en la Fig. 2.8.

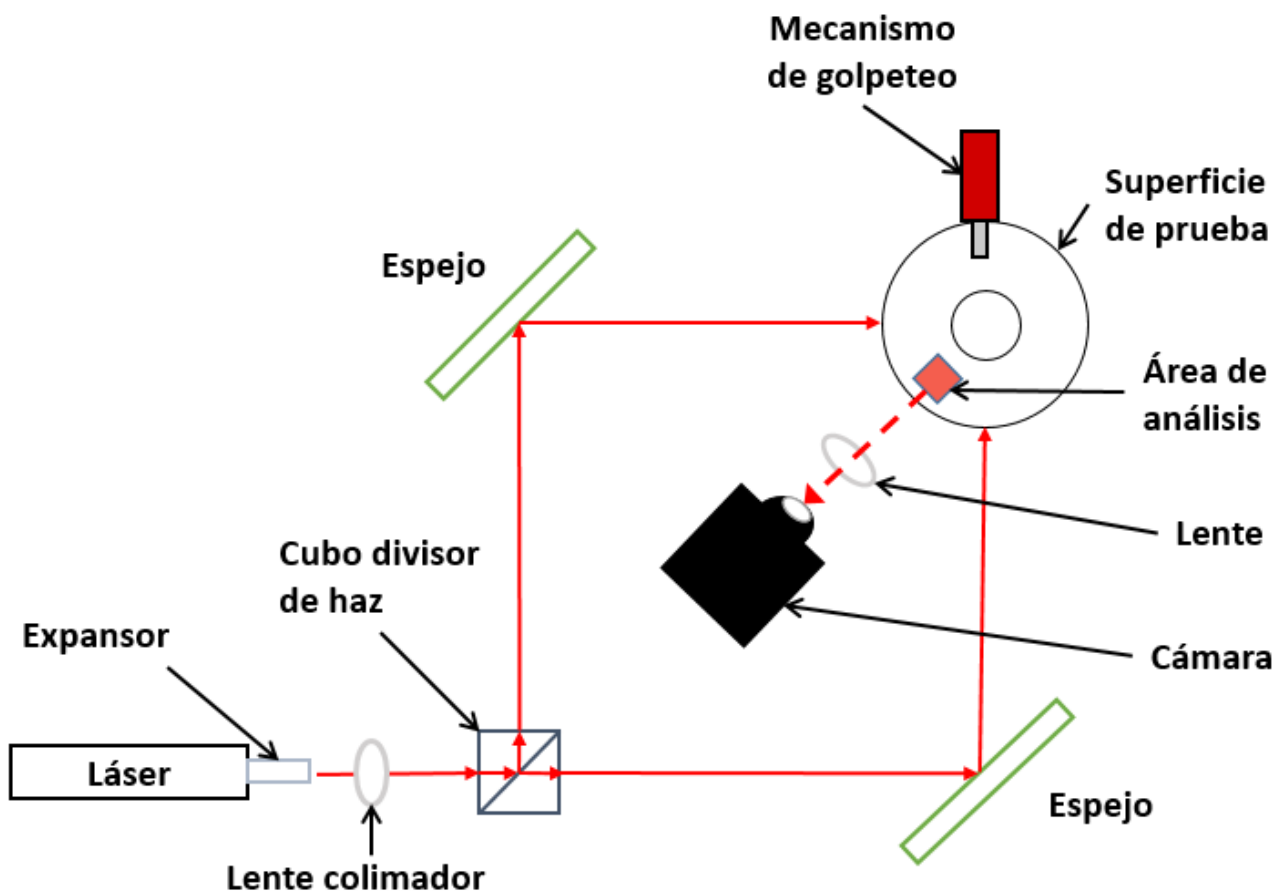


Figura 2.8: Arreglo interferométrico Mach-Zehnder aplicado al disco de freno

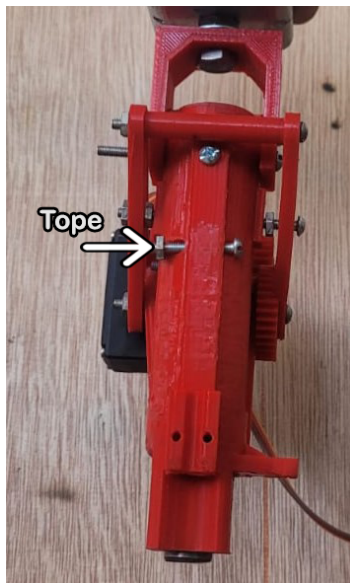
Este interferómetro ocupa el mismo equipo que se ve en la Fig. 2.7, añadiendo 2 elementos más:

- 2 espejos de aluminio optimizados para láseres de longitudes de onda de 400nm a 10.000nm con dimensiones cuadradas de 50,8 x 50,8 mm, una planitud de  $5\lambda$  por pulgada a 632.8 nm.
- Un cubo divisor de haz de luz no polarizante de 25.4 x 25.4 x 25.4 mm.

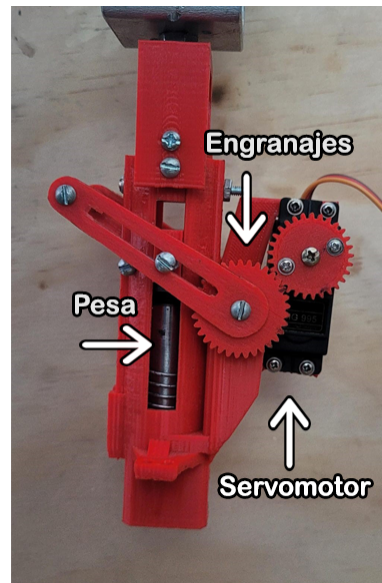
Después de varias pruebas y cambios en la configuración del arreglo interferométrico, se encontró que la baja reflectividad de la superficie del disco de freno no permite realizar pruebas usando esta configuración. Motivo por el cual se decidió en conjunto con el laboratorio de interferometría de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas obtener los patrones de moteado sustituyendo al disco de freno por pastillas piezoeléctricas más reflejantes. Esto con el fin de llevar a cabo la prueba de principio del funcionamiento del sistema óptico. Los resultados de este arreglo se presentarán en la sección de resultados de este trabajo.

### 2.3.2. Diseño e implementación del mecanismo de impacto

Como parte de los requerimientos para obtener un patrón de moteado de la superficie del disco, se necesita obtener una variación en la altura de la superficie a analizar, lo cual se lleva a cabo a través de un actuador mecánico. Dicho mecanismo de impacto está conformado por un servomotor, un juego de 2 piezas consistente en una pesa metálica y un imán, un resorte en la parte inferior, y un juego de engranes que convierte el movimiento circular del servomotor en uno lineal, como se muestra en la Fig. 2.9.



(a) Vista frontal del mecanismo



(b) Vista lateral del mecanismo



(c) Vista interior del mecanismo

Figura 2.9: Mecanismo de impacto

El funcionamiento de este mecanismo consiste en 3 etapas:

- Colocar el imán en contacto con la pesa que impactará con el disco.
- Elevar el imán y la pesa a un punto en específico donde hay un tope mecánico.
- Mover el imán más allá del tope mecánico a modo de que este deje caer la pesa y esta pueda golpear al disco de freno (solo deberá impactar 1 vez y esto se asegura a través del uso de un resorte en la parte inferior que limita el movimiento de la pesa).

Para realizar el movimiento del servomotor del mecanismo de impacto, se utiliza un microcontrolador PIC18F4550 de la marca Microchip [21]. Este microcontrolador cuenta con un puerto especializado para la modulación por ancho de pulso requerida para el control del servo, aparte de tener una arquitectura ya conocida y ampliamente documentada. Adicionalmente este dispositivo proporciona 2 salidas digitales de 5V, las cuales sirven como señales de activación para otros dispositivos del sistema, estos se activan justo antes de que el disco de freno sea golpeado por la pesa. El diagrama del control del mecanismo de impacto puede verse en la Fig. 2.10.

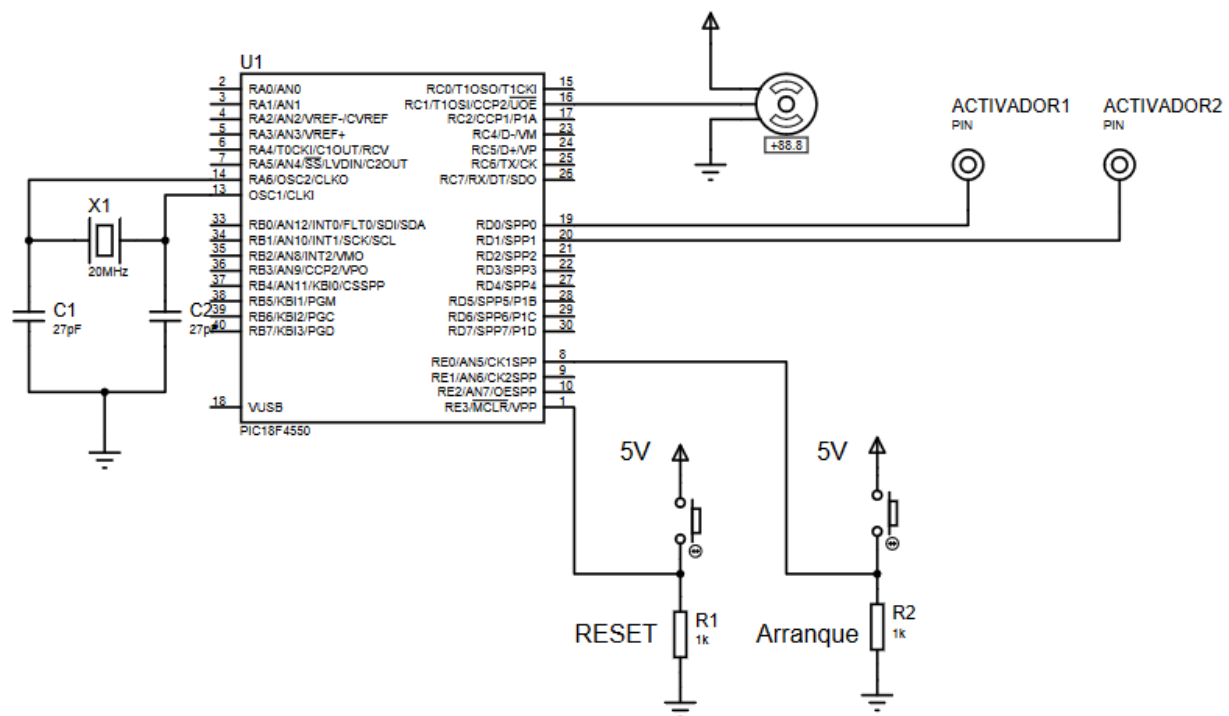


Figura 2.10: Control del mecanismo de impacto

### 2.3.3. Diseño y evaluación del sistema de adquisición de datos ópticos

Para asegurar que los datos obtenidos por interferometría son correspondientes a las vibraciones del disco, se diseñó un sistema capaz de captar dichas vibraciones a través de un micrófono de contacto, las cuales son procesadas por un microcontrolador para después enviar esa información a una computadora para su posterior análisis.

El desarrollo de este sistema se llevó a cabo con un microcontrolador STM32F103C8T6 de la familia ARM Cortex M3 [22], un micrófono de contacto de la marca Cherub modelo WCP-55 [23], que actúa como sensor de las vibraciones, un circuito de acondicionamiento para la señal de dicho micrófono y un modulo convertidor USB a serial RS232 basado en el chip PL-2303 [24]. La frecuencia de muestreo para este análisis es de 40MHz. El diagrama del circuito completo puede ser visto en la Fig. 2.11.

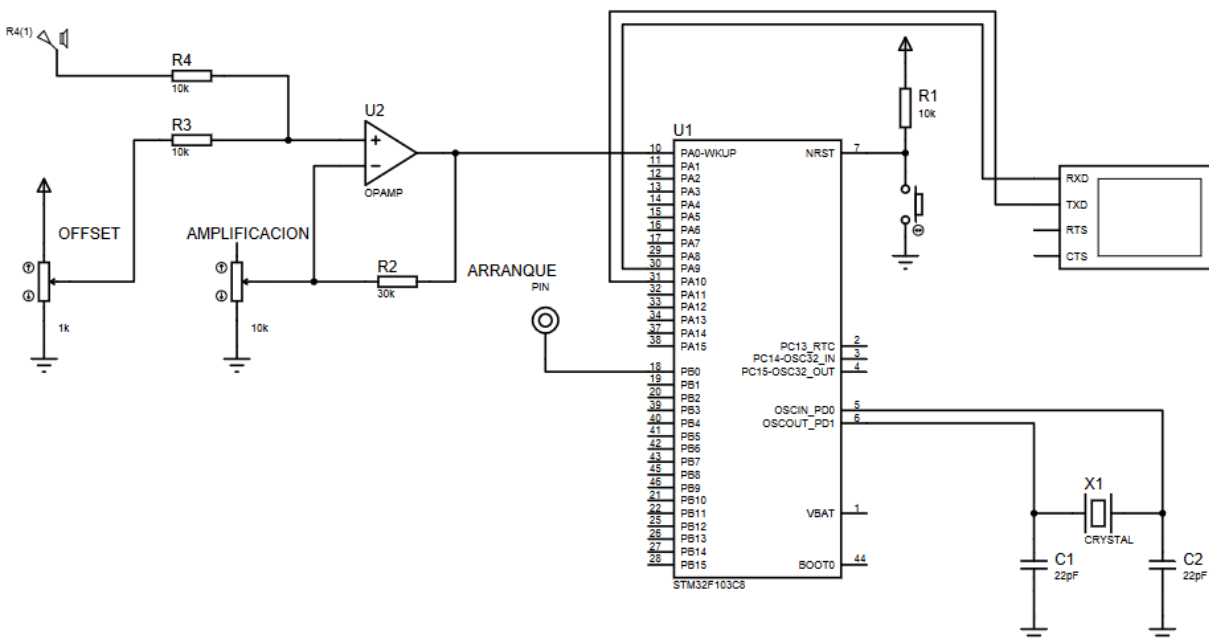


Figura 2.11: Circuito de adquisición de las vibraciones del disco

La primera prueba consiste en la comparación de las frecuencias de vibración del disco obtenidas mediante el análisis de los fotogramas capturados por la cámara ultra-rápida con aquellas medidas simultáneamente por un micrófono de contacto. El análisis de la señal fue llevado a cabo en ambos casos utilizando el software Matlab, para hacer un análisis en frecuencia. El montaje de ambas pruebas es observado en la Fig. 2.12

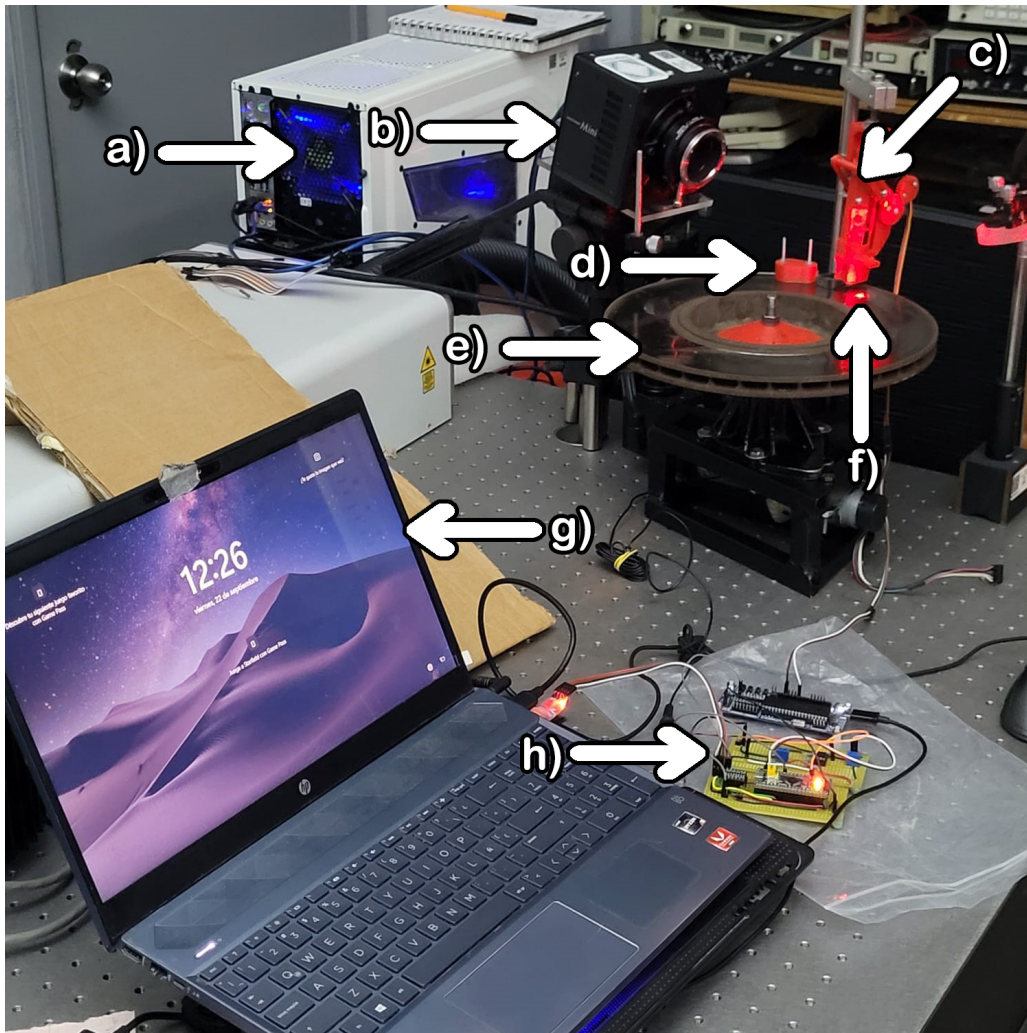


Figura 2.12: Montaje de los sistemas electromecánicos y ópticos. a) Computadora que analiza los patrones de moteado. b) Cámara ultra-rápida. c) Mecanismo de impacto. d) Micrófono de contacto. e) Disco de freno a analizar. f) Haz del láser que rebota en el disco para crear patrones de moteado. g) Computadora para el análisis de las vibraciones usando el micrófono de contacto. h) Circuito de adquisición de vibraciones del disco.

Para los experimentos se montó la estructura con su respectivo disco de freno, el mecanismo de impacto, el circuito de adquisición del micrófono de contacto, una computadora con la cual se registrarán y procesarán los datos del micrófono de contacto, y un sistema de adquisición óptico consistente en un láser, una cámara ultra-rápida utilizando una taza de captura de 20,000 FPS, y una computadora de escritorio. El circuito de adquisición de vibraciones y el arreglo óptico fueron utilizados simultáneamente para obtener la información de las vibraciones del disco al aplicar el impulso mecánico. La señal obtenida por el micrófono y su análisis de Fourier se pueden ver en las Fig. 2.13 y 2.14 respectivamente.

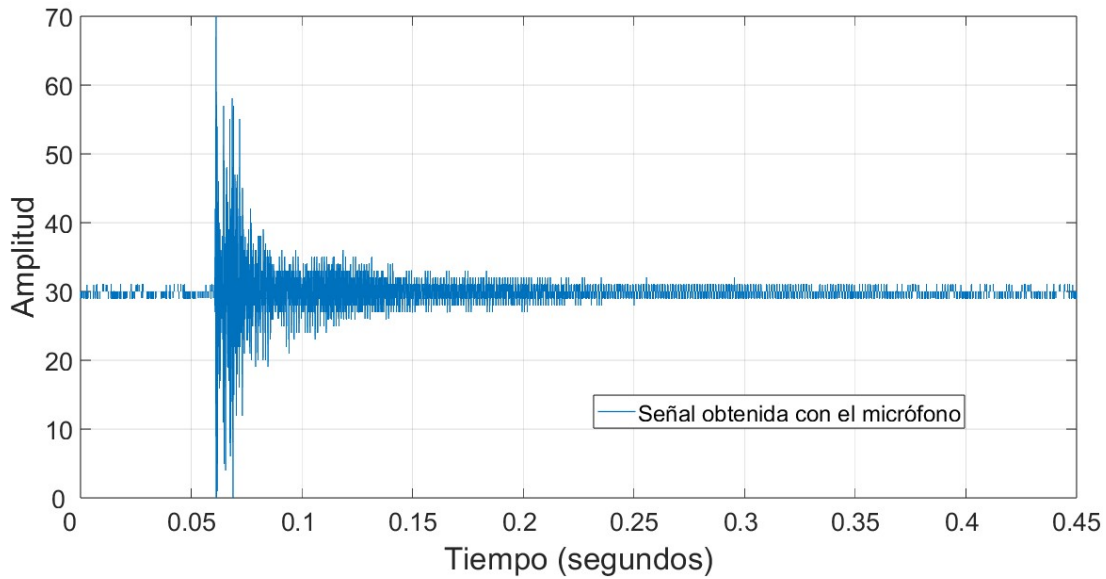


Figura 2.13: Señal obtenida con el micrófono

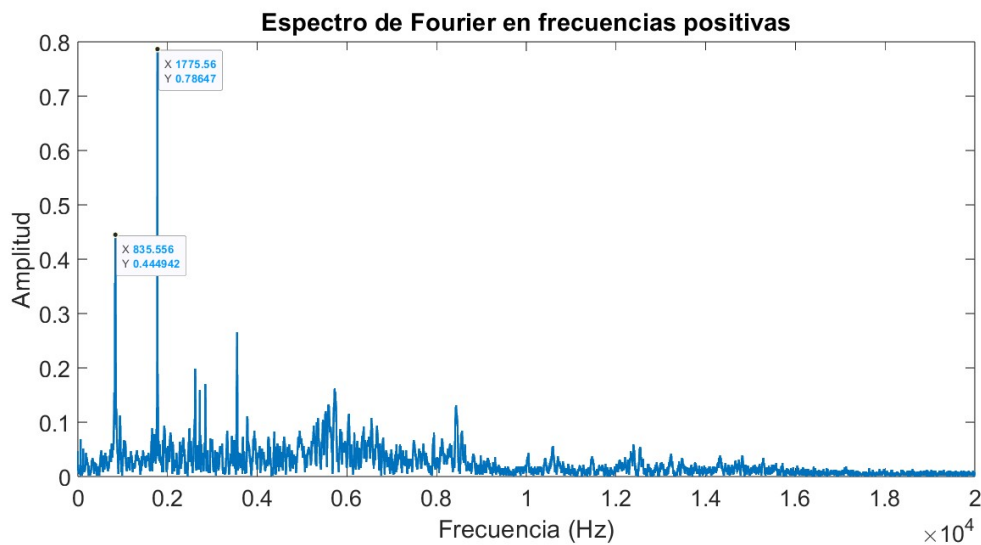


Figura 2.14: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier con los datos del micrófono

Las 2 frecuencias principales obtenidas de este análisis son de 835Hz y 1775 Hz. Estas son las frecuencias en las cuales se enfocará el análisis del disco, proponiéndose que un desfase de estos primeros dos armónicos sea un indicativo de alguna anomalía en el disco.

En la Fig. 2.15 se pueden observar algunos de los patrones de moteado obtenidos de esta prueba, los cuales tienen una separación de 1ms entre cada foto. En la Fig. 2.16 se pueden ver los resultados de los análisis de Fourier utilizando el método óptico, y se obtiene que las 2 frecuencias principales son de 741 Hz y 1775 Hz respectivamente. Si bien las imágenes parecen no tener diferencias a simple vista, la iluminación cambia en ciertos píxeles, los cuales son los que nos interesa analizar.

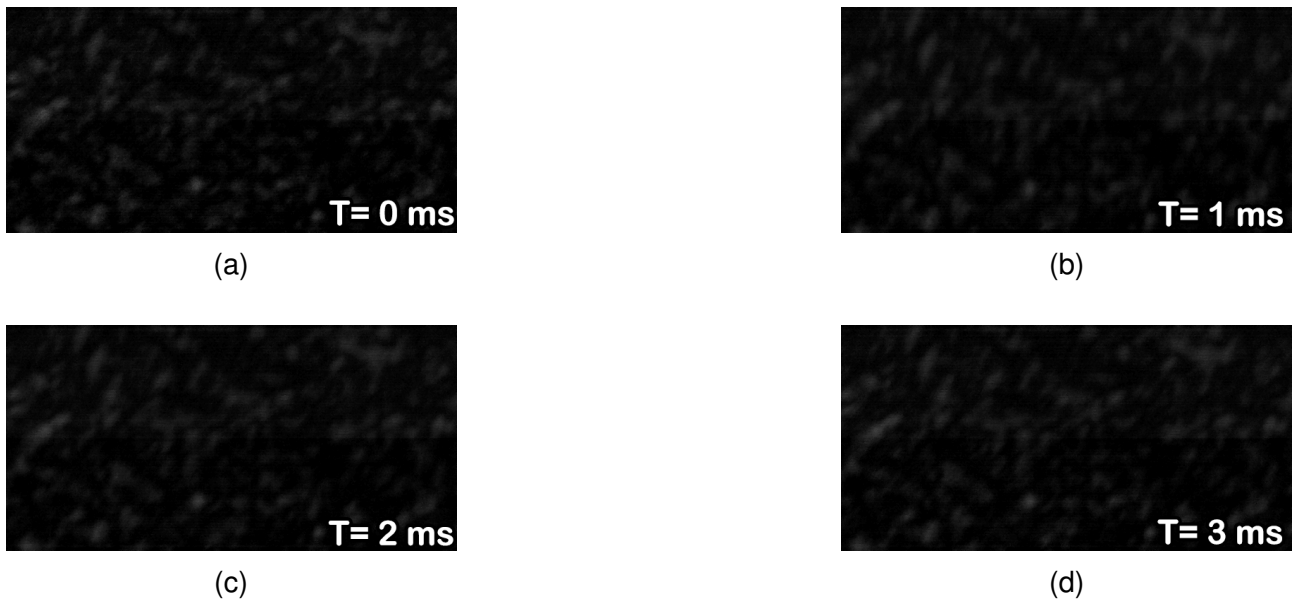


Figura 2.15: Ejemplos de patrones de moteado

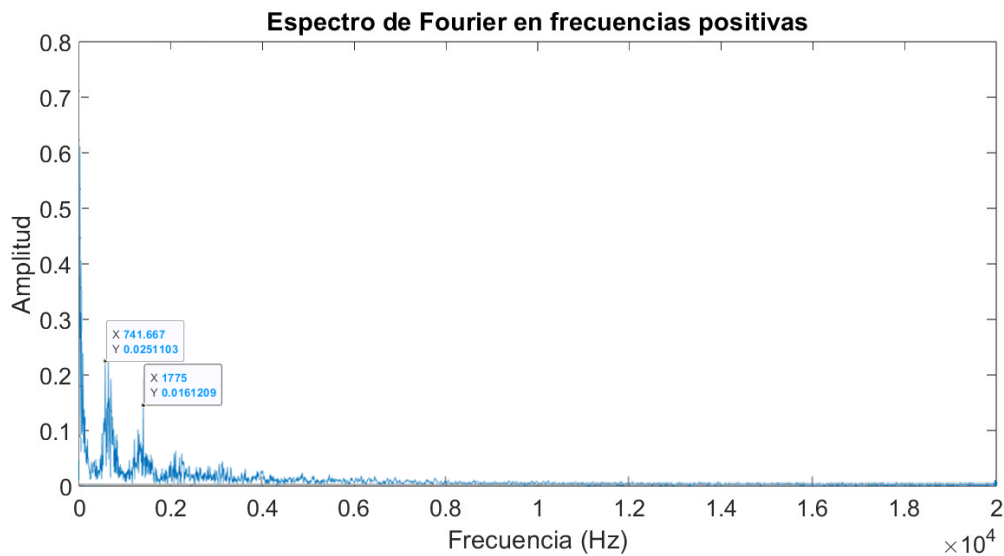


Figura 2.16: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier con los datos del método óptico

De lo anterior, se puede concluir lo siguiente:

Comparando los resultados de ambas pruebas con los resultados obtenidos del estudio de frecuencias del disco de la Tabla 2.1, se puede encontrar que tienen valores muy cercanos, como se puede observar en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Tabla comparativa de los métodos experimentales contra el estudio de frecuencia

Estudio de frecuencia	Micrófono	Método óptico
886 Hz	835 Hz	741 Hz
1793 Hz	1775 Hz	1775 Hz

Si bien hay diferencia en los valores obtenidos entre ambos métodos experimentales y el estudio de frecuencias, estas pueden deberse a variaciones ambientales, o a que tanto el disco como su base y su tapa no son completamente uniformes, o presentan impurezas. A pesar de esto, los valores de son muy cercanos a los esperados.

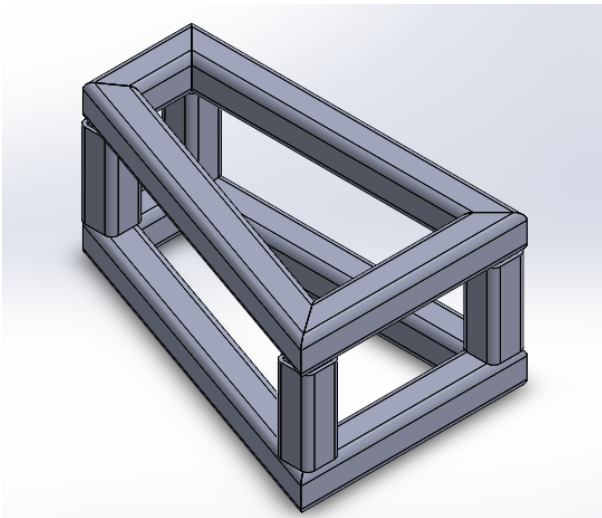
Hay 2 diferencias significativas entre la prueba electro-mecánica y la prueba óptica, la prueba con el micrófono reveló un total de 8 armónicos, mientras que la prueba óptica reveló 2. Además, en los 2 armónicos que se obtuvieron en la prueba óptica, hay un desfase en comparación con la prueba con el micrófono, dado que en el 1er armónico hay una diferencia de 94 Hz. Esto debido a que la prueba óptica tiene diferencias respecto a la prueba con el micrófono de contacto, tales como que la cámara está más alejada que el micrófono, y registra cambios en la intensidad a lo largo del tiempo que son menos marcados debido a la opacidad del disco. Estas no presentan un riesgo para la obtención de la información de la superficie del disco de freno.

## 2.4. Sistema de control

En esta sección se detallará el proceso por el cual se diseñó la estructura que sostendrá al disco de freno, los circuitos utilizados para la obtención de información de los sensores ópticos y mecánicos, y la implementación del controlador de la velocidad de rotación del disco. Teniendo controlada la velocidad, de esta se puede calcular la posición del disco mientras está girando. Esta información es después utilizada para diseñar un sistema que se encargue de controlar la toma de fotos de la cámara del arreglo interferométrico.

### 2.4.1. Diseño y manufactura de una estructura metálica para sostener al disco de freno

Puesto que se busca que el dispositivo desarrollado sea fácil de manipular, se procedió a diseñar y elaborar una estructura mecánica para sostener al disco de freno, apoyándose de una base giratoria previamente hecha. El diseño de la estructura se realizó en SolidWorks, mostrando dicho diseño en 3D en la Fig.2.17a, la estructura soldada, pintada y con la base giratoria integrada puede verse en la Fig. 2.17b, y sus medidas en milímetros en la Fig.2.18a a la Fig. 2.18b. El material elegido para realizarla fue el perfil tubular rectangular (PTR), de 20mm x 20mm, el cual provee la rigidez necesaria para sostener al disco y al sistema que lo hará girar, es robusto a las vibraciones, y es un material de propósito general.

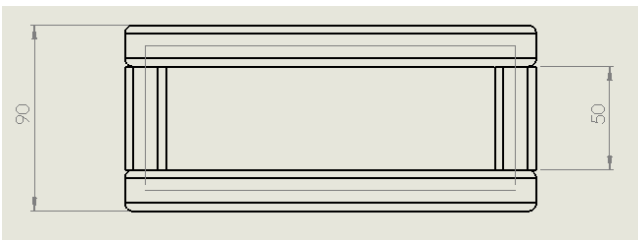


(a) Diseño en 3D de la estructura

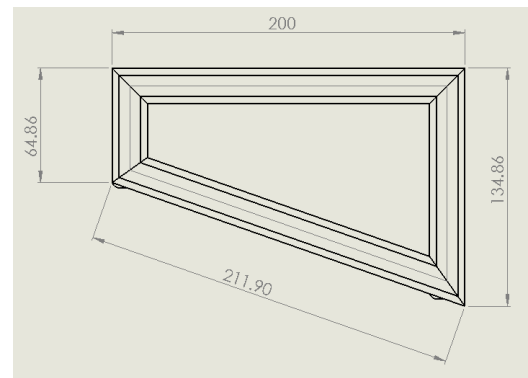


(b) Estructura con base para discos

Figura 2.17: Modelo 3D de la estructura, y estructura con la base giratoria montada



(a) Medidas de la altura de la estructura



(b) Medidas del perfil de la estructura

Figura 2.18: Medidas en milímetros (mm) de la base.

### 2.4.2. Elección del actuador para la rotación del disco

Para la parte de control, se inició por crear un sistema para la caracterización del motor propuesto, un 37D Metal Gearmotors 50:1 de la marca Pololu [25], mostrado en la Fig.2.19

La elección de este motor es debido a su linealidad del voltaje aplicado contra su torque, a su reducción de 50:1, lo que provee un torque suficiente para el peso de los discos, y que este tiene incluido un encoder de cuadratura, lo que permite medir su velocidad y dirección por software.



Figura 2.19: Motor propuesto: 7D Metal Gearmotors 50:1 marca Pololu

### 2.4.3. Diseño e implementación de un tacómetro para la caracterización del actuador

Una vez elegido el actuador que hará girar al disco, se procedió a diseñar un tacómetro para la adquisición de la velocidad del sistema y obtener su modelo matemático. El tacómetro implementado fue diseñado utilizando un encoder conectado al eje del motor, leyendo el número de flancos de subida cada cierto tiempo para calcular la velocidad. Específicamente, este dispositivo lee el número de flancos de subida cada 20 milisegundos a través de un microcontrolador. El algoritmo básico para lograr esto se muestra en la Fig. 2.20.

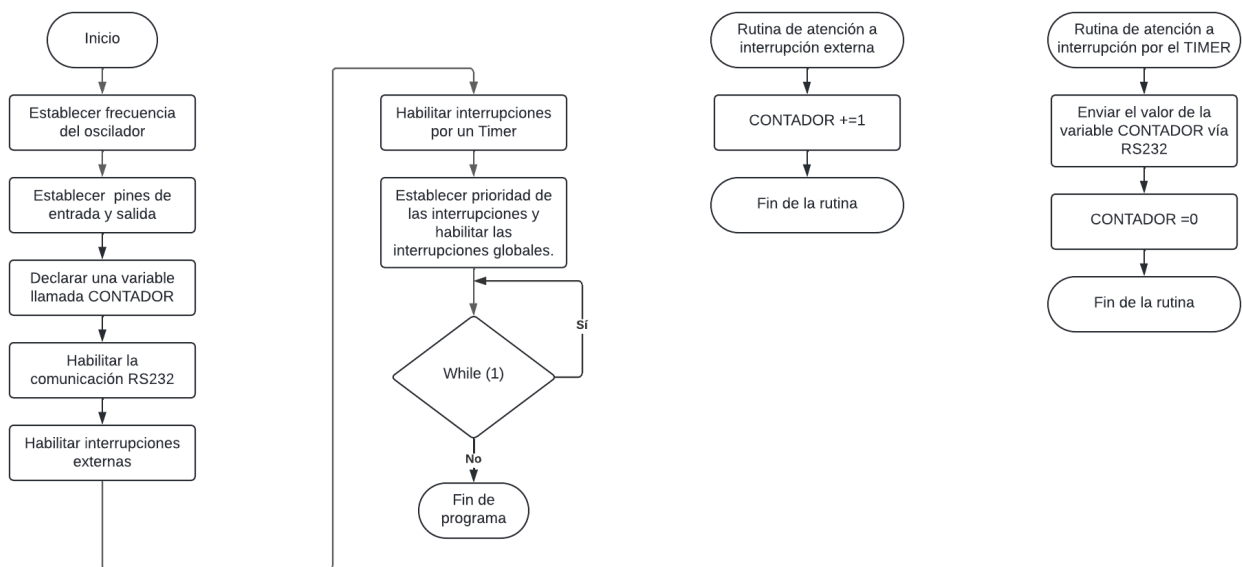


Figura 2.20: Algoritmo para el tacómetro.

Este algoritmo utiliza una rutina principal y dos interrupciones. La rutina principal se ejecuta solo una vez para configurar el microcontrolador. La rutina de atención a interrupción externa es la encargada de leer el número de flancos de subida del encoder y aumentar el número de una variable llamada "Contador". La rutina de atención a interrupción por el TIMER es la que envía el número de flancos de subida contados cada 20 milisegundos a través de RS232 y reinicia el valor de la variable contador.

Una vez establecido el algoritmo de este dispositivo, se procedió a implementarlo en un microcontrolador de la marca STMicroelectronics, el STM32F103C8T6 [22]. Este dispositivo fue elegido por sus características (interrupciones externas e internas, temporizadores y un puerto RS232), y por ser programable en C/C++, un lenguaje de programación bien documentado. Esta implementación puede ser vista en la Fig. 2.21.

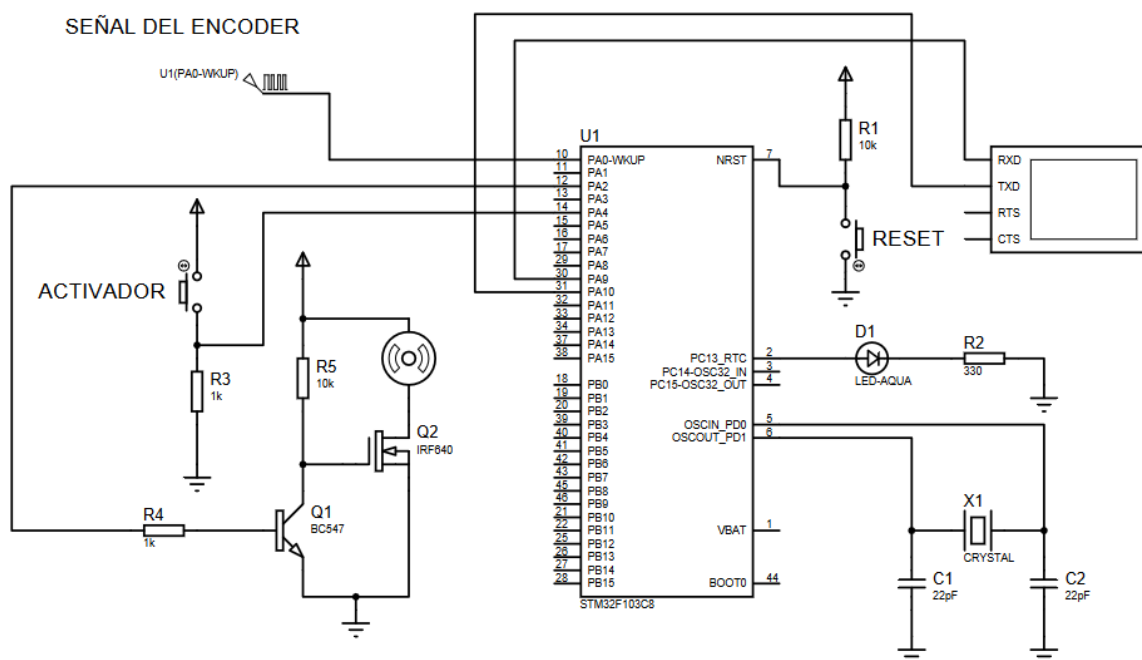


Figura 2.21: Dispositivo para la caracterización del motor

Se realizaron experimentos con el fin de obtener la función de transferencia del dispositivo con un disco de freno acoplado en su base. Al disco ya acoplado con el motor se le aplicó un escalón de voltaje de 9 Volts, y con el dispositivo para la caracterización del motor se adquirió la curva característica que se puede observar en la Fig. 2.22.

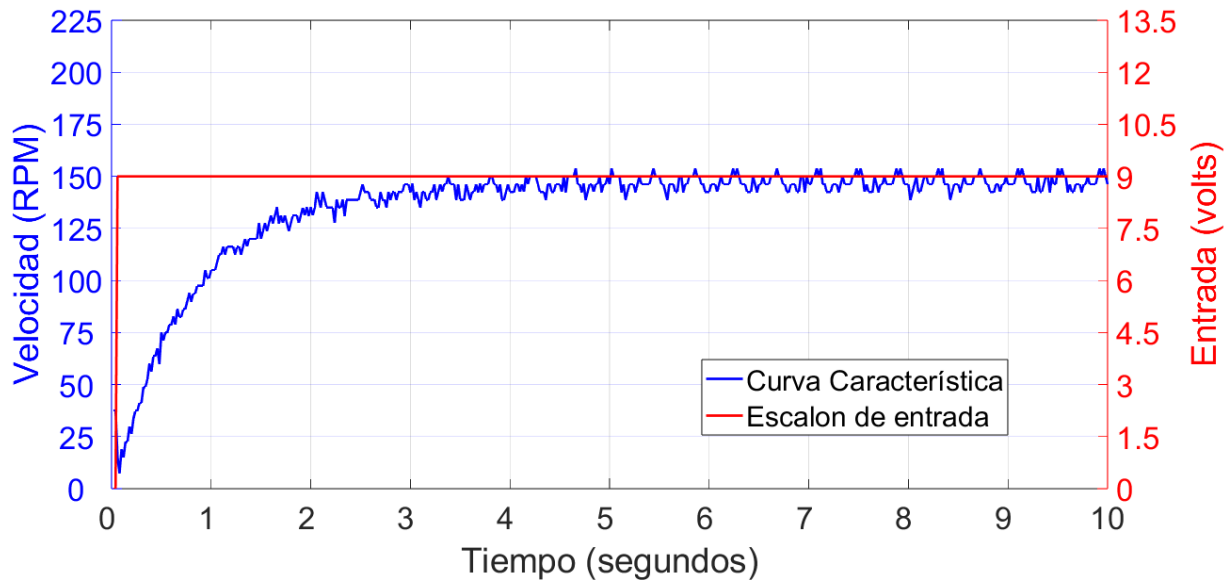


Figura 2.22: Resultados de la caracterización del sistema.

#### 2.4.4. Diseño de un controlador por retroalimentación de salida.

Dado que la curva de la Fig. 2.22 no muestra sobre-tiro, puede modelarse como una función de transferencia de 1er orden [15], como se describe en la Ec. 2.1.

$$H(s) = \frac{K_m}{T_s + 1} \quad (2.1)$$

Donde  $T$  es el momento en que el sistema alcanza el 63,2% de su valor final, por inspección de la Fig. 2.22, se puede encontrar que  $T$  vale 0,8 segundos.  $K_m$  es igual a la relación entre la velocidad final (RPM) y el escalón de voltaje a la entrada, por lo tanto  $K_m = 150\text{RPM}/9\text{V} = 16.666$ , por lo que la función de transferencia es como se muestra en la Ec.2.2.

$$H(s) = \frac{16.666}{0.8s + 1} = \frac{1.25}{s + 1.25} \cdot 16.666 \quad (2.2)$$

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema, este puede representarse en la forma de espacio de estados como se ve en la Ec. 2.3.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde  $x, \dot{x}, y, u, A, B, C$  son matrices que denotan la velocidad, la aceleración, la salida, la entrada, la matriz de estado, la matriz de entrada y la matriz de salida respectivamente, particularmente  $A = -1.25, B = 1.25, C = 16.666$ . El diagrama de bloques de la Ec. 2.3 se muestra en la Fig. 2.23.

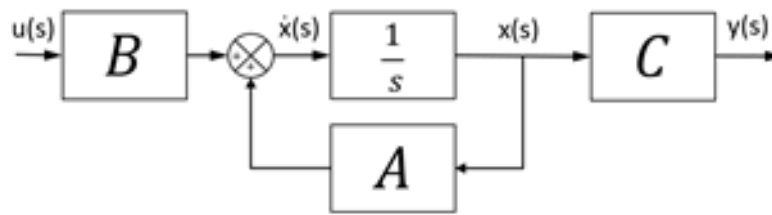


Figura 2.23: Representación en diagrama de bloques del sistema.

El primer paso antes de diseñar un controlador es demostrar la controlabilidad del sistema, para esto una matriz de controlabilidad  $L_c$  es definida como se ve en la Ec. 2.4.

$$L_c = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \tag{2.4}$$

Donde  $n=1$  es el orden del sistema, quedando así la matriz como se muestra en la Ec. 2.5

$$L_c = B = 1.25 \tag{2.5}$$

El sistema es controlable si el rango de la matriz  $L_c$  coincide con el orden del sistema que es de hecho el caso,  $n = 1$ . A continuación, se diseña un control de retroalimentación de estado; en la Fig. 2.24 se muestra la configuración básica de este controlador. El polo del sistema se encuentra en 1.25 como se ve en el denominador en la Ec. 2.2 , este polo se moverá a 2.5, para que el tiempo de respuesta del sistema se reduzca a la mitad. El polinomio característico deseado tiene entonces la forma mostrada en la Ec. 2.6.

$$\lambda + 2(1.25) = \lambda + 2.5 \tag{2.6}$$

En el diagrama de bloques de la Fig. 2.24, el bloque  $K$  representan la matriz de ganancia del controlador,  $L$  es el vector de ganancia del observador y  $K_r$  es la ganancia de entrada del controlador.

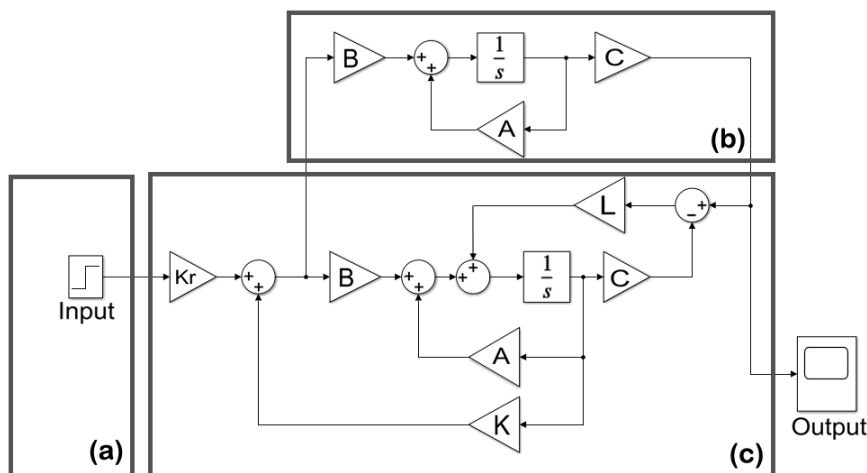


Figura 2.24: Configuración del controlador de retroalimentación de estado. (a) Señal de control que establece la velocidad deseada. (b) Sistema controlado. (c) Controlador.

Posteriormente se calculan los valores de la matriz de retroalimentación  $K = k_1$ , la ganancia  $K_r$  y el vector  $L = l_1$  que se muestra en la Fig. 2.24. En primer lugar, se define una matriz denominada Matriz Aumentada  $A_{LC}$  como se muestra en la Ec. 2.7. Luego, los nuevos polos del sistema, se calculan de acuerdo con la Ec.2.8.

$$A_{LC} = A - BK = -1.25 - 1.25 \cdot k_1 \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} |\lambda I - A_{LC}| &= 0 \Rightarrow \\ \lambda I - [-1.25 - 1.25k_1] &= 0 \Rightarrow \\ \lambda + 1.25 + 1.25k_1 &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Igualando el polinomio característico deseado de la Ec. 2.6 con el polinomio en la Ec. 2.8 se puede asegurar que los nuevos polos del sistema se encuentran donde se desea, por lo que el valor de  $k_1$  se define como se puede ver en la Ec. 2.9.

$$\begin{aligned} \lambda + 2.5 &= \lambda + 1.25 + 1.25k_1 \Rightarrow \\ k_1 &= 1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Aquí está claro que  $K = 1$ , a continuación, el valor de  $K_r$  se define como se ve en la Ec. 2.10.

$$K_r = -C(A_{LC}^{-1} - B^{-1})^{-1} \quad (2.10)$$

Donde el súper índice -1 representa la matriz inversa. Sin embargo, dado que el valor de la matriz de salida  $C$  es demasiado grande, se normalizará, por lo que  $C_N = 1$ , por lo que la ganancia  $K_r$  se calcula en Eq.2.11.

$$\begin{aligned} K_r &= -C_N(A_{LC}^{-1} - B^{-1})^{-1} \\ &= -1((-1.25 - 1.25k_1)^{-1}(1.25)^{-1})^{-1} = 2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Una vez que se obtienen  $K$  y  $K_r$ , uno debe probar la observabilidad del sistema mediante el uso de una matriz de estabilidad  $L_o$ , que está definida en la Ec. 2.12.

$$L_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La matriz de la Ec. 2.12 se extiende dependiendo del orden del sistema, ya que se trata de un primer orden, la matriz es como se ve en la Ec. 2.13.

$$L_o = 1 \quad (2.13)$$

El sistema es observable si el rango de la matriz  $L_o$  coincide con el orden del sistema, lo cual es el caso con  $n = 1$ . El vector de ganancia del observador  $L$  se determina encontrando el valor de  $l_1$  en la Ec. 2.14.

$$\begin{aligned} |\lambda \mathbf{I} - [\mathbf{A} - \mathbf{L} \mathbf{C}_N]| &= 0 \Rightarrow \\ \lambda - ((-1.25) - (l_1)(1)) &= 0 \Rightarrow \\ \lambda + 1.25 + l_1 &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dado que la velocidad del observador debe ser más rápida que la del sistema, los valores propios del observador deben elegirse al menos 4 veces más grandes que los del sistema controlado. Por lo tanto, la ecuación característica para el observador es la que se muestra en la Ec.2.15.

$$\lambda + 4(2.5) = \lambda + 10 = 0 \quad (2.15)$$

Esto permite la selección de los valores del vector de ganancia  $L$  igualando la Ec. 2.14 y la Ec. 2.15, como se ve en la Ec. 2.16.

$$\begin{aligned} \lambda + 10 &= \lambda + 1.25 + l_1 \Rightarrow \\ l_1 &= 8.75 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Aquí está claro que  $L = 8.75$ . Ahora que todos estos valores están ya definidos, el siguiente paso es simular el sistema y el controlador diseñado, para asegurar el correcto funcionamiento de ambos.

### 2.4.5. Simulación del sistema y controlador

Para asegurar que los valores encontrados anteriormente son correctos, y que el modelo del sistema es correspondiente al sistema, se ejecuta una simulación para verificar estos datos. El software utilizado para esto es Matlab y Simulink.

El sistema sin el controlador se prueba primero, para esto, el diagrama de bloques que se muestra en la Fig. 2.23 se recrea en Simulink y se aplica una señal de control de amplitud 9, su respuesta se muestra en la Fig. 2.25.

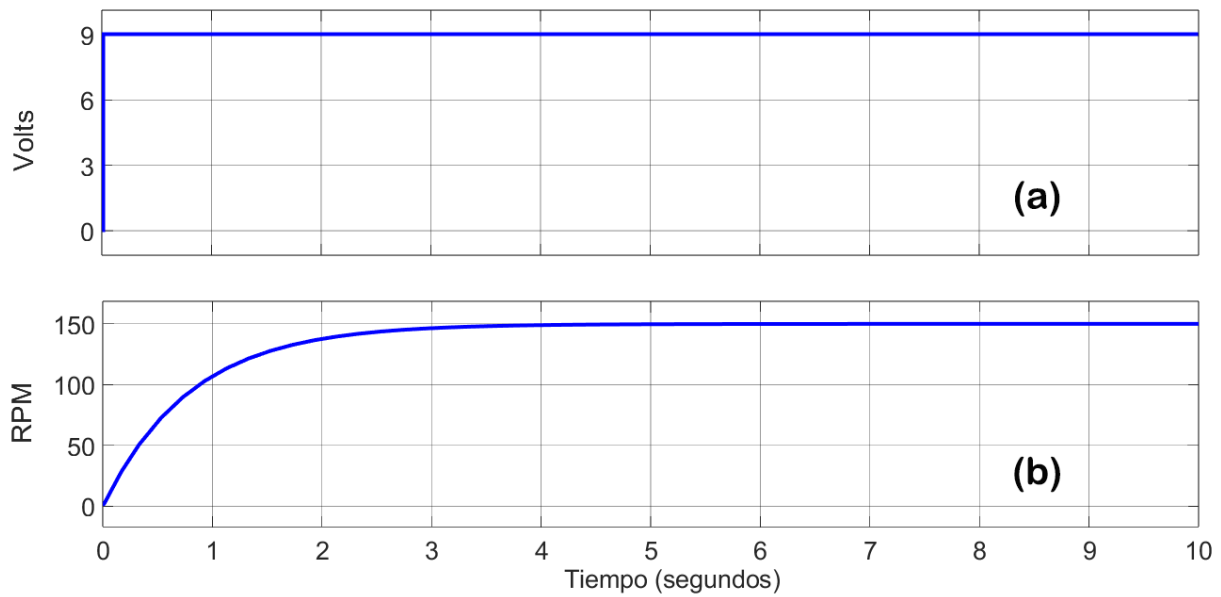


Figura 2.25: Simulación del sistema modelado. (a) Señal de entrada (b) Respuesta del sistema.

La curva característica obtenida de manera experimental y la modelada son vistas en la Fig. 2.26, aquí se puede ver que la curva mostrada en la Fig. 2.25 (b) corresponde a la curva de la Fig. 2.22. Eso significa que el modelo del sistema es correcto.

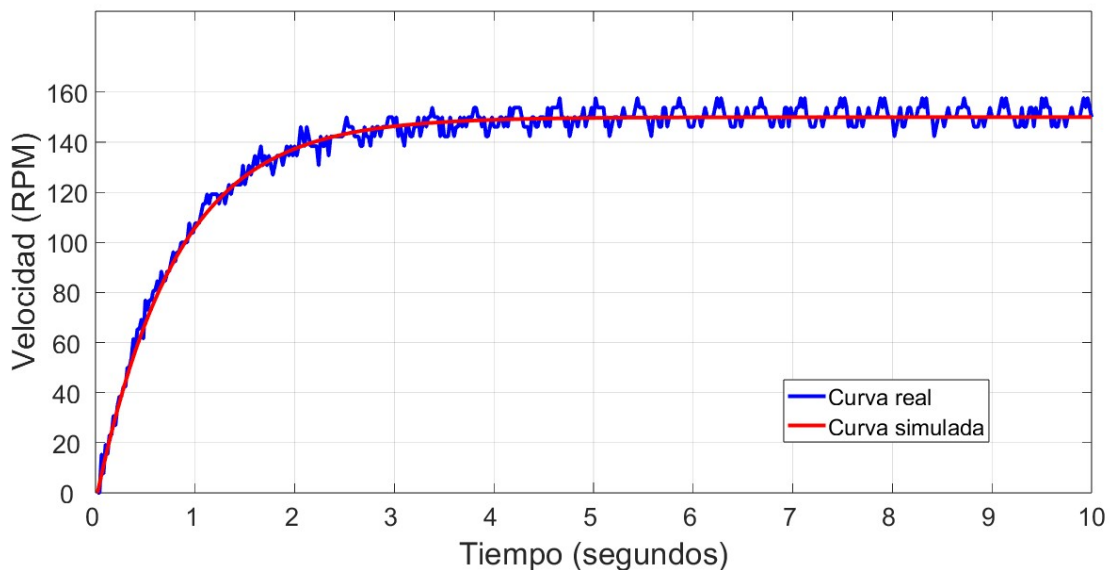


Figura 2.26: Curva real (azul) y curva modelada (rojo)

Después de esto, el controlador también se simula. El diagrama de bloques de la Fig. 2.24 se recrea una vez más en Simulink, su respuesta se muestra en la Fig. 2.27.

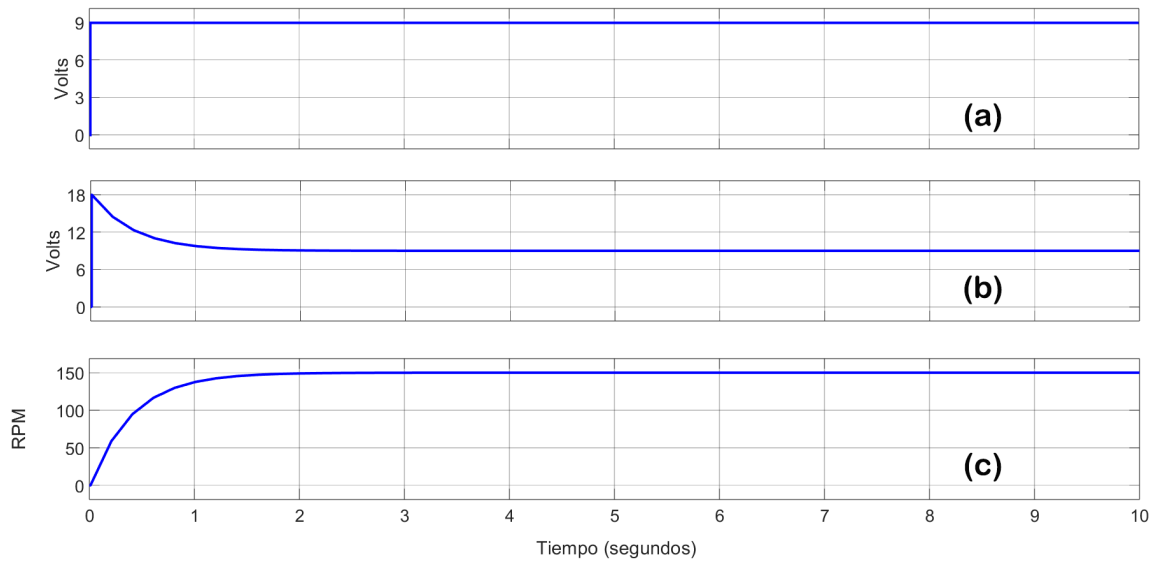


Figura 2.27: Simulación del sistema con el controlador. (a) Señal de entrada. (b) Señal de control. (c) Respuesta del sistema con el controlador.

Se puede ver que el tiempo de respuesta se redujo como se esperaba. Una vez que las simulaciones respaldan el controlador diseñado y el sistema, el siguiente paso es implementar el controlador en el módulo de hardware DSpace CP1103. Estos dispositivos se encuentran comúnmente en la industria y están diseñados específicamente para el desarrollo de controladores digitales multivariables de alta velocidad y simulaciones en tiempo real [26]. Una vez que este controlador sea probado y se demuestre que funciona apropiadamente en el módulo CP1103, se implementará en el microcontrolador STM32F103C8T6 [22] con el fin de que este sea portátil.

### 2.4.6. Programación del módulo CP1103

Una vez que las simulaciones se ejecutan satisfactoriamente, el controlador se programa en el hardware deseado, el módulo CP1103. Una visión general de la implementación se muestra en la Fig. 2.28 y un esquema de esta implementación se muestra en la Fig. 2.29.

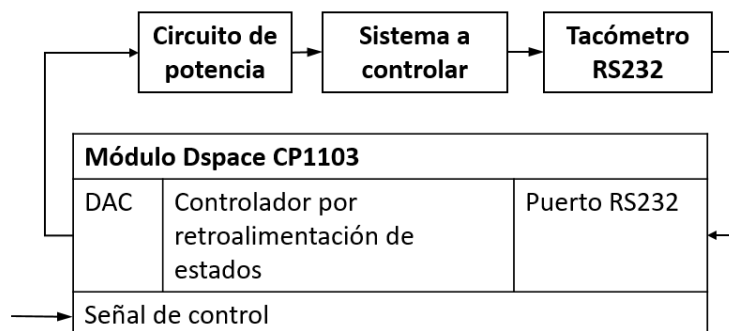


Figura 2.28: Configuración de la implementación física del controlador.

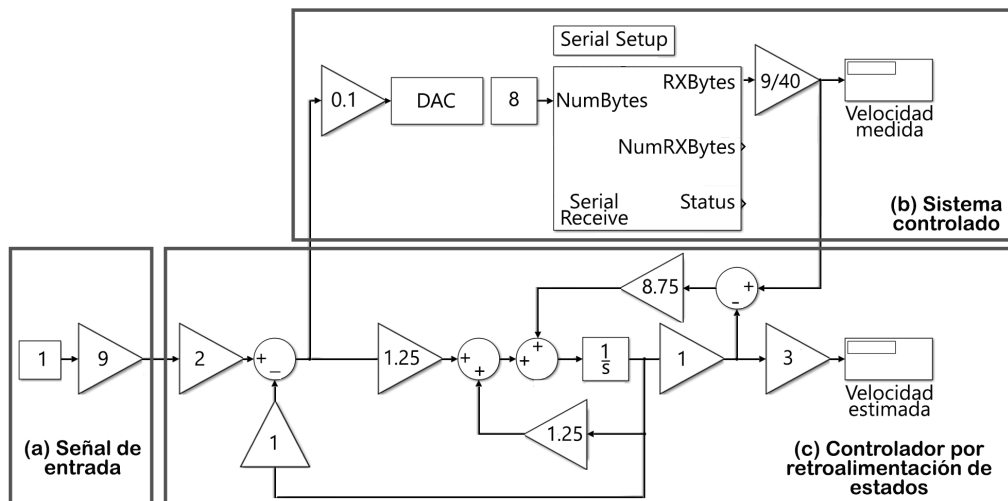


Figura 2.29: Esquema de la implementación del controlador en Simulink aplicado al sistema físico.

Observe en la Fig. 2.29 que el sistema que se controla está interconectado por un Convertidor Digital a Analógico (DAC por sus siglas en inglés) en su entrada y un tacómetro en su salida, respectivamente. Además, se añaden algunos bloques más para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

En la Fig. 2.29 (a), el bloque de entrada del valor 1 solo puede tener dos valores, 0 y 1, de esta manera el bloque de ganancia del valor 9 proporciona una salida de paso de 0 y 9, según sea necesario.

En la Fig. 2.29 (b) se usa el bloque de ganancia de valor 0.1 porque el valor que ingresa al DAC se incrementa por un factor de 10 por defecto en el Módulo CP1103. El bloque de valor 9/40 se utiliza para normalizar el valor obtenido por el dispositivo que mide la velocidad. Se dividió por 40 porque el número de cuentas del dispositivo que mide la velocidad lee cuando alcanza su estado estable. Luego se multiplica por 9 para ser concordante con la entrada de señal. Más detalles sobre el tacómetro se explicarán más adelante.

Una vez que este sistema de bloques está construido y cargado en el módulo CP1103, se necesitan dos dispositivos más para implementar completamente este controlador, el dispositivo que mide la velocidad y un circuito de alimentación en la salida del DAC para impulsar el motor.

### 2.4.7. Etapa de potencia

El siguiente paso es su implementación en el Módulo CP1103 de dSpace, para esto. Puesto que las salidas analógicas de dicho módulo no pueden mover por sí solas al motor, se utiliza un circuito de potencia.

El circuito de potencia utilizado es un amplificador de potencia Opamp, que se puede ver en la Fig. 2.30. Este circuito aumenta la señal de entrada para que la corriente de salida alcance los límites del transistor, que se puede elegir para ser un transistor de alta potencia.

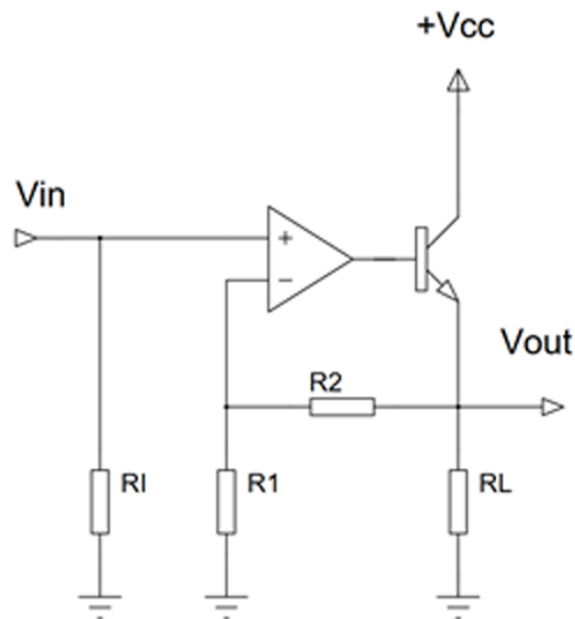


Figura 2.30: Circuito de potencia.

El voltaje de salida viene dado por la relación indicada en Ec. 2.17 [27]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.17)$$

La relación entre la salida y la entrada es 3:1, esto se debe a una limitación del módulo DAC del módulo CP1103, que solo proporciona hasta 10 voltios (tenga en cuenta que se requieren más de 10 como se ve en la Fig.2.27(b)). Los valores elegidos para las resistencias fueron  $R_1 = 1k\Omega$ , y  $R_2 = 2k\Omega$ .  $R_I$  es la impedancia de entrada del DAC, y  $R_L$  es la impedancia de la carga de salida. El Opamp utilizado fue el multiuso LM741[28], el transistor de potencia era un TIP41C [29] que alcanza una corriente de salida máxima de 6 Amperios, que es suficiente para cubrir la corriente demandada por el motor.

### 2.4.8. Conexión con el módulo CP1103

Para poner a trabajar el controlador diseñado, se ensamblan los dispositivos anteriores. El Módulo CP1103, el circuito de potencia, el tacómetro y el motor conectado a una carga fija están conectados como se describe en la Fig. 2.28, y estos dispositivos se muestran en la Fig. 2.31.

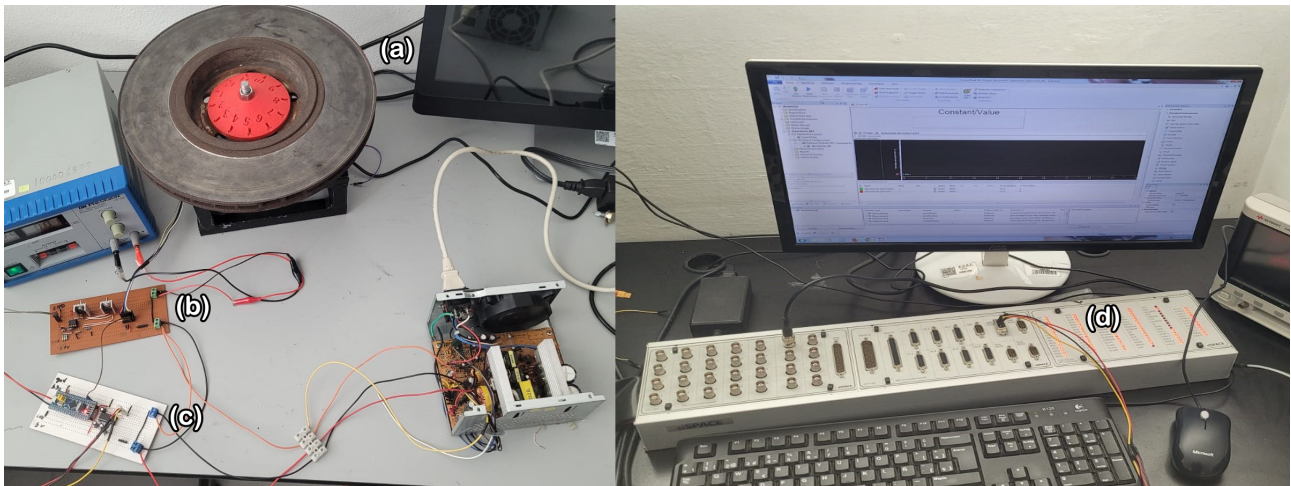


Figura 2.31: Conexión del sistema. (a) Disco de freno acoplado al motor y la estructura. (b) Circuito de potencia. (c) Tacómetro. (d) Modulo CP1103.

Después de diseñar, implementar y probar el controlador, se analiza la respuesta del sistema para determinar si se obtiene el comportamiento esperado. En la Fig. 2.32 se puede ver la respuesta del motor sin y con el controlador. En ambos casos, se aplica un escalón de entrada, como se muestra en la Figura 2.24 (a).

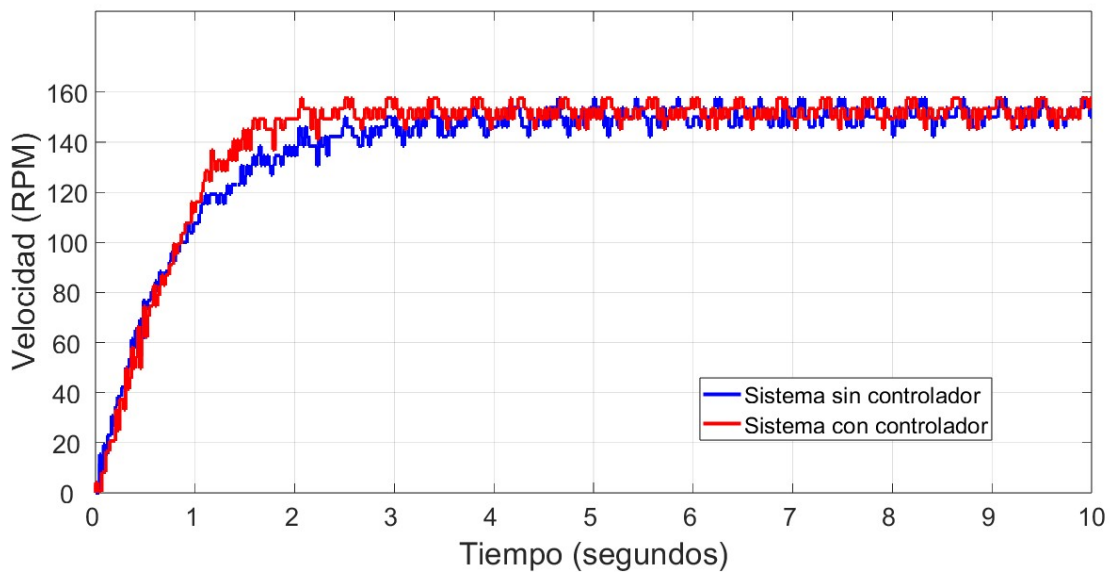


Figura 2.32: Comparación de las curvas de respuesta

Se esperaba que el sistema alcanzara su estado estacionario a los 2 segundos, pero lo hace a los 2.200 segundos, este error de 200 ms podría ser producido por cambios ambientales (temperatura), eléctricos (fluctuaciones de voltaje en la fuente de alimentación), o mecánicos (rigidez de la base sobre la que está montado el motor).

Finalmente, a las curvas de la Fig. 2.32 se les calcula la Integral del Cuadrado del Error (ISE por sus siglas en inglés) [30]:

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (2.18)$$

El ISE se define como la integral de la diferencia entre la señal obtenida y la referencia de entrada (el escalón). Los valores de ambas curvas fueron normalizados, a modo que su valor en estado estacionario (150 RPM) valiera 1 unidad. Se realizó lo mismo con el valor del escalón de entrada. Por su parte, el valor de  $T$  se eligió como 4 segundos, ya que es el tiempo en que el sistema sin controlador alcanza su estado estacionario.

Dado que la respuesta del sistema con el controlador alcanza su estado estacionario antes que el sistema sin controlador, el ISE debe ser inferior con dicho controlador. El ISE calculado para el sistema no controlado es 651.10, y el ISE para el sistema controlado es 635.86, lo que demuestra cómo se reduce el error al aumentar la velocidad de respuesta de la velocidad.

Adicionalmente, la señal de control procedente del DAC del módulo DSpace CP1103, que impulsa el motor a través del circuito de alimentación, se muestra en la Fig. 2.33, esta curva se asemeja a la curva de la Fig. 2.27 (b). Observe cómo esta señal es 3 veces más pequeña que la de la Fig. 2.27(b), ya que esta señal será amplificada por 3 veces por el amplificador de potencia Opamp que se muestra en la Fig. 2.30.

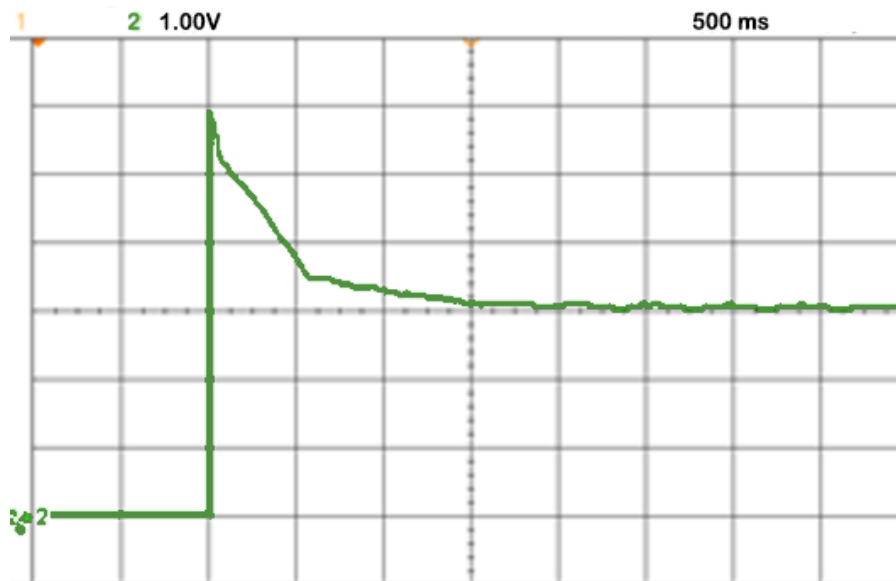


Figura 2.33: Señal de control previa al circuito de potencia

A pesar de ver un pequeño error en el tiempo de respuesta del sistema con el controlador, la respuesta fue la esperada, la velocidad final también fue correcta y no hubo fluctuaciones no deseadas en la salida. Esto es muy importante, ya que muestra la eficacia del controlador elegido en la aplicación propuesta, siendo este un punto de anclaje para la siguiente parte de este trabajo, ya que se ocupará la velocidad para monitorear la posición del disco, pudiendo así analizar al disco en diferentes secciones.

## 2.5. Desarrollo del sistema de análisis de la información obtenida

Una vez terminado el sistema de control, se procede a generar un programa que analice las fotos obtenidas por el sistema interferométrico, para esto se estableció la metodología para realizar el análisis de las fotos obtenidas a partir de la posición del disco respecto al tiempo y de los píxeles de cada una de las fotos. Nótese como puesto que el disco se está moviendo, la posición del disco cambia en cada una de las fotos obtenidas, pero gracias a que la velocidad del disco y la tasa de captura de las fotos es constante, se pueden caracterizar para determinar el método correcto para el análisis.

### 2.5.1. Caracterización de las zonas del disco

Para encontrar como se analizaron las fotos obtenidas del sistema interferométrico, primero se encontró la posición del disco en cada una de estas. En la Fig. 2.34 se ve como el disco se divide en 8 partes para su análisis, se especifica la dirección en la que girará el disco, se muestra el diámetro del disco, y se establece una referencia del inicio para el análisis.

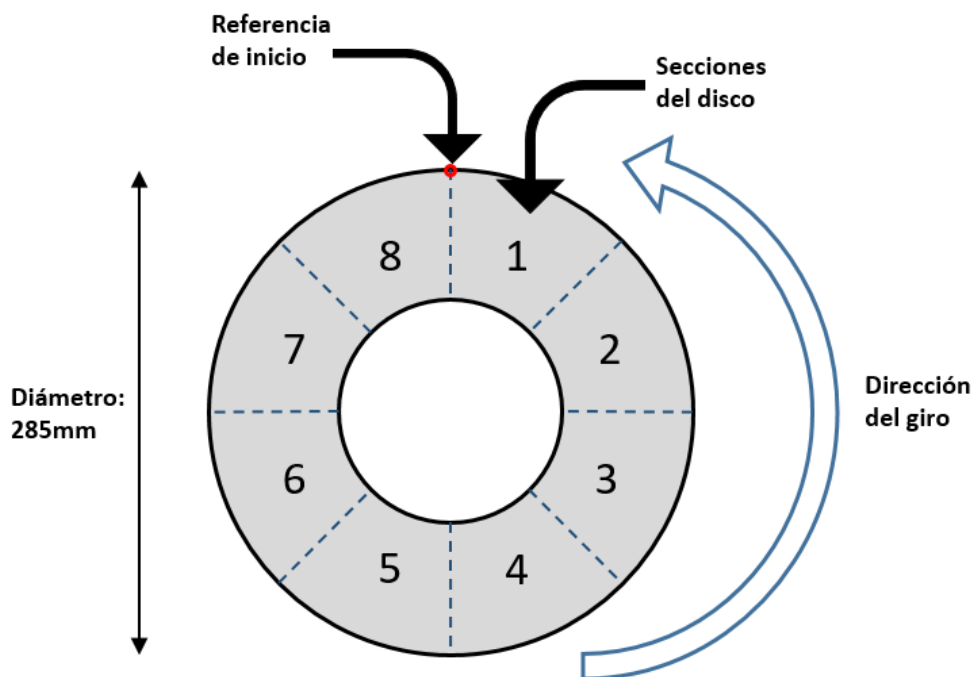


Figura 2.34: Disposición y medidas del disco de freno a analizar

La zona a la cual se realiza el análisis interferométrico está mostrada en la Fig. 2.35. Debido a que el área que el láser es capaz de iluminar tiene un tamaño de 40mm de ancho, un cuadro de análisis  $C_a$  de 40mm x 40mm es el que se examinará en cada sección del disco. Este cuadro está centrado respecto a la sección del disco en la que se ubica, y el centro de este cuadro se ubica a una distancia  $D_a$  de 110mm.

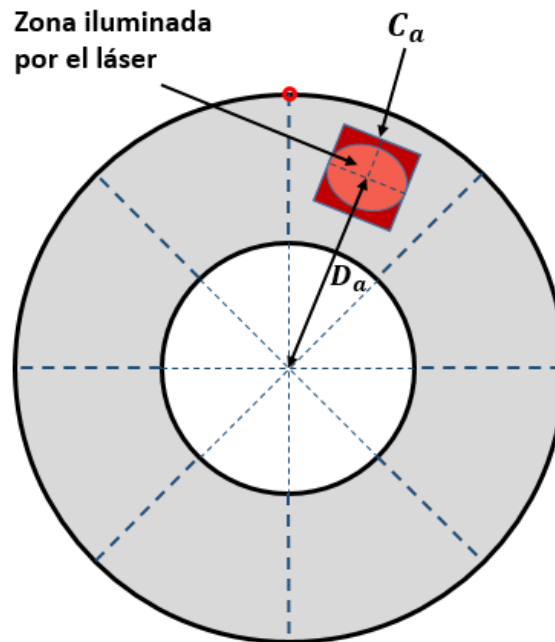


Figura 2.35: Zona del análisis interferométrico

Puesto que el disco estará girando continuamente la posición del disco al momento de tomar las fotos cambiará. Por este motivo es que se elige un píxel inicial que corresponde con una zona del disco, y caracterizando la posición a partir de la velocidad se determina un nuevo píxel para analizar, que siga correspondiendo a la zona del disco analizada en el principio. Los parámetros a considerar para esto serían:

- $V_d$ : La velocidad a la que se mueve el disco, 150 RPM.
- $D_a$ : La distancia del centro del cuadro de captura respecto al centro del disco, 110 mm.
- $P_d$ : Los píxeles correspondientes al cuadro del disco.
- $V_c$ : La tasa de cuadros por segundo (FPS) de la cámara.

Dado que los parámetros  $V_d$  y  $D_a$  permanecerán constantes, y que para el análisis interferométrico se pueden cambiar los parámetros  $P_d$  y  $V_c$ , la función que nos definirá el píxel que se tiene que analizar será dependiente de estos 2 últimos parámetros.

Primero se encontró la distancia que se recorrerá en el espacio de tiempo que abarca todo el cuadro. Para esto, se trazó un círculo cuyo centro está en el centro del disco, y su radio es  $D_a$ . Después se encontraron los puntos formados por la intersección de las caras del cuadro y el círculo trazado, tal como se ve en la Fig. 2.36.

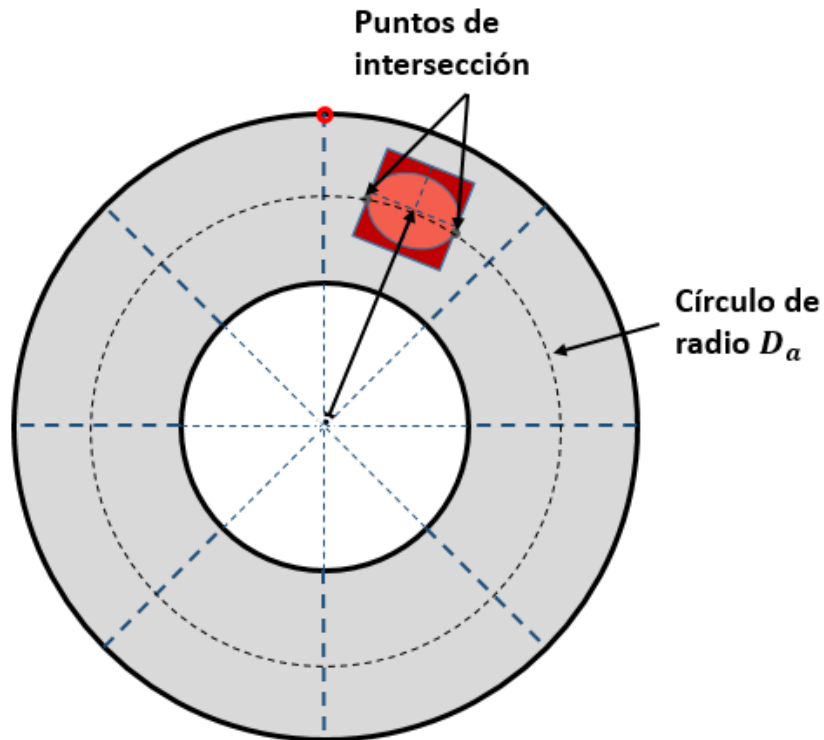


Figura 2.36: Intersecciones entre el círculo con radio 110 mm y el cuadro de 40x40mm

De los puntos de intersección y el círculo de la Fig. 2.36 se puede encontrar un segmento de arco  $A$ , al que le corresponde una cuerda  $K$  y un ángulo  $\alpha$ , tal como se ve en la Fig. 2.37

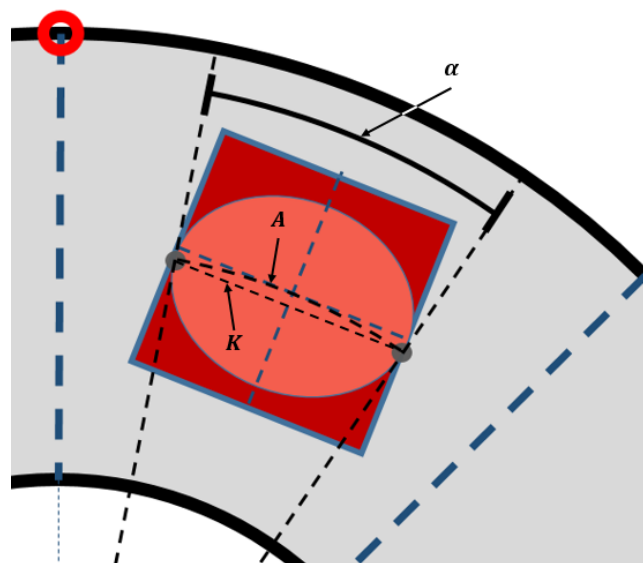


Figura 2.37: Ángulo formado por la zona de interés de 40x40mm

La longitud de la cuerda  $K$  está dada por:

$$K = 2 \cdot D_a \cdot \text{Sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.19)$$

Las longitudes de  $K$  y de  $D_a$  son conocidas, pero el ángulo  $\alpha$  no lo es, pero puede ser obtenido de:

$$\begin{aligned} 40mm &= 2 \cdot 110mm \cdot \text{Sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \Rightarrow \\ \alpha &= 2 \cdot \text{Arcsen}\left(\frac{40mm}{2 \cdot 110mm}\right) = 20.95^\circ \end{aligned} \quad (2.20)$$

Este ángulo  $\alpha$  dará la pauta para la elección del píxel a analizar en cada foto tomada en el análisis interferométrico, junto a la velocidad del disco  $V_d$  y la tasa de cuadros por segundo de la cámara  $V_c$ . Del ángulo  $\alpha$  se obtiene que los segmentos de ángulo correspondientes a cada una de las zonas del disco son los mostrados en la Tabla 2.3. Si hay alguna anomalía en el disco fuera de estas zonas, estas se verán reflejadas solo si la intensidad a la que vibra el disco es suficiente para que el movimiento se transfiera a las zonas que sí pueden ser analizadas.

Tabla 2.3: Segmentos de ángulos correspondientes con las zonas del disco

<b>Sección</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Segmento de ángulo	12.025°- 32.975°	57.025°- 77.975°
<b>Sección</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Segmento de ángulo	102.025°- 122.975°	147.025°- 167.975°
<b>Sección</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Segmento de ángulo	192.025°- 212.975°	237.025°- 257.975°
<b>Sección</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Segmento de ángulo	282.025°- 302.975°	327.025°- 347.975°

El disco gira una velocidad de 150 RPM, por lo que el tiempo en que da una revolución,  $T_r$ , es de  $400ms$ . Una revolución consta de  $360^\circ$ , de aquí se puede inferir que el tiempo  $T_a$  correspondiente al segmento de arco  $A$  es de:

$$T_a = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot T_r = \frac{20.95^\circ}{360^\circ} \cdot 400ms = 23.28ms \quad (2.21)$$

La tasa de cuadros por segundo de la cámara,  $V_c$ , es de 8000 FPS, esto significa que el número de fotos que se tomarán en este segmento se calcula de la siguiente forma:

$$F_t = T_a \cdot V_c = 23.28ms \cdot 8000 \text{ FPS} = 186 \text{ Fotos} \quad (2.22)$$

Ya habiendo definido el número de fotos correspondientes con el cuadro de análisis, se procede a encontrar que píxeles son a los que se les debe de analizar en cada una de estas fotografías. A cada fotografía se le denominará como  $N_f$ , siendo  $f$  el número de la fotografía a analizar.

### 2.5.2. Selección de píxeles

Una vez definido el tiempo en el cuál se tomarán las fotos, se puede proceder a definir que píxeles se analizarán. Mientras el disco esté girando, la localización de un punto en específico va a cambiar respecto al tiempo, y se moverá sobre el segmento de arco  $A$ . Para ayudar al análisis de los píxeles en las fotos, se definieron 2 ejes en el cuadro de análisis, tal como se ve en la Fig. 2.38.

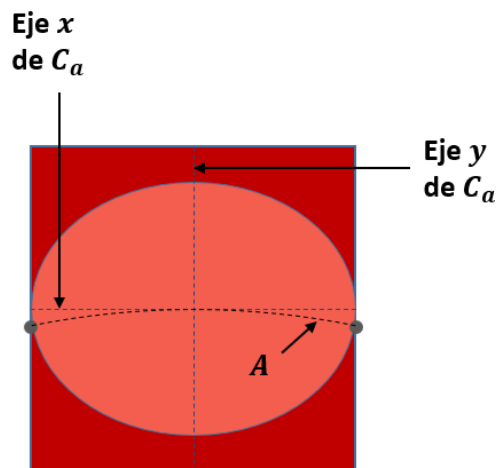


Figura 2.38: Segmento de arco a analizar

Los píxeles de cada foto están definidos por 2 coordenadas,  $X_f$  y  $Y_f$ , por lo que encontrar una función que defina el valor de estos píxeles en relación con cada foto tomada es el siguiente paso para realizar el análisis.

En este trabajo, el tamaño de las fotos tomadas por la cámara del arreglo interferométrico es de 640 x 480 píxeles, siendo los 640 píxeles de anchura correspondientes con los 40mm de anchura del cuadro, mientras que los 480 de altura se ajustan al centro del cuadro de análisis, tal como se ve en la Fig. 2.39.

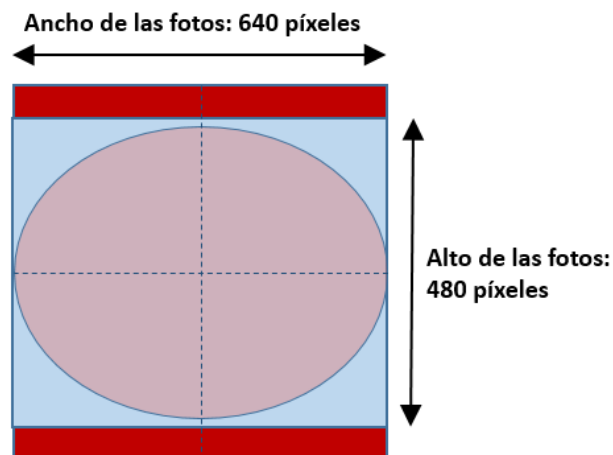


Figura 2.39: Relación entre las fotos tomadas y el cuadro de análisis

De aquí se obtiene el número de píxeles de cada foto por cada milímetro de  $C_a$ . A esta relación denominada  $S_p$  se obtiene de:

$$S_p = \frac{640 \text{ Píxeles}}{40 \text{ mm}} = 16 \cdot \frac{\text{Píxeles}}{\text{mm}} \quad (2.23)$$

Si se quiere analizar un punto en específico del disco, dicho punto se encuentra en una posición diferente en cada foto, por eso se tiene que caracterizar la posición de un punto específico del disco en cada una de estas fotos. En la Fig. 2.40 se muestran algunos de estos puntos de análisis  $P_n$ , junto al segmento de arco de análisis  $A$ .

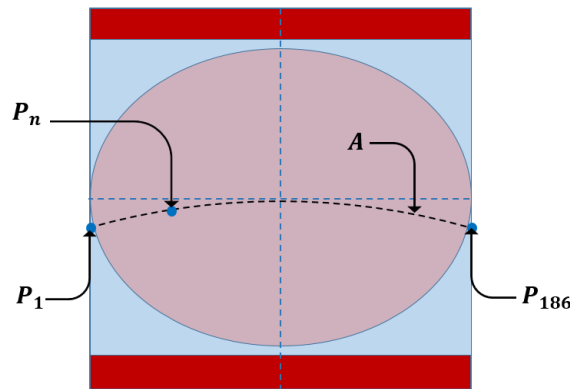


Figura 2.40: Puntos de análisis sobre el segmento de arco  $A$  correspondientes a la foto 1,  $n$ , y 186 respectivamente.

Respecto al eje  $X$ , la posición de estos puntos de análisis se obtiene de la relación entre el ancho de la foto en píxeles y el número de fotos tomadas:

$$R_x = \frac{640 \text{ Píxeles}}{186 \text{ Fotos}} = 3.44 \cdot \frac{\text{Píxeles}}{\text{Foto}} \quad (2.24)$$

Puesto que este es un número no entero, para cada foto el píxel seleccionado se obtiene por truncamiento hacia abajo, quedando su coordenada  $P_x$  en el Eje  $X$  como:

$$X_f = \lfloor R_x \cdot N_f \rfloor \quad (2.25)$$

Para obtener la coordenada  $Y_f$  se realizó lo siguiente. Se conoce cual es el ángulo formado entre los punto de intersección, que es  $\alpha$ . Siendo 186 fotos, significa que los puntos de análisis están separados entre si por una  $\Delta\alpha$  dada por esta relación.

$$\Delta\alpha = \frac{20.95^\circ}{186 \text{ Fotos}} = 0.1126^\circ \quad (2.26)$$

Para encontrar la coordenada  $Y_f$  se tiene que analizar la posición de punto de análisis respecto al eje  $y$ . Todo píxel  $P_f$  se encuentra debajo de la mitad de cada foto, por lo que a todo  $P_f$  estará debajo 240 píxeles. Estos puntos están desplazados hacia abajo una cierta distancia, y cada uno de estos puntos tiene asociado a una cuerda  $K_f$  respecto al segmento

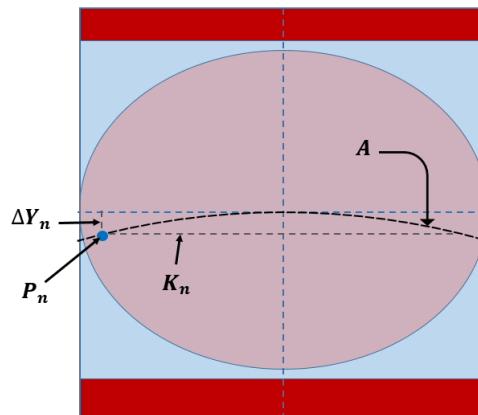


Figura 2.41: Desplazamiento de  $P_f$  respecto al eje  $y$  de  $C_a$

A. Asimismo tienen asociados una sagita  $\Delta Y_f$ , que es la distancia de  $P_f$  en el eje  $Y$  de  $C_a$  en cada foto. Esto se puede ver en la Fig. 2.41.

Esta distancia  $\Delta Y_f$  es correspondiente con la porción del ángulo  $\alpha$  que corresponde con cada punto  $P_f$ . El ángulo  $\alpha_f$  correspondiente a cada uno de estos puntos está dado por:

$$\alpha_f = \alpha - N_f \cdot \Delta\alpha \cdot 2 \quad (2.27)$$

Quedando entonces que el valor de  $\Delta Y_f$  este dado por:

$$\Delta Y_f = D_a \left[ 1 - \cos\left(\frac{\alpha_f}{2}\right) \right] \quad (2.28)$$

Esta distancia está en mm, por lo que para encontrar la coordenada  $Y_f$  esta distancia se tiene que convertir en píxeles. De la Eq.2.23 se sabe que cada 16 píxeles de la foto equivalen a 1mm, por lo que  $\Delta Y_n$  dado en píxeles sería:

$$\Delta Y_{fp} = \Delta Y_f \cdot S_p \quad (2.29)$$

Quedando entonces, que la coordenada  $Y_f$  está dada por:

$$Y_f = [240 + \Delta Y_{fp}] \quad (2.30)$$

Una vez caracterizada la posición de un punto en particular del disco para su análisis, se procede a diseñar otro programa que haga este mismo análisis en 8 diferentes partes del disco.

### 2.5.3. Toma de fotografías respecto a la posición del disco

Ya habiendo encontrado una relación entre la posición en una parte del disco con las fotos tomadas, el siguiente paso fue realizar un programa que, dependiendo en cual zona del disco se encuentre, de la orden a la cámara para la captura de fotografías. Para esto, se analizó la posición del disco respecto al tiempo.

Una vez la velocidad del disco se encuentra constante, se sabe que su posición va a ir incrementando hasta llegar al punto donde inició su recorrido. Una representación del comportamiento esperado se puede ver en la Fig. 2.42.

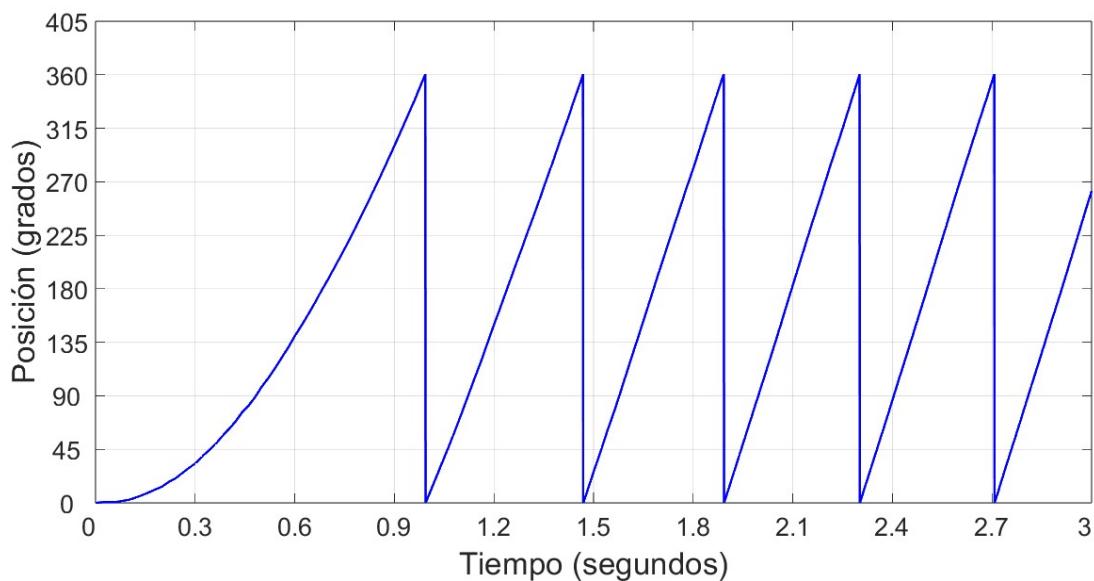


Figura 2.42: Ejemplo de la posición del disco es los primeros 3 segundos de movimiento

Como quedó establecido previamente que la velocidad del motor alcanza su velocidad en 2 segundos, y como se ve en la Fig. 2.42, esto causa que la posición al inicio del movimiento no se comporte de modo lineal, por lo que el análisis de los discos debe iniciar una vez la velocidad del motor sea constante.

Una vez la velocidad del motor sea constante, se mandan las órdenes a la cámara para la toma de las fotografías dependiendo de la sección del disco que se quiera analizar.

Supóngase que el disco gira a una velocidad constante; para hacer el análisis al disco en 8 zonas diferentes, se tienen que mandar 8 impulsos a la cámara, cada uno correspondiente con una zona en específico del disco. Además, estos impulsos deben estar controlados por un operador, a modo de que el mismo pueda realizar ajustes entre toma y toma de ser necesario. Por eso mismo, se planteó el algoritmo de la Fig. 2.43.

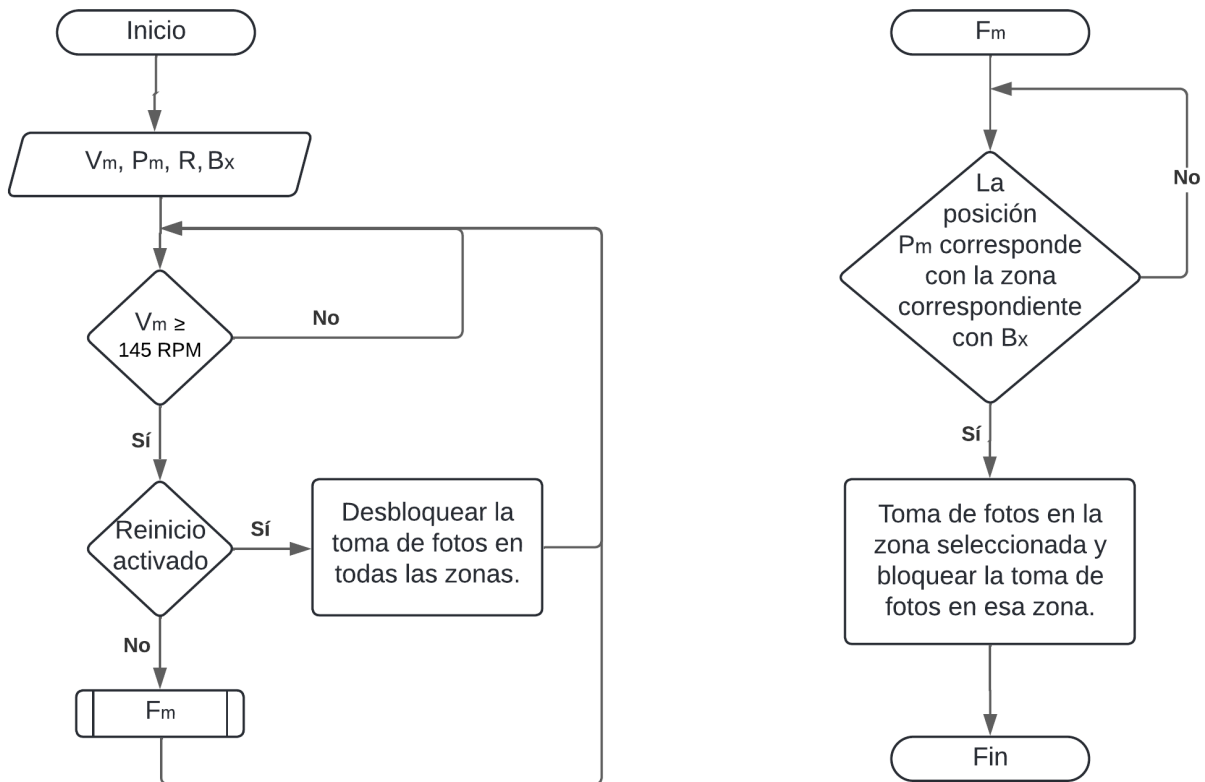
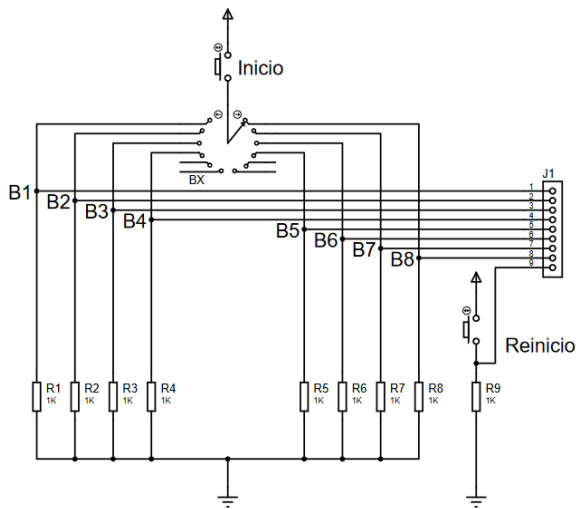


Figura 2.43: Algoritmo para la toma de fotos.

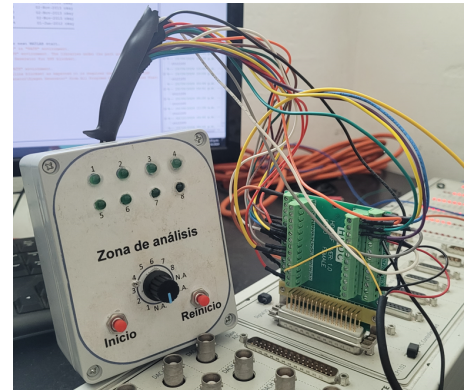
Siendo:

- $V_m$ : Velocidad del disco.
- $P_m$ : Posición del disco.
- $B_x$ : Señal para seleccionar la sección del disco a analizar (siendo  $x$  correspondiente con la zona del disco a analizar).

Este algoritmo sería implementado en el módulo CP1103. Se contaría con 8 botones para la selección de cada una de las zonas que se muestran en la Fig. 2.34. De este modo, el análisis puede ser selectivo de cierta área en específico del disco. Se empleó de un botón de reinicio, debido a que la estructura para implementar este algoritmo está basada en latches S-R. El diagrama del circuito empleado para mandar los impulso al módulo y una foto de este circuito implementado se pueden ver en las Fig. 2.44a y 2.44b respectivamente.



(a) Circuito implementado.



(b) Caja de control.

Figura 2.44: Elementos para la selección de la zona a analizar

La caja de control cuenta con 8 leds indicadores. Estos se iluminan para mostrar que zona del disco ya se ha analizado.

De manera general, el diagrama completo del sistema de toma de fotos sería el mostrado en la Fig. 2.45.

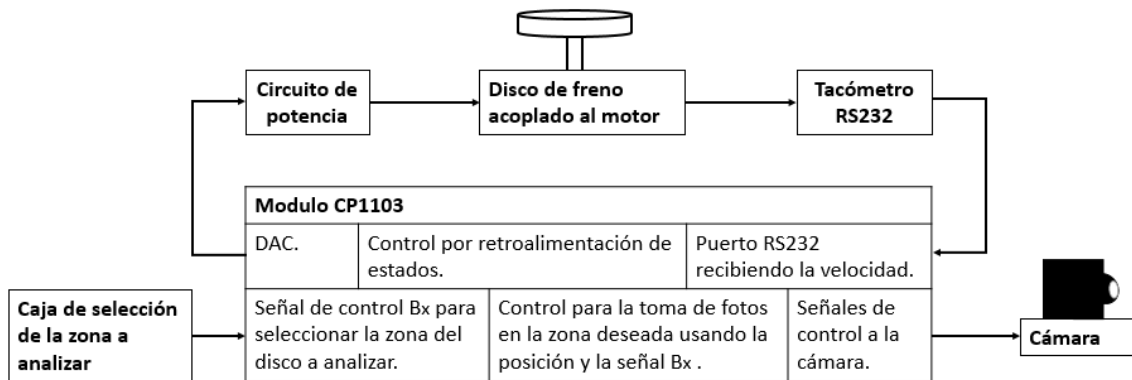


Figura 2.45: Diagrama del sistema para la toma de fotos.

En este capítulo se describió como se desarrollaron los dispositivos y programas necesarios para implementar el dispositivo propuesto. Una vez realizado todo esto, se procedió a hacer pruebas tanto del control de velocidad como del control para la toma de fotos.

# Capítulo 3

## Resultados

En esta sección se presentan los resultados del control de velocidad y la obtención de la posición, la emulación de las señales para la activación de la cámara del arreglo interferométrico, los resultados del análisis de las vibraciones del disco usando el micrófono de contacto en el disco de freno, y el análisis de los patrones de moteado de pastillas piezoeléctricas vibrando a frecuencias específicas como prueba de concepto del arreglo Mach-Zehnder.

### Contenido

---

<b>3.1 Sistema de control de velocidad y monitoreo de la posición . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>3.2 Sistema de control para la toma de fotos . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>3.3 Análisis de las vibraciones del disco . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>3.4 Análisis de los patrones de moteado . . . . .</b>	<b>61</b>

---

### 3.1. Sistema de control de velocidad y monitoreo de la posición

Una vez implementado el controlador por retroalimentación de estados, se procedió a determinar la posición del disco usando la información obtenida. Para esto, se integró la velocidad del disco usando el bloque de integrador de Matlab. Dicho bloque reinicia el valor de la integral calculada a través de un impulso externo, el cual es enviado por un circuito basado en el sensor de efecto Hall A31144 [31], apoyado en un imán colocado en la base que sostiene al disco. Tanto el bloque como el sensor utilizados pueden ser vistos en las Fig. 3.1a y 3.1b respectivamente.

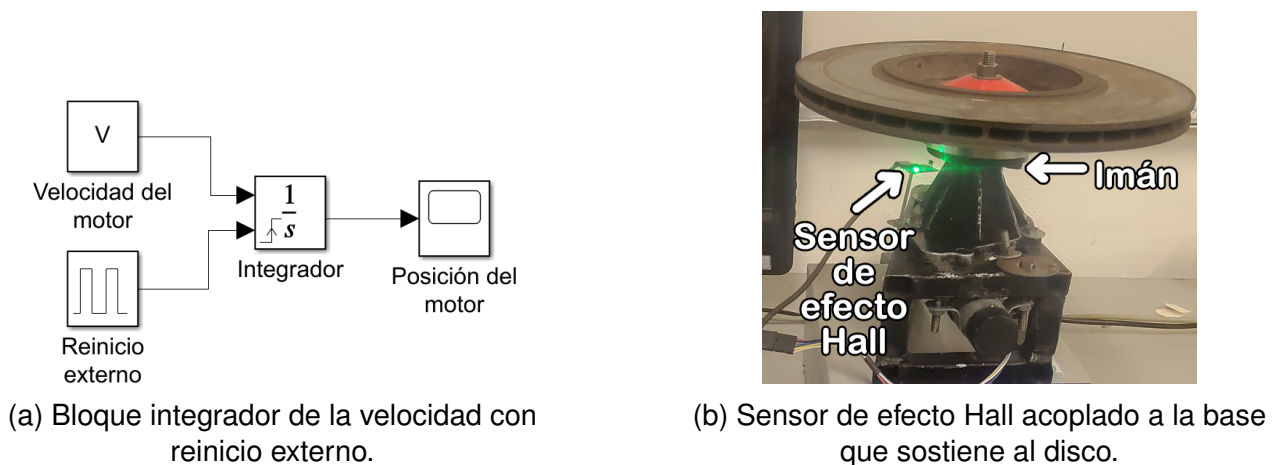


Figura 3.1: Elementos para la obtención de la posición usando la velocidad.

Las curvas de velocidad y posición obtenidas se pueden ver en la Fig. 3.2.

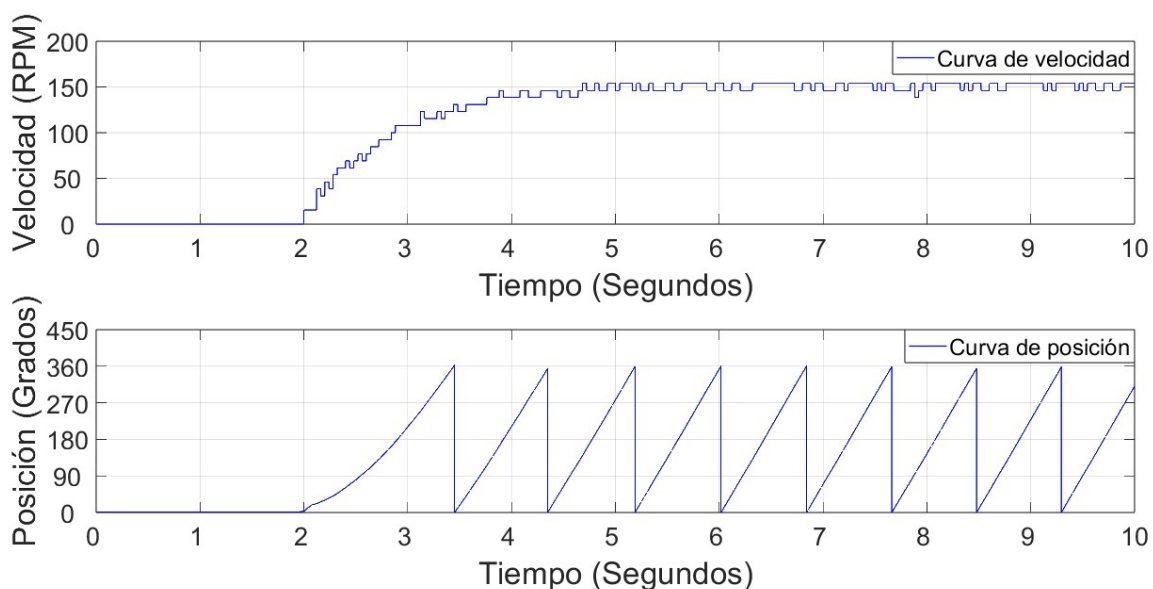


Figura 3.2: Posición y velocidad del motor.

Nótese cómo la velocidad es correspondiente con la mostrada en la Fig. 2.32, ya que alcanza su velocidad final en alrededor de 2 segundos. De la posición, se observa que al inicio tarda más tiempo en dar una revolución, y posteriormente, ya que la velocidad es constante, tarda el mismo tiempo en dar cada una de sus revoluciones, tal como se muestra en la Fig. 2.42.

Habiendo encontrado que el comportamiento de la posición es consistente con lo esperado, se procede a probar que el sistema que emula las señales a la cámara para la captura de fotos funciona adecuadamente.

## 3.2. Sistema de control para la toma de fotos

Para comprobar que el sistema de control para la toma de fotos funciona de manera correcta, a través de la caja de control se emularon las órdenes para tomar fotos en las zonas del disco en orden del 1ero al 8avo, (de la señal  $B_1$  a la  $B_8$ ). En la Fig. 3.3 se puede ver tanto el módulo CP1103, la caja de control para la toma de fotos, y el disco de freno acoplado al motor.



Figura 3.3: Sistema para la toma de fotos.

Los resultados de esta prueba pueden ser vistos en la Fig. 3.4.

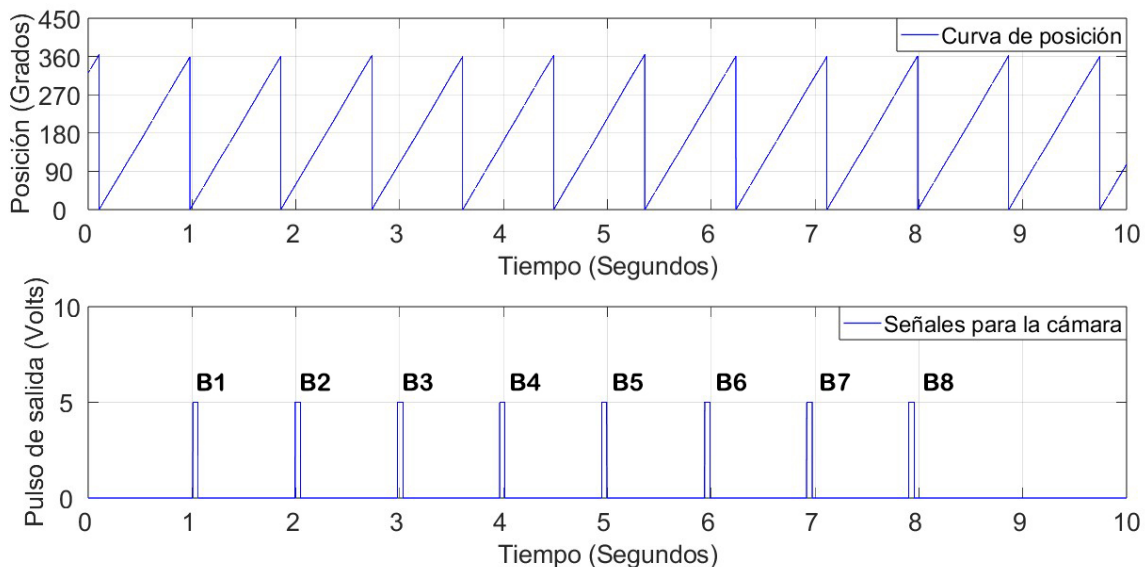


Figura 3.4: Posición del motor y los pulsos de activación de la cámara.

Los pulsos corresponden con los ángulos mostrados en la Tabla 2.3. Una vez que el equipo de interferometría sea capaz de obtener los patrones de moteado deseados, se puede corroborar que las fotos obtenidas corresponden con las zonas del disco que se desean analizar.

### 3.3. Análisis de las vibraciones del disco

En estudios previos se ha determinado que la presencia de defectos en un disco de freno genera una alteración en sus frecuencias de resonancia, diferenciándolas de las que presenta un disco libre de imperfecciones. Esta observación fundamenta la realización del presente análisis, donde se compararon las frecuencias de resonancia de dos discos distintos: uno sin alteraciones y otro con perforaciones intencionales introducidas para modificar su modo de vibración. Los discos sin y con perforaciones pueden ser vistos en la Fig. 3.5a y 3.5b respectivamente.

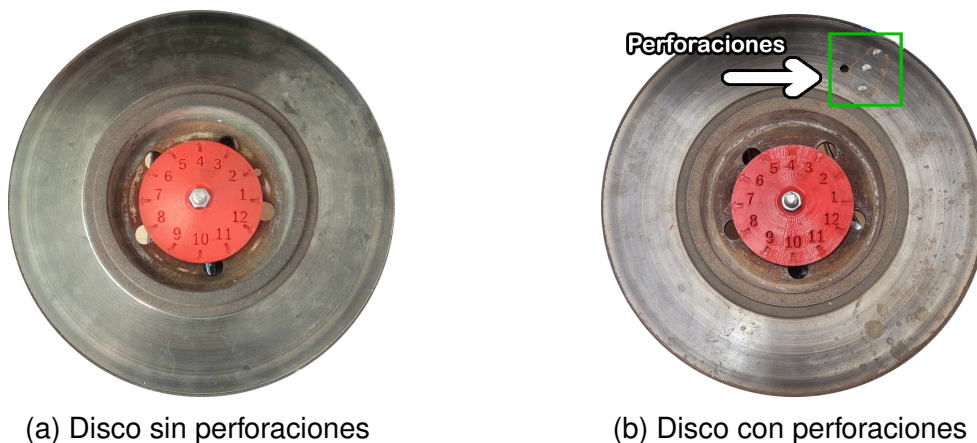


Figura 3.5: Discos a analizar.

De estos 2 discos, se realizaron pruebas para encontrar sus modos de vibración utilizando el circuito del micrófono de contacto mostrado en la Fig. 2.11. Los resultados de estas pruebas pueden ser vistos en las Fig. 3.6 y 3.7.

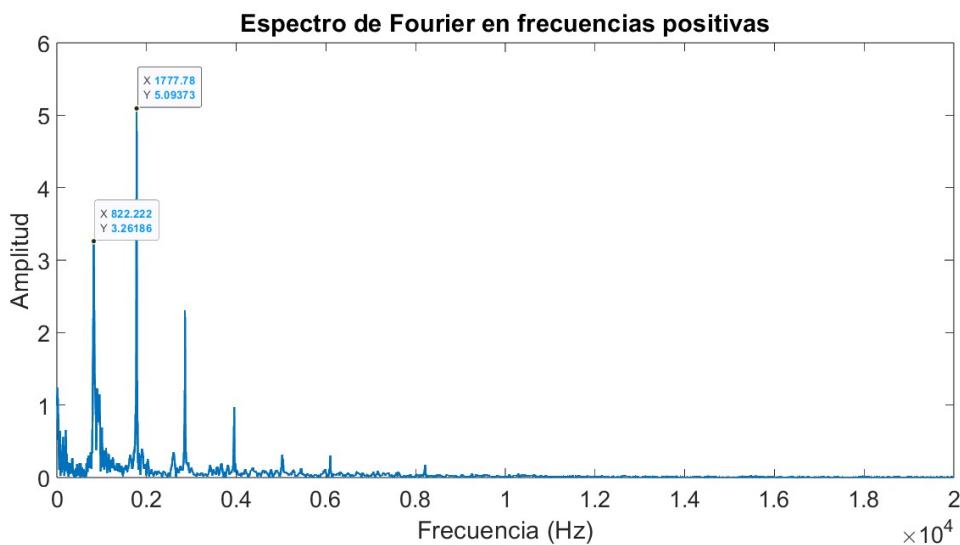


Figura 3.6: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al disco sin perforaciones

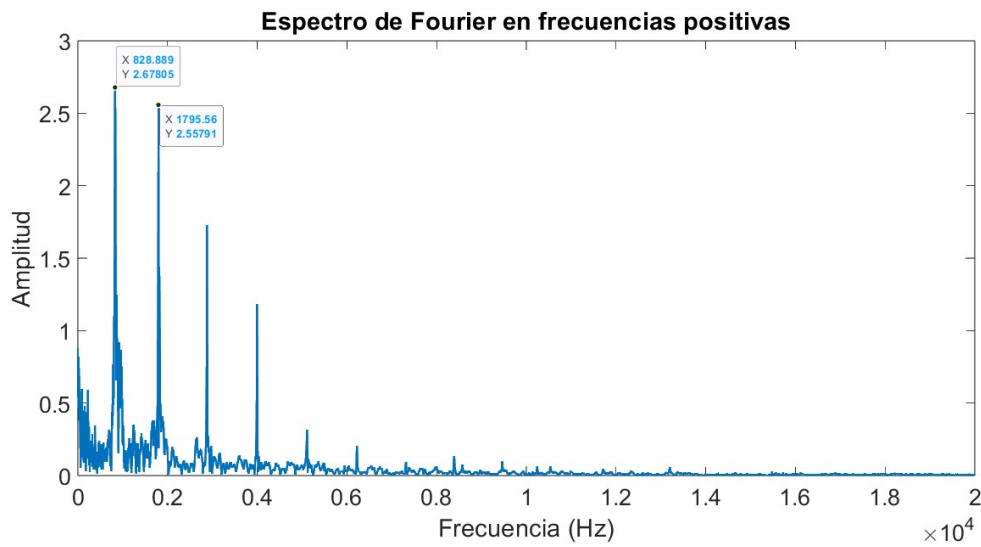


Figura 3.7: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al disco con perforaciones

De estos 2 análisis es evidente que el disco con perforaciones sufre de un cambio en sus 2 frecuencias de vibración principales, como se muestra en la Tabla. 3.1

Frecuencia del disco sin perforaciones	Frecuencia del disco con perforaciones	Diferencia
822 Hz	828 Hz	6Hz
1777 Hz	1795 Hz	18 Hz

Tabla 3.1: Tabla comparativa de los modos de vibración del disco de freno

Aquí se pueden observar las variaciones en los modos de vibración del disco, los cuales pueden ser después caracterizados para determinar si el disco de freno se encuentra en un buen estado, o por el contrario, si sufre de variaciones en su estructura que puedan comprometer su integridad.

### 3.4. Análisis de los patrones de moteado

En esta parte, se procedió a emular los patrones de moteado consistentes a las frecuencias a las que tendría que vibrar el disco en buen estado y el disco con perforaciones. Estos resultados fueron obtenidos utilizando un interferómetro Mach-Zehnder, y su configuración puede ser vista en la Fig. 3.8.

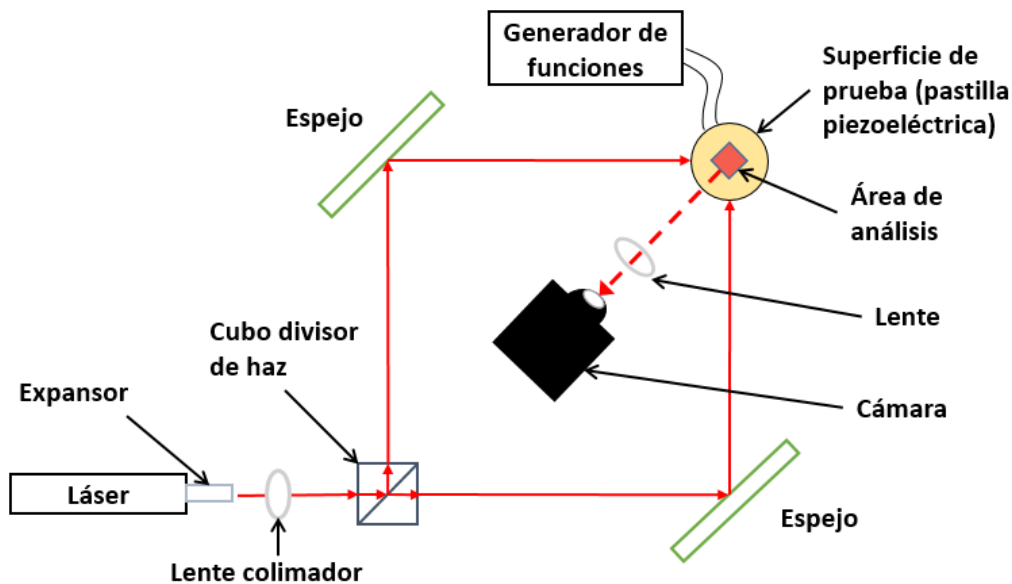
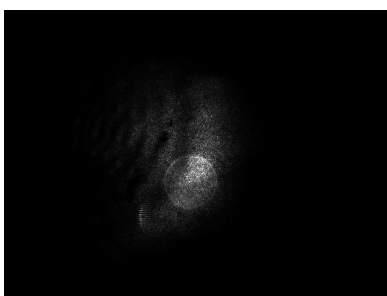
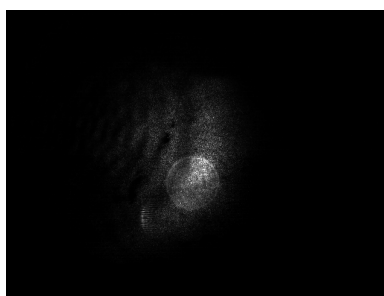


Figura 3.8: Arreglo interferométrico Mach-Zehnder aplicado a la pastilla piezo-eléctrica

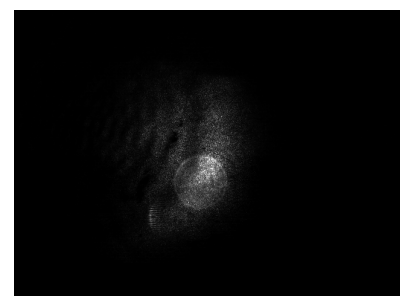
Se obtuvieron 3 conjuntos de fotos, correspondientes a las frecuencias de 1715 Hz, 1735 Hz, y 1755 Hz, de los cuales se pueden ver ejemplos de la Fig. 3.9a a la 3.9c.



(a) Patrón de moteado de un piezoeléctrico vibrando a 1715 Hz



(b) Patrón de moteado de un piezoeléctrico vibrando a 1735 Hz



(c) Patrón de moteado de un piezoeléctrico vibrando a 1755 Hz

Figura 3.9: Ejemplos de patrones de moteado obtenidos de los piezoeléctricos

A estas fotos se les realizó el análisis de Fourier, utilizando los FPS y el número de fotos establecidos en el capítulo 3.3 de este trabajo, 8000 FPS y 186 Fotos. Algunos patrones de moteado pueden ser vistos en la Fig. 3.9, y sus análisis pueden ser vistos en las Fig. 3.10 a la 3.12. En la Tabla 3.2 se pueden ver las diferencias entre las frecuencias obtenidas y las frecuencias esperadas.

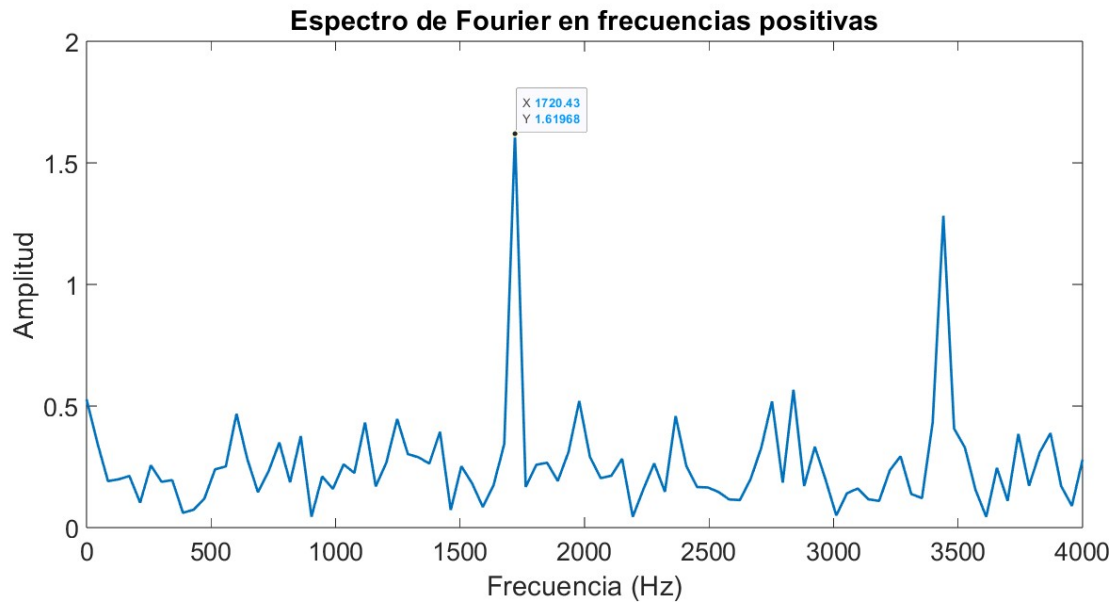


Figura 3.10: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada e Fourier al piezoeléctrico vibrando a 1715 Hz.

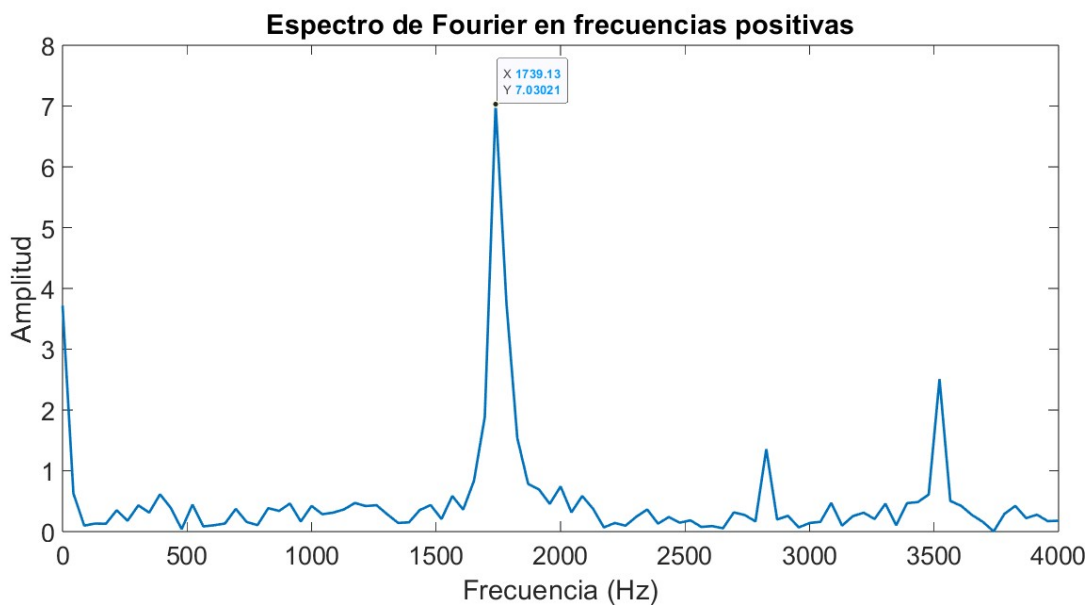


Figura 3.11: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al piezoeléctrico vibrando a 1735 Hz.

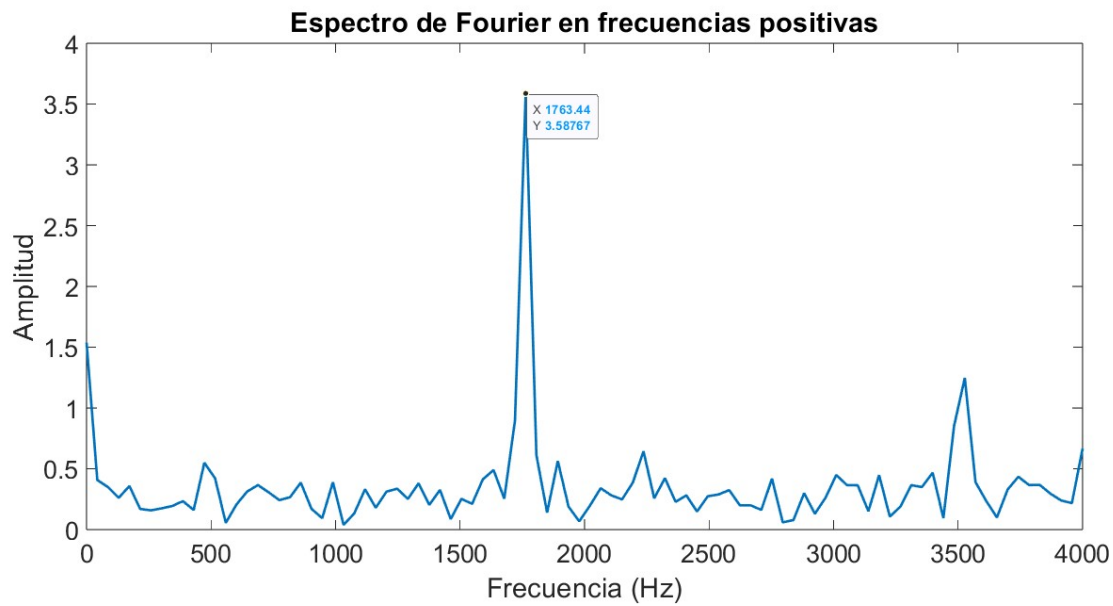


Figura 3.12: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al piezoeléctrico vibrando a 1755 Hz.

Tabla 3.2: Tabla comparativa de los modos de vibración de los materiales piezoeléctricos

Frecuencia obtenida numericamente	Frecuencia esperada	Diferencia
1720 Hz	1715 Hz	5 Hz
1739 Hz	1735 Hz	4 Hz
1763 Hz	1755 Hz	8 Hz

Lo que se puede concluir de estos análisis es lo siguiente:

Hay un error de entre 4Hz y 8Hz entre las frecuencias obtenidas y las esperadas. Esto puede ser debido al número de fotos analizadas. Para determinar si más fotos mejorarían la precisión de estos resultados, se realizó el mismo análisis con las mismas frecuencias con 1000 fotos (en lugar de las 186 utilizadas previamente), y se logró reducir la diferencia, como se ve en las Fig. 3.13 a la 3.15). En la Tabla 3.3 se puede observar como la diferencia entre las frecuencias esperadas y las obtenidas disminuye a comparación de los datos de la Tabla 3.2.

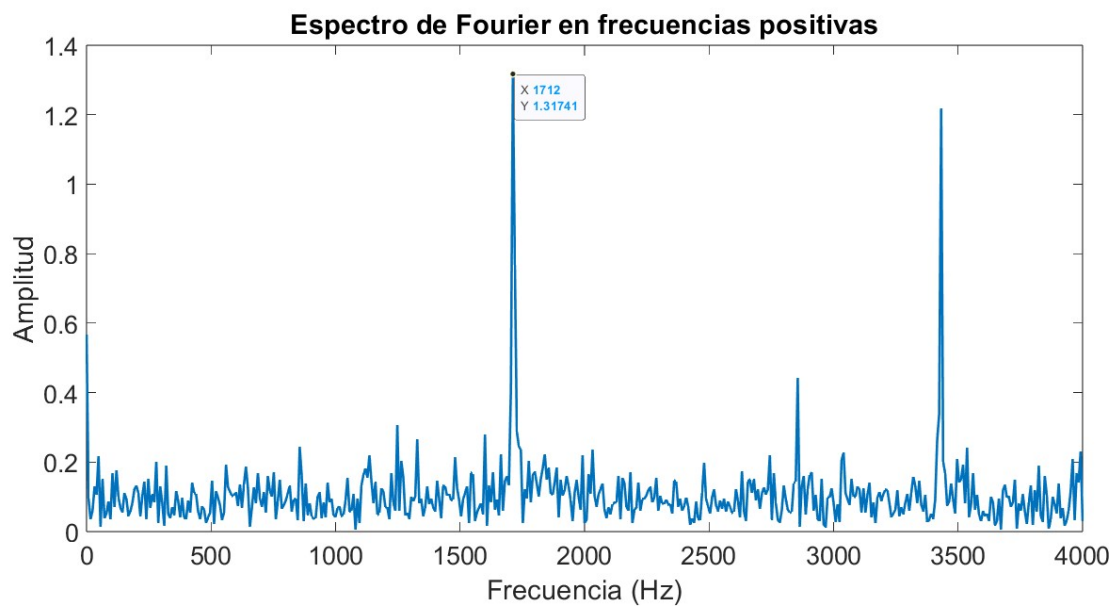


Figura 3.13: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al piezoelectrico vibrando a 1715 Hz utilizando 1000 fotos.

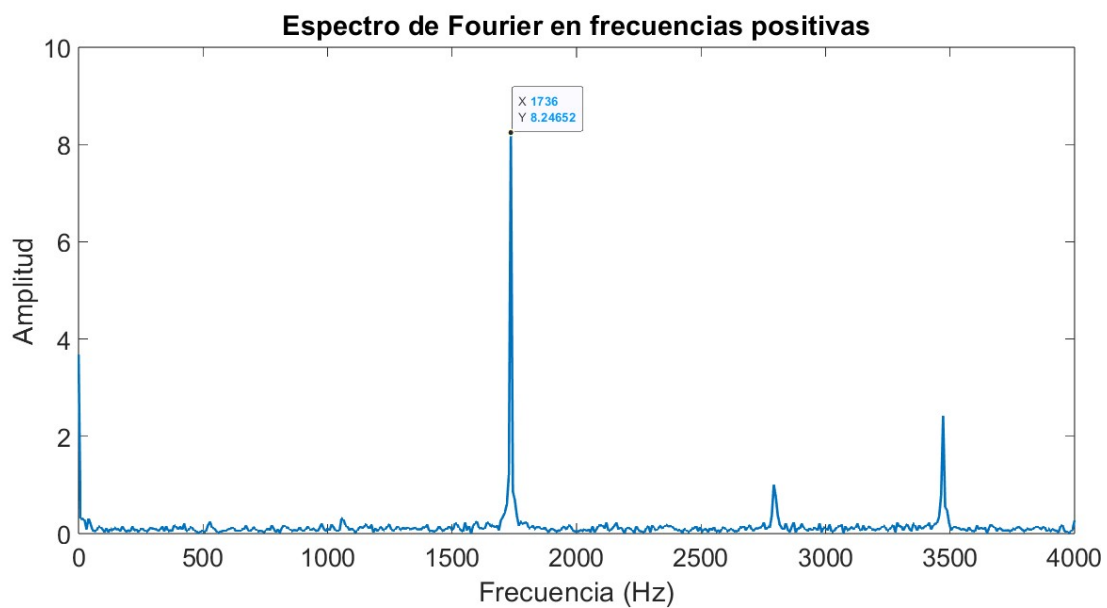


Figura 3.14: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al piezoelectrico vibrando a 1735 Hz utilizando 1000 fotos.

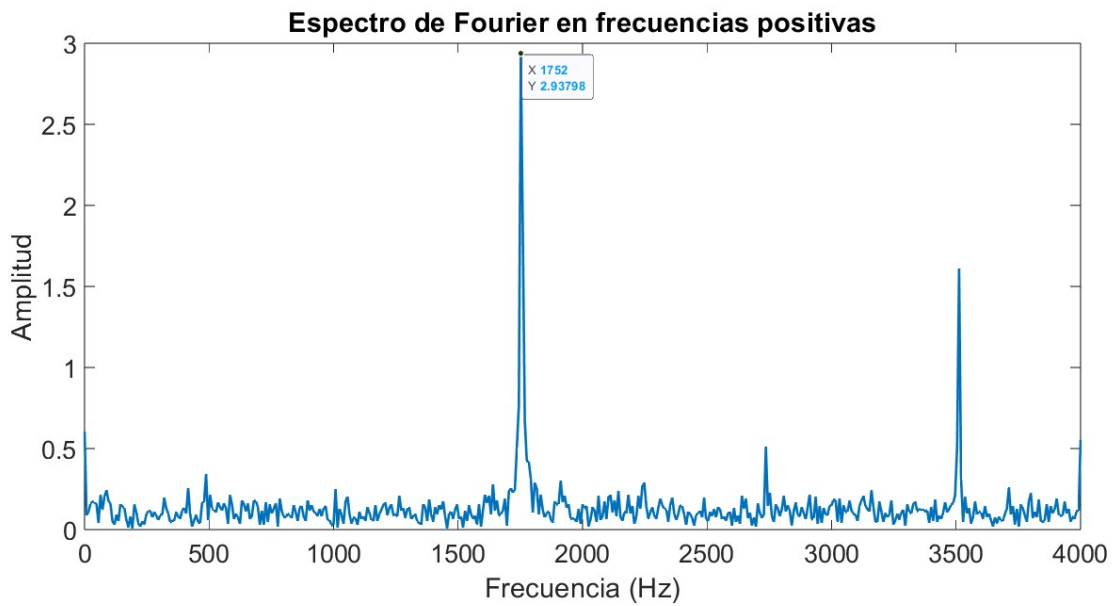


Figura 3.15: Frecuencias obtenidas al aplicar la transformada de Fourier al piezoeléctrico vibrando a 1755 Hz utilizando 1000 fotos.

Tabla 3.3: Tabla comparativa de los modos de vibración de los materiales piezoeléctricos utilizando 1000 fotos

Frecuencia obtenida numericamente	Frecuencia esperada	Diferencia
1712 Hz	1715 Hz	3 Hz
1736 Hz	1735 Hz	1 Hz
1752 Hz	1755 Hz	3 Hz

Si bien se encontraron bastantes limitantes al momento de realizar las pruebas, éstas pueden ser superadas utilizando equipo más potente. Igualmente, como un trabajo a futuro, se puede encontrar un arreglo óptico que pueda analizar mayor parte de la superficie del disco. Por parte del control de la velocidad, se llegó al resultado deseado, y si bien el motor se modeló como un sistema de primer orden, este puede también modelarse como un sistema de orden superior a futuro. Dicho modelo puede entonces ser utilizado para el diseño de un controlador más especializado, con el fin de mejorar el rendimiento del controlador.

# Conclusión

A lo largo de esta investigación se han obtenido resultados valiosos que, si bien han sido satisfactorios, también se han encontrado limitaciones significativas en otros aspectos.

Los alcances más relevantes de este trabajo han sido:

- El desarrollo de dispositivos electrónicos especializados en la adquisición y transmisión de la información obtenida de los discos.
- La implementación y puesta a punto de controladores para garantizar que la información es obtenida de manera precisa.
- La elaboración de software capaz de analizar la información de los discos de freno para la determinación de su estado.

Sin embargo, a pesar de estos avances, también se identificaron áreas donde la investigación no alcanzó los resultados esperados. En particular, las limitaciones del método elegido para el análisis de los discos, lo que nos lleva a no poder realizar el análisis completo de los discos de freno.

A pesar de esto, se han sentado las bases para una futura investigación, donde el objetivo principal sea el desarrollar un equipo interferométrico capaz de analizar de manera efectiva el estado de los discos.

En resumen, la aportación a la técnica es significativa. Se espera que esta investigación sea un punto de partida para seguir con una investigación que dé como resultado final un dispositivo que pueda determinar el estado de los discos de freno de una manera mucho más efectiva que los métodos actuales.


# Anexos

## Constancia de primera publicación.




Figura 3.16: Reconocimiento de participación en el XXX Congreso Internacional Anual de la SOMIM 2024.

# Constancia de acreditación del idioma inglés.



**BRITISH COUNCIL**



**Aptis**

---

## Candidate report

**FERNANDO DANIEL AGUIRRE SAGAON**  
Candidate name

**31.08.2024**  
Test date

**Aptis~0261487**  
Enrolment ID

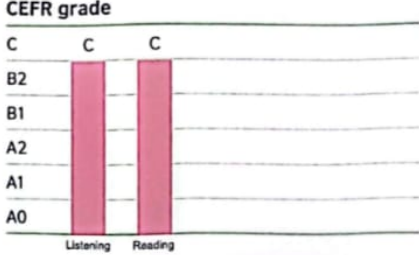
**Distribuidora Angelopolis**  
Organisation

**Aptis General**  
Test package

**Scale score**


Skill name	Skill score
Listening	48/50
Reading	48/50
Final Scale Score	96/100
Grammar and Vocabulary	48/50

**CEFR skill profile**



CEFR grade	Listening	Reading
C	C	C
B2		
B1		
A2		
A1		
A0		

Please turn over for CEFR skill descriptors.



[www.britishcouncil.org/aptis](https://www.britishcouncil.org/aptis)  
<https://credentials.britishcouncil.org/5a754de0-8c57-427f-962a-580c93186037?key=17Ea4e6a3c73a9091a8cc88a8e75cdd036795cd3028770e4e80550e128407eac>

Figura 3.17: Certificado de acreditación del idioma inglés.

# Bibliografía

- [1] INEGI (2021). *Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas*. URL: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/accidentes.asp>.
- [2] Diario Oficial de la Federación (2015) [Revisado Diciembre 2024], *Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana NMX-D-315-IMNC-2015*. URL: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5479230&fecha=10/04/2017gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5479230&fecha=10/04/2017gsc.tab=0)
- [3] World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (2012) [Revisado Diciembre 2024], *Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailers*. URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R090r3e\\_01.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R090r3e_01.pdf)
- [4] P. Dufrénoy & Dieter Weichert (2014). *Experimental Analysis of Hot Spotting in Sliding Systems*. Springer Netherlands, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7\\_150](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_150)
- [5] Abdelkrim Lamjahdy & Bernd Markert (2017). *Thermomechanical measurement of a brake disc*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/pamm.201710133>
- [6] Wojciech Sawczuk & Grzegorz M. Szymanski (2016). *Diagnostics of the railway friction disc brake based on the analysis of the vibration signals in terms of resonant frequency*. Arch Appl Mech. <https://doi.org/10.1007/s00419-016-1202-0>
- [7] Saood Ali, Rendi Kurniawan, & Tae Jo Ko (2021). *Development of 3D Resonant Elliptical Vibration Transducer for Dual-Frequency Micro-Dimple Surface Texturing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00551-9>
- [8] Ileana Bodini, Candida Petrogalli, Michela Faccoli, & Angelo Mazzù (2022). *Vision-based damage analysis in shoe-braking tests on railway wheel steels*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204514>.
- [9] Fuqiang Zhou, Ya Song, Liu Liu, / Dongtian Zheng (2018). *Automated visual inspection of target parts for train safety based on deep learning*. IET Intelligent Transport Systems. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2016.0338>
- [10] Dominik Schmid, Nils Gräbner, / Utz von Wagner (2017). *Experimental Investigations of Brake Pad Shim Properties*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/pamm.201710012>

- 
- [11] Vito Pagliarulo, Iaria Papa, Valentina Lopresto, Antonio Langella, & Pietro Ferraro (2019). *Impact Damage Investigation on Glass Fiber-Reinforced Plate Laminates at Room and Lower Temperatures through Ultrasound Testing and Electronic Speckle Pattern Interferometry*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04134-8>
- [12] Isaac Newton (1671). *A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; Containing his New Theory about Light and Colors: Sent by the Author to the Publisher from Cambridge*. Royal Society of London. <https://doi.org/10.1098/rstl.1671.0072>.
- [13] Frank L. Pedrotti (1993). *Introduction to Optics*. Prentice-Hall. ISBN 0-13-016973-0.
- [14] Emmanuel E. Gdoutos (2022). *Experimental Mechanics An Introduction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5>
- [15] Katsuhiko Ogata (1998). *Modern Control Engineering* Pearson. ISBN 970-17-0048-1.
- [16] Richard M., Murray Karl, / Johan Astrom (2008). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. PRINCETON UNIVERSITY PRESS. ISBN 978-0-691-13576-2
- [17] Robin Ping Guan, Robert E. Simpson, & Liuping Wang (2023). *State Feedback Control and Kalman Filtering with MATLAB/Simulink Tutorials*. Wiley. ISBN 978-1-119-69463-2.
- [18] Raybestos (2024) [Revisado Diciembre 2024], *Part 96806r*. URL: <https://www.raybestos.com/disc-brake-rotor-96806r.html>
- [19] Photron (2023) [Revisado Septiembre 2023]. *Fastcam mini ux50/ux100 datasheet*. URL [https://photron.com/wp-content/uploads/2023/02/Mini-UX\\_02.17.2023.pdf](https://photron.com/wp-content/uploads/2023/02/Mini-UX_02.17.2023.pdf).
- [20] Coherent. *Obis lx/lx datasheet*. OBIS 633LX datasheet, 2023 [Revisado Septiembre 2024] URL: <https://www.coherent.com/resources/datasheet/lasers/obis-family-ds.pdf>
- [21] Microchip (2009). *Pic18f2455/2550/4455/4550 data sheet*, 2009. URL <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/39632e.pdf>.
- [22] STMicroelectronics (2023) [Revisado Septiembre 2023]. *Stm32f103x8 datasheet*. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- [23] Cheruby Technology [Revisado Diciembre 2024]. URL: <https://www.cherubtechnology.com/filedownload>
- [24] Prolific (2013) [Revisado Septiembre 2023]. *PL-2303HX Edition (Chip Rev D) USB to Serial Bridge Controller Product Datasheet* URL: [https://www.prolific.com.tw/UserFiles/files/ds\\_pl2303HXD\\_v1\\_4\\_4.pdf](https://www.prolific.com.tw/UserFiles/files/ds_pl2303HXD_v1_4_4.pdf)
- [25] Pololu (2020)[Revisado Septiembre 2023]. *37d metal gearmotor datasheet*. URL <https://www.pololu.com/file/0J1736/pololu-37d-metal-gearmotors-rev-1-2.pdf>.
- [26] DSpace. *DS1103 PPC Controller Board*, Noviembre 2014 [Revisado Septiembre 2024]. URL: [https://www.artisanng.com/info/dSPACE\\_CP1103\\_Manual\\_202111510336.pdf#topic\\_b6afb0e2-dd3a-4497-9dd2-0514f7044365](https://www.artisanng.com/info/dSPACE_CP1103_Manual_202111510336.pdf#topic_b6afb0e2-dd3a-4497-9dd2-0514f7044365).

- [27] Robert E. Simpson (1987). *Introductory Electronics for Scientist and Engineers*. Allyn and Bacon. ISBN: 0-205-08377-3
- [28] Texas Instruments (1998). *Lm741 operational amplifier datasheet*.  
URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>
- [29] Texas Instruments (2006). *Tip41c datasheet*.  
URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tip41c.pdf>.
- [30] R. N. Clark (1961). *Integral of the error squared as a performance index for automatic control systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/TAI.1961.6371690>.
- [31] Allegro MicroSystems (1993). *3144 Sensitive Hall-Effect Switches For High-Temperature Operation*.  
URL: <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/55092/ALLEGRO/A3144.html>.