



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica



Medición de vibraciones a partir del registro de video realizado con un smartphone

Juan Pablo Hernández Fuentes

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:

Dr.-Ing. Cristián Javier Vicuña Molina.

Enero 2025

Concepción, Chile

©2025 Juan Pablo Hernández Fuentes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Agradezco a toda mi familia y amigos por siempre apoyarme y permitirme estudiar esta carrera que tanto me gusta. A mi amor Araceli por siempre estar junto a mí todos estos años, entregándome su apoyo, amor y cariño cada día, motivándome a superarme a mí mismo y a cada obstáculo. A su familia por siempre pensar en mí y tratarme como un hijo, apoyándome en este camino.

Agradezco a los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad, por todos los conocimientos y herramientas que me brindaron a lo largo de toda la carrera, especialmente al profesor Cristián Vicuña, por su orientación, ayuda y paciencia durante la realización de este trabajo.

Resumen

En esta investigación se evaluó el uso de la cámara de un teléfono inteligente como herramienta para la medición de vibraciones, analizando sus limitaciones relacionadas con la frecuencia de muestreo, la distorsión óptica producida por el lente y la sensibilidad en amplitud.

Se presentó teóricamente el método de medición utilizado, basado en la identificación de bordes, la detección y el seguimiento de círculos en imágenes. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo utilizando un shaker electrodinámico y un harnero vibratorio como bancos de ensayo, realizando mediciones con diferentes frecuencias de captura de fotogramas. En el caso del shaker, se logró identificar correctamente la frecuencia del movimiento bajo dos configuraciones diferentes, incluso en presencia de aliasing, mediante el uso de múltiples mediciones, alcanzando un error menor al 1 %.

Las mediciones realizadas sobre el harnero vibratorio en operación fueron comparadas con las de un acelerómetro, obteniéndose un error promedio máximo en amplitud del 4.14 % y del 0.162 % en frecuencia. Además, se analizó cómo la frecuencia de muestreo y la resolución del video afectan la precisión de los resultados en amplitud y frecuencia. También se determinaron las tres primeras frecuencias naturales del sistema mediante ensayos de partida y golpe, con un error de frecuencia máximo del 2.8 %, y se obtuvieron las órbitas del harnero en distintos puntos con diferentes configuraciones de FPS.

Por último, se evaluó la implementación de la corrección de la distorsión óptica y la amplificación de movimiento como parte del procesamiento del video en la medición de vibraciones. Los resultados mostraron que la corrección de la distorsión óptica es efectiva para disminuir el nivel de ruido en los puntos de medición más afectados por la distorsión, mientras que la amplificación de movimiento, debido al incremento del nivel de ruido asociado a su implementación, se presenta como una herramienta útil dependiendo de la aplicación específica y las condiciones de medición.

Índice

Índice de figuras	v
Índice de cuadros	vii
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Estado del arte	3
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Metodología	5
1.6. Plan de trabajo	6
2. Metodología	8
2.1. Marco teórico	8
2.1.1. Análisis de vibraciones	8
2.1.2. Visión artificial	9
2.2. Procesamiento de imágenes	10
2.2.1. Plataforma MATLAB-MathWorks	10
2.2.2. Detección de bordes en imágenes digitales	10
2.2.3. Detección de figuras geométricas en imágenes digitales	11
2.2.4. Amplificación de movimiento	12
2.2.5. Aliasing en registros vibratorios obtenidos con un smartphone	14
2.2.6. Distorsión en imágenes digitales	16
2.3. Medición de vibraciones	18
2.3.1. Construcción código de medición	18
2.3.2. Diseño marcadores circulares	20
2.3.3. Software y hardware	21
2.3.4. Iluminación	21
2.3.5. Estabilidad	22
3. Ensayos experimentales	23
3.1. Descripción de los ensayos a realizar	23
3.1.1. Comprobación del correcto funcionamiento del código	23
3.1.2. Pruebas con shaker electrodinámico	26
3.1.3. Pruebas en harnero vibratorio	30
3.1.4. Corrección de la distorsión óptica y amplificación de movimiento	39
4. Conclusiones y perspectivas	42
4.1. Conclusiones	42
4.2. Perspectivas	42

Índice de figuras

1.1.	Carta Gantt planificación proyecto	7
2.1.	Esquema forma de onda senoidal simple.	8
2.2.	Esquema transformada circular de Hough	12
2.3.	Representación de una señal con aliasing.	15
2.4.	Representación del aliasing papel plegado [31].	16
2.5.	Esquema funcionamiento del método propuesto.	16
2.6.	Tipos de distorsión óptica.	17
2.7.	Esquema corrección de distorsión óptica.	18
2.8.	Esquema algoritmo de medición.	19
2.9.	Diseño objetivos circulares.	20
2.10.	Segundo diseño objetivos circulares.	21
3.1.	Comprobación identificación de objetivos.	24
3.2.	Formas de onda (izquierda) y espectros en frecuencia (derecha) ((a): Señal con desplazamiento nulo, (b): Señal movimiento compuesto por tres seno- dales, (c): Señal movimiento senoidal perturbada por un pulso, (d): Señal movimiento senoidal con ruido aleatorio).	25
3.3.	Montaje shaker electrodinámico: (a) Computador, (b) Amplificador, (c) Bloque conector BNC 2120, (d) Shaker, (e) Acelerómetro IMI 603C01, (f) Objeto circular, (g) Módulo de entrada NI 9234, (h) Laptop.	26
3.4.	Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 1 ((a): Medición 48 FPS, (b): Medición 60 FPS, (c): Medición referencia acelerómetro 2048 FPS, (d) Componentes espectrales identificados).	27
3.5.	Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 ((a): Medición a 60 FPS, (b) Medición 48 FPS, (c): Medición 55 FPS).	29
3.6.	Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 ((a): Medición de referencia acelerómetro 2048 FPS, (b) Componente espectral identificado).	29
3.7.	Montaje ensayos harnero vibratorio: (a) Excitador, (b) Harnero vibratorio, (c) Variador de frecuencia, (d) Módulo de entrada NI 9234, (e) Laptop, (f) Acelerómetros, (1-4) Marcadores artificiales.	30
3.8.	Espectros ensayo de partida harnero, grabación a 60 FPS apoyos ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 3, (b): Movimiento dirección vertical círculo 3, (c): Acelerómetro horizontal S3-H, (d): Acelerómetro vertical S3-V).	31
3.9.	Espectros ensayo de golpe vertical harnero, grabación a 60 FPS apoyo A (a): acelerómetro vertical S3-V, (b): movimiento dirección vertical círculo 3).	32

3.10.	Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo A ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 3, (b): Movimiento dirección vertical círculo 3, (c): Acelerómetro horizontal S3-H, (d): Acelerómetro vertical S3-V).	32
3.11.	Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo B ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 4, (b): Movimiento dirección vertical círculo 4, (c): Acelerómetro horizontal S4-H, (d): Acelerómetro vertical S4-V).	33
3.12.	Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo A ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 3, (b): Movimiento dirección vertical círculo 3, (c): Acelerómetro horizontal S3-H, (d): Acelerómetro vertical S3-V).	33
3.13.	Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo B ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 4, (b): Movimiento dirección vertical círculo 4, (c): Acelerómetro horizontal S4-H, (d): Acelerómetro vertical S4-V).	34
3.14.	Órbita harnero, grabación 120 FPS, apoyo A ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 20 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).	34
3.15.	Órbita harnero, grabación 120 FPS, apoyo B ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 20 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).	35
3.16.	Órbita harnero, grabación 60 FPS, apoyo A ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 100 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).	35
3.17.	Órbita harnero, grabación 60 FPS, apoyo B ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 100 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).	35
3.18.	Órbita obtenida utilizando: (a) gráfico de líneas, (b): nube de puntos.	37
3.19.	Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS círculo 1 ((a): movimiento horizontal sin trípode, (b): movimiento vertical sin trípode, (c): movimiento horizontal filtro pasa banda, (d): movimiento vertical filtro pasa banda, (e): movimiento horizontal con trípode, (f) movimiento vertical con trípode).	38
3.20.	Espectros del harnero vibratorio para grabación a 120 FPS, círculo 1: (a) movimiento horizontal con distorsión corregida, (b) movimiento horizontal sin corrección, (c) movimiento vertical con distorsión corregida, (d) movimiento vertical sin corrección.	39
3.21.	Desplazamiento shaker electrodinámico, grabación 48 FPS ((a): forma de onda video original, (b) espectro en frecuencia video original, (c): forma de onda video con movimiento amplificado, (d): espectro en frecuencia video con movimiento amplificado).	40
3.22.	Fotograma medición shaker, 48 FPS ((a) video original, (b) video con el movimiento amplificado).	41

Índice de cuadros

2.1.	Coefficientes de calibración para la corrección de la distorsión óptica iPhone 14.	20
3.1.	Ensayos experimentales	23
3.2.	Comparación de resultados obtenidos mediante video y señal generada	26
3.3.	Comparación de resultados obtenidos mediante video y acelerómetros	31

1. Introducción

1.1. Contexto

En el ámbito industrial, el mantenimiento es esencial para mantener el rendimiento de una máquina, para que pueda operar de forma efectiva y segura. A lo largo de los años, profesionales de la gestión de instalaciones han implementado diversos tipos de estrategias de mantenimiento con el objetivo de hacer sus programas de operación y mantenimiento tan eficientes y efectivos como sea posible. Entre estas estrategias se encuentra el mantenimiento predictivo, en el cual se evalúa la condición mecánica de la máquina y la evolución de su condición a lo largo del tiempo, a través del análisis de diversos síntomas que la máquina emite a su entorno durante su operación, lo cual es crucial para prever y prevenir posibles fallas en maquinaria y equipos [1].

El mantenimiento predictivo busca detener la máquina solo cuando es estrictamente necesario, justo antes de que una falla en el equipo o en uno de sus componentes pueda ser considerada peligrosa [1]. Esto se hace para preservar la operatividad del equipo y la seguridad de los usuarios, reduciendo así el tiempo de inactividad y mantenimiento. Esta práctica es especialmente relevante en los equipos críticos, ya que resulta en una menor pérdida de producción.

El mantenimiento predictivo se basa principalmente en el análisis y monitoreo de vibraciones, así como en el análisis de otras magnitudes complementarias como el análisis de aceite usado, temperatura, corriente eléctrica, ondas de alta frecuencia, y otros indicadores de salud estadísticos. El análisis de vibraciones permite identificar la falla específica que afecta al equipo y evaluar la severidad de las vibraciones. Aproximadamente el 90 % de las fallas en maquinaria están precedidas por un cambio en las vibraciones [2], lo que hace necesario invertir significativamente en tecnología de monitoreo, como acelerómetros, instrumentos y software para medir vibraciones en los equipos.

Una alternativa a la medición de vibraciones con sensores tradicionales (como lo son los acelerómetros piezoeléctricos) es la implementación de la visión artificial. La visión artificial abarca todas las aplicaciones que combinan hardware y software para realizar diversas funciones mediante la captura y procesamiento de imágenes [3]. Utilizando técnicas de procesamiento de imágenes, como el seguimiento de figuras geométricas en distintos fotogramas [4], es posible emplear una cámara de video como instrumento de medición de vibraciones.

El uso de la visión artificial permite obtener registros vibratorios en áreas consideradas de difícil acceso para un sensor de vibraciones tradicional (ya sea debido al diseño de la estructura en la que se quieren realizar las mediciones, o por sus condiciones de operación), sin necesidad de entrar en contacto con el objeto analizado, y sin la necesidad de montar una estructura externa adicional. Además, la visión artificial presenta la ventaja de poder medir en múltiples puntos del equipo en diferentes direcciones al mismo tiempo con un solo video, a diferencia de un acelerómetro convencional, el cual está limitado a una posición y dirección específica.

En los últimos años, la tecnología de medición en base a teléfonos inteligentes (smartphones) se ha convertido en un sector emergente, asequible y efectivo en sistemas de monitoreo y otros campos de la ingeniería. Esto debido a que los teléfonos inteligentes modernos están equipados con varios tipos de sensores y tecnologías, como lo pueden ser acelerómetros, giroscopios, sistemas de posicionamiento global, cámaras de video de alta resolución y comunicaciones de datos

inalámbricas [5]. Este tipo de tecnología convierte a los teléfonos en dispositivos adecuados para ser utilizados para la medición de vibraciones, haciendo uso de la visión artificial.

Si bien el uso de smartphones como una alternativa asequible a los sensores de vibraciones tradicionales es prometedor, todavía presenta limitaciones. En primer lugar, la cantidad máxima de fotogramas por segundo (FPS) que un smartphone puede capturar es relativamente baja, usualmente en el rango de 60, 120 o 240 FPS reales dependiendo de la gama del dispositivo. Esto se debe a una combinación de factores, como la limitación en el volumen de datos que el sensor y el procesador pueden manejar, el tamaño reducido del sensor que restringe la cantidad de luz capturada por fotograma, y el calor generado durante el procesamiento de video a altas velocidades, lo cual afecta el rendimiento del dispositivo. Aunque algunos smartphones de gama alta permiten grabar a FPS más altos, como 480 o incluso 960 FPS, estos valores suelen alcanzarse mediante interpolación de imágenes, por lo que no representan valores reales en términos de medición. En comparación, las cámaras industriales utilizadas en la medición de movimiento a través de visión artificial pueden alcanzar velocidades de captura de hasta miles de FPS [6], gracias a sensores de mayor tamaño, sistemas de enfriamiento activos y hardware especializado.

La frecuencia máxima de medición de los movimientos está limitada por el teorema de Nyquist-Shannon a la mitad de los FPS del video a procesar [7], lo que hace que los teléfonos de bajo costo sean menos efectivos [8]. Por ejemplo, un teléfono Samsung S9+, con una capacidad de grabar a 60 FPS, está limitado a medir vibraciones de hasta 30 Hz [9]. Este límite en la frecuencia de muestreo hace que las mediciones tomadas sean propensas al fenómeno de aliasing [10], produciendo que el movimiento de la estructura analizada no sea representado correctamente, y, en consecuencia, que los componentes vibratorios de alta frecuencia se muestren a frecuencias menores que las reales, lo que puede llevar a errores en la interpretación y a un diagnóstico erróneo.

Diversos autores han intentado solucionar el problema del aliasing en mediciones realizadas con cámaras industriales de baja velocidad de captura de imágenes, proponiendo métodos basados en principios de procesamiento de señales, aplicables bajo distintas circunstancias [11–13], sin embargo, no se han realizado estudios utilizando la cámara de un smartphone para la adquisición de imágenes.

Adicionalmente, la visión artificial ofrece la ventaja de medir vibraciones en múltiples puntos del mismo equipo con un solo video. Sin embargo, esta capacidad introduce la posibilidad de que las imágenes capturadas se vean afectadas por un fenómeno conocido como distorsión de perspectiva. Este fenómeno altera la forma y las proporciones de los objetos en la imagen, haciendo que las líneas paralelas aparezcan convergentes y que las dimensiones del objeto no se representen con precisión [14]. En el contexto de la medición de vibraciones, esta distorsión puede llevar a errores en la estimación de amplitudes, especialmente en puntos alejados del centro óptico de la imagen.

Además de la distorsión de perspectiva, otro tipo de distorsión que afecta la precisión de una cámara para representar correctamente una escena es la distorsión óptica, la cual es producida por la forma del lente y el sensor de cada cámara. Esta distorsión es más significativa en las imágenes captadas por un smartphone, debido a que el sensor y los lentes que utilizan son más pequeños [15]. La distorsión óptica puede ser medida utilizando la norma ISO 17850, la cual es aplicable a combinaciones específicas de cámara y lente [16].

Si bien existen trabajos científicos que han corregido la distorsión producida por el lente [17], no se ha realizado ningún estudio que corrija simultáneamente la distorsión de perspectiva y la distorsión óptica en un algoritmo para medir vibraciones a través de video. Tampoco se ha realizado ningún estudio que corrija la distorsión óptica del lente de una cámara de un smartphone.

Otra de las limitaciones de la cámara de un smartphone, especialmente si es de gama media o baja, es la menor resolución a la que es capaz de capturar video comparado con una cámara industrial, lo que se traduce en una menor precisión y capacidad para detectar pequeños desplazamientos [18].

En base a lo anterior, en este proyecto se propone, a partir del estado actual de la literatura, desarrollar e implementar un software que, mediante el uso de técnicas de procesamiento de imágenes, obtenga registros vibratorios con un error absoluto menor al 6 % en amplitud y 1 % en frecuencia a partir de videos capturados con la cámara de un smartphone.

Para lograr esto, el software se desarrollará en la plataforma MATLAB, seleccionada por su alta capacidad en el procesamiento de señales e imágenes, lo que facilita la implementación eficiente de algoritmos complejos. El programa deberá abordar de manera integral el problema del aliasing, corregir la distorsión en las imágenes captadas por el smartphone, tanto óptica como de perspectiva, y emplear técnicas de amplificación de movimiento para mejorar la precisión y sensibilidad de la cámara del dispositivo. El objetivo de este estudio es, por lo tanto, desarrollar un algoritmo capaz de implementar y adaptar diversas técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y señales, superando las limitaciones inherentes a los smartphones y permitiendo la medición precisa de registros vibratorios, independientemente de la frecuencia o amplitud del movimiento.

1.2. Estado del arte

A continuación se presentará el estado del arte relacionado con el uso de cámaras como herramienta para medir el movimiento de objetos mediante el uso de técnicas de procesamiento de imágenes.

- Uso de video y procesamiento de imagen como herramienta para el análisis de vibraciones [19].

En este trabajo, el autor desarrolló un programa en la plataforma MATLAB basado en la detección y seguimiento de objetivos circulares a través de la binarización de imágenes para calcular el desplazamiento de puntos específicos de una estructura. Se realizaron mediciones en distintos equipos industriales presentes en la Universidad de Concepción. Dentro de este estudio, se propuso un método para eliminar los componentes espectrales producidos por el aliasing al aumentar la distancia de medición, disminuyendo la amplitud de los componentes de alta frecuencia. Estos componentes, en el espectro de desplazamiento, generalmente tienen una menor amplitud, funcionando como un filtro paso bajo que también disminuye los componentes de baja frecuencia.

Adicionalmente, se analizó la influencia de tres distintos factores en el error relativo en amplitud en las mediciones realizadas con la cámara de un smartphone, combinados en un factor k llegando a la expresión:

$$\text{error} = 0,243 \cdot \ln(K) + 0,915 \quad (1.1)$$

Con k siendo una combinación de los factores distancia de medición en m , amplitud vibratoria medida en mm , y el diámetro del círculo en píxeles en el video analizado tal que:

$$k = \frac{\text{distancia de medición [m]}}{\text{amplitud vibratoria [mm]} \cdot \text{diámetro círculo [px]}} \quad (1.2)$$

Concluyendo que para obtener un error relativo menor al 20 % en condiciones ideales de contraste e iluminación, se necesita un valor del factor k menor a 0.05.

- *Rotating machinery speed extraction through smartphone video acquisition from a radial viewpoint*[20].

En este trabajo, los autores evaluaron el uso de la cámara de smartphones como herramienta para la medición de la velocidad de rotación en ejes. El método utilizado se basa en analizar las deformaciones geométricas en un patrón de líneas sobre la superficie del eje.

Debido a limitaciones en los sensores utilizados normalmente en cámaras de smartphones, las imágenes no son capturadas de forma instantánea simultáneamente para todos los píxeles. En su lugar, cada fila de píxeles es capturada secuencialmente según la velocidad de obturación del sensor, es decir, según la rapidez con la que se cierra el obturador, lo cual se le conoce como efecto cortina. Esta limitación es aprovechada por los autores, permitiendo, a través de un proceso de calibración con un patrón de líneas negras, medir la velocidad de rotación de un eje independientemente de los fotogramas por segundo del video capturado.

El modelo fue desarrollado matemáticamente y validado experimentalmente en un banco de pruebas constituido por un eje acoplado a un motor. Los resultados demostraron la efectividad del método, obteniendo un porcentaje de error relativo de alrededor del 10 %.

- *Experimental Study on Measuring and Tracking Structural Displacement Based on Surveillance Video Image Analysis* [21].

En este estudio, los autores evaluaron el uso de cámaras de vigilancia industriales como herramienta para medir el desplazamiento de estructuras a través de técnicas de procesamiento de imágenes.

El método seleccionado fue el seguimiento de marcadores circulares artificiales de papel adheridos sobre la estructura de interés. A través de técnicas de detección de bordes, el algoritmo determina la elipse que se ajusta de mejor forma a la forma del marcador, permitiendo determinar la ubicación del centro de cada círculo.

Los autores analizaron experimentalmente la influencia de la distancia de medición y del ángulo entre la cámara y la posición del marcador circular en el factor de conversión η de desplazamiento en píxeles a mm . A través de técnicas de regresión, se obtuvo la expresión para la cámara de vigilancia industrial estudiada:

$$\eta(d, \theta) = -0,06164 + 0,44360d - 0,00261\theta - 0,00309d^2 + 0,00092d\theta + 0,00008\theta^2 \quad (1.3)$$

De esta forma, los autores concluyeron que el valor de η varía linealmente con el incremento de la distancia de medición y que, además, se ve afectado por el cambio en el ángulo de disparo de la cámara. Adicionalmente, confirmaron la viabilidad de calcular el desplazamiento de objetos utilizando videos obtenidos con cámaras de vigilancia industriales.

1.3. Hipótesis

A través del uso de técnicas de procesamiento de imágenes y señales, es posible obtener mediciones vibratorias con la cámara de un smartphone con menos del 6 % de diferencia en amplitud comparada con un acelerómetro bajo condiciones controladas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar una herramienta que permita extraer información precisa sobre el comportamiento vibratorio de un objeto filmado con la cámara de un smartphone utilizando procesamiento de imagen y señales.

1.4.2. Objetivos específicos

- OE1: Desarrollar un algoritmo para el procesamiento de video que permita obtener información referente al movimiento de un objetivo.
- OE2: Implementar un algoritmo que permita eliminar el aliasing en señales vibratorias.
- OE3: Implementar un algoritmo que permita corregir el efecto que provoca la distorsión del lente en señales vibratorias.
- OE4: Implementar un algoritmo que permita amplificar pequeños desplazamientos en registros vibratorios.
- OE5: Con una sola herramienta, validar experimentalmente los algoritmos desarrollados.

1.5. Metodología

La metodología para desarrollar el proyecto se presenta a continuación, determinada para cada objetivo específico.

OE1: Desarrollar un algoritmo para el procesamiento de video que permita obtener información referente al movimiento de un objetivo.

Utilizando la plataforma de MATLAB, desarrollar un algoritmo que permita extraer registros vibratorios de distintos puntos de interés en un objeto a partir de videos capturados con la cámara de un smartphone. El algoritmo empleará técnicas de procesamiento de imágenes para realizar el preprocesamiento del video, identificar los puntos de medición definidos por objetivos circulares artificiales de alto contraste, y medir el desplazamiento de los puntos de interés a lo largo del tiempo a partir del cambio de posición de los centroides de los objetivos circulares. Posteriormente, se utilizarán estos desplazamientos para calcular la información deseada por el

usuario, como la forma de onda del desplazamiento, velocidad y aceleración, y sus respectivos espectros en frecuencia.

OE2: Implementar un algoritmo que permita eliminar el aliasing en señales vibratorias.

A través de MATLAB, implementar un código que permita, utilizando técnicas de procesamiento de señales, eliminar el aliasing de los registros vibratorios obtenidos con video. El algoritmo debe ser capaz, a partir de dos o más mediciones a diferente frecuencia de muestreo, de identificar a través de otro procesamiento, los componentes espectrales producidos por el aliasing y determinar su posición correcta en el espectro.

OE3: Implementar un algoritmo que permita corregir el efecto que provoca la distorsión del lente en señales vibratorias.

A través de MATLAB, implementar un código que permita, mediante técnicas de procesamiento de imágenes, corregir el efecto producido por la distorsión del lente en las imágenes captadas con la cámara de un smartphone. El algoritmo debe permitir la calibración de la cámara utilizada para la obtención de los videos a partir de una foto tomada con esta. Debe corregir tanto la distorsión de perspectiva como la óptica y utilizar las imágenes corregidas para obtener registros vibratorios precisos.

OE4: Implementar un algoritmo que permita amplificar pequeños desplazamientos en registros vibratorios.

A través de MATLAB, implementar un código que permita, a través de técnicas de procesamiento de imágenes, amplificar movimientos sutiles en video, facilitando la detección de movimiento para la obtención de registros vibratorios. El algoritmo debe, además, ser capaz de descomponer un video en bandas espaciales y amplificar el movimiento presente en él por un factor determinado, generando un nuevo video con movimiento amplificado.

OE5: Con una sola herramienta, validar experimentalmente los algoritmos desarrollados.

Para validar la herramienta desarrollada, se llevará a cabo una comparación entre los resultados obtenidos mediante el algoritmo implementado en MATLAB y aquellos obtenidos utilizando un acelerómetro como referencia. Inicialmente, se configurará un banco de ensayos que consistirá principalmente en un shaker, con el cual se generarán vibraciones controladas. Durante las pruebas, se capturarán simultáneamente los datos con un acelerómetro y la cámara de un smartphone. Posteriormente, se procederá al procesamiento de los datos y a la comparación de los resultados obtenidos en términos de amplitud y frecuencia de las vibraciones medidas. Se calcularán los errores relativos para evaluar la precisión y la efectividad del algoritmo desarrollado en la detección y medición de vibraciones.

1.6. Plan de trabajo

La planificación para el desarrollo de la investigación en un periodo de seis meses se presenta en la Figura 1.1 en forma de una Carta Gantt.

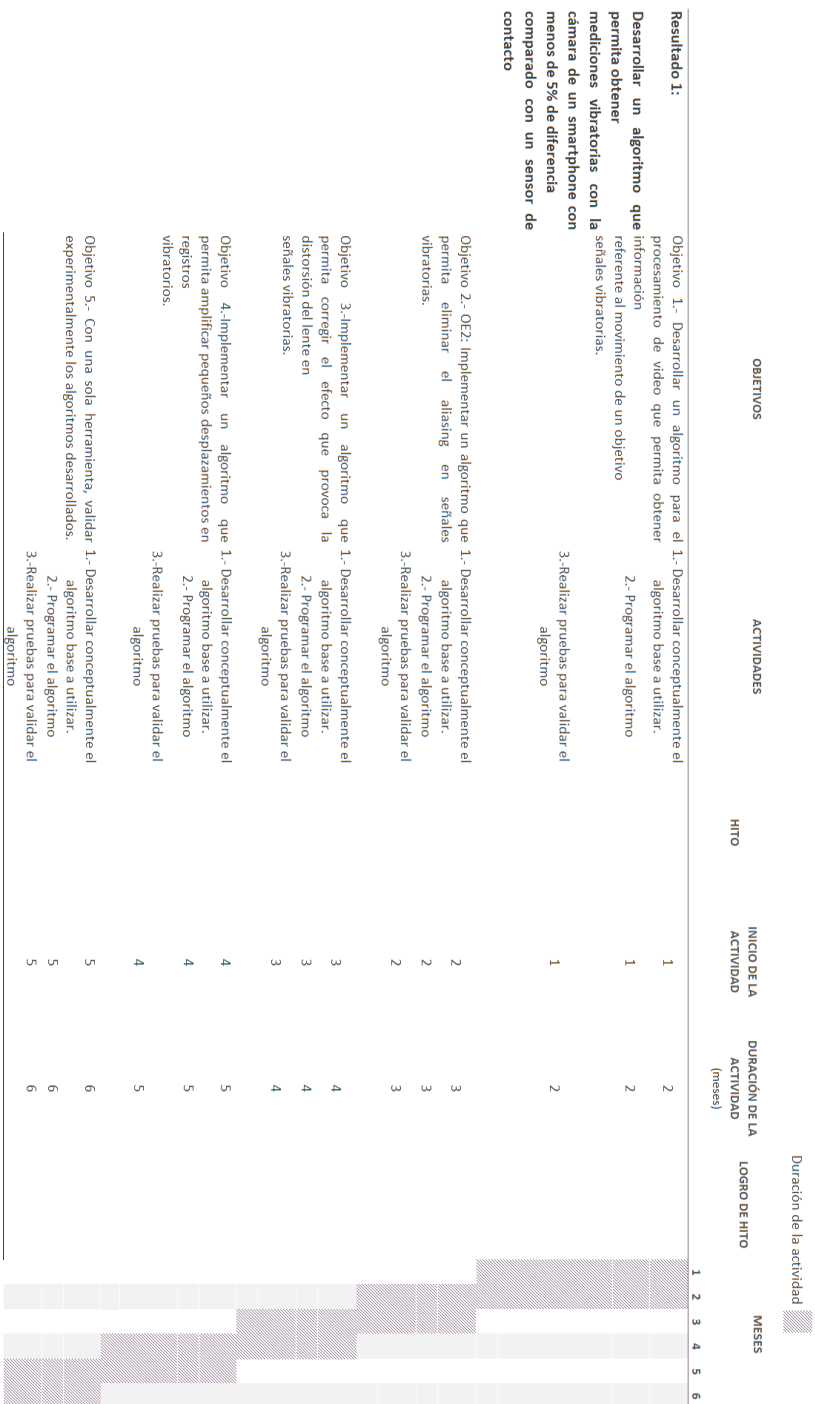


Figura 1.1 Carta Gantt planificación proyecto

2. Metodología

2.1. Marco teórico

2.1.1. Análisis de vibraciones

De forma simple, la vibración puede ser considerada como el movimiento de una máquina o estructura, o de una parte de ella, alrededor de su posición de reposo (o de equilibrio) [1]. La vibración puede ser expresada en términos de desplazamiento vibratorio, velocidad vibratoria y aceleración vibratoria.

La figura que se obtiene al graficar la vibración versus el tiempo se denomina forma de onda de la vibración. La forma de onda más simple es la de un armónico simple, la cual está definida por su amplitud pico o magnitud vibratoria A_0 , y su frecuencia f , es decir, el número de ciclos completos que efectúa en cada segundo [1]. Un esquema de una forma de onda de un movimiento armónico simple se muestra en la Figura 2.1.

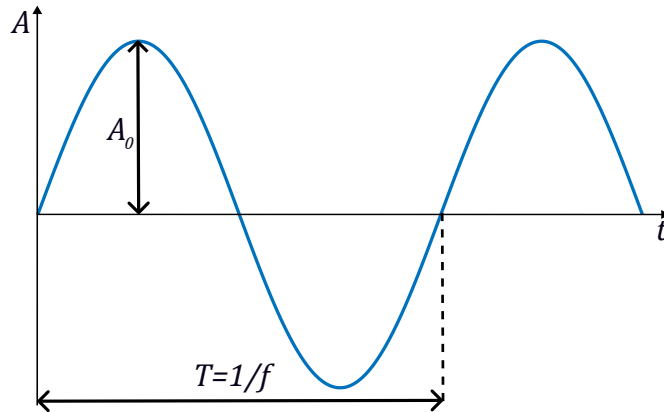


Figura 2.1 Esquema forma de onda senoidal simple.

El análisis de vibraciones es una herramienta ampliamente utilizada en la mayoría de las estrategias de mantenimiento predictivo. Esto se debe a que al medir los distintos movimientos que ocurren en una máquina, se puede obtener una idea de las diversas fuerzas que están actuando sobre ella.

En el análisis de vibraciones, el punto de partida para realizar un diagnóstico es el análisis frecuencial o espectral de las vibraciones medidas en los puntos seleccionados de la máquina a evaluar. Esta técnica consiste en descomponer la señal en el dominio del tiempo en sus componentes frecuenciales a través de la transformada de Fourier, y luego asociar dichos componentes con las fuerzas dinámicas que actúan sobre la máquina [1].

Otros factores que se toman en cuenta para determinar la condición de una máquina son la medición de la fase de la vibración y el análisis del comportamiento vibratorio de una máquina en el dominio del tiempo, en el cual se analizan distintos indicadores de salud como el valor RMS, el factor de cresta, el valor pico a pico y otros indicadores estadísticos. Este tipo de análisis funciona como un primer filtro, proporcionando una evaluación inicial de la condición de la máquina antes del análisis espectral.

Dependiendo del tipo de máquina o estructura analizada, es posible detectar fallas tales como:

- Desbalanceamiento de rotores.
- Desalineamiento.
- Distorsión o deformación de la carcasa.
- Solturas mecánicas.
- Resonancia.
- Excentricidad en correas.
- Problemas de desgaste.

Además de detectar problemas concretos en una máquina, las vibraciones se utilizan para determinar la severidad de las vibraciones en un equipo a través de las normas ISO 10816-3 e ISO 2372, dependiendo de las características del equipo analizado. Estas normas establecen criterios para determinar si los niveles vibratorios son perjudiciales para la máquina.

2.1.2. Visión artificial

La visión artificial o *computer vision* (CV) es un conjunto de técnicas que permiten extraer información de imágenes, videos o nubes de puntos, la cual puede ser utilizada posteriormente. La visión artificial incluye el reconocimiento de imágenes, la detección de objetos o figuras, el reconocimiento de actividades, la estimación de posiciones en 3D, el seguimiento de vídeo y la estimación de movimientos [22]. En otras palabras, la visión artificial es una disciplina que busca poder dotar a las máquinas con la capacidad de ver, equivalente al sentido de la vista del humano. Esto consiste en la capacidad de determinar características del mundo real de tres dimensiones, a través de una o más imágenes bidimensionales [23].

Una imagen digital puede ser definida como una función bidimensional $I(x, y)$, donde x e y son las coordenadas, y su amplitud I en cada par de coordenadas es denominada intensidad. Cada imagen está compuesta por un número finito de elementos, denominados píxeles, cada uno con una posición e intensidad particulares. La intensidad de un píxel indica su nivel de brillo. En visión artificial, las imágenes normalmente se trabajan en escala de grises debido a su simplicidad y eficiencia computacional, generalmente en una escala de 0 a 255, donde 0 corresponde al color negro y 255 al color blanco [24].

Todo en el campo de la visión artificial es realizado mediante conjuntos de operaciones matemáticas [24], por lo que para el desarrollo de técnicas de CV se utilizan herramientas de software tales como MATLAB, Simulink, Python, entre otras.

La visión artificial tiene una amplia gama de aplicaciones, que incluyen, entre otros:

- **Control de accesos de seguridad privada:** La visión virtual es ampliamente utilizada en el reconocimiento facial para iniciar sesión en smartphones y en la detección en tiempo real de hurtos.
- **Seguridad vial:** Al integrarse con inteligencia artificial, la visión virtual es usada en la detección y evasión de vehículos y peatones en vehículos autónomos [25]. Otro uso común

relacionado con la seguridad vial es la detección de conductores que no estén empleando las medidas de seguridad obligatorias, o se vean involucrados en accidentes [26].

- **Control de calidad:** La visión virtual puede aplicarse en procesos de control de calidad en líneas de producción, detectando piezas de menor calidad o con defectos [27, 28].
- **Medicina:** La visión artificial puede ser utilizada para la detección de anomalías dentro del cuerpo como tumores, a través del análisis de imágenes [29].

2.2. Procesamiento de imágenes

2.2.1. Plataforma MATLAB-MathWorks

La plataforma MATLAB ofrece herramientas para el procesamiento de imágenes, entre las que se encuentran *Computer Vision Toolbox* e *Image Processing Toolbox*, las cuales permiten la aplicación de diversas técnicas de procesamiento de imágenes y visión artificial en 2D y 3D, compatibles con una gran variedad de formatos y tamaños de imágenes digitales.

Entre las diversas técnicas de procesamiento de imágenes disponibles se encuentran la segmentación de imágenes, la reducción de ruido, las transformaciones geométricas, la visualización y exploración de imágenes, las operaciones morfológicas, el uso de redes neuronales (tanto en *Deep Learning* como en *Machine Learning*), los detectores de objetos, y la posibilidad de desarrollar algoritmos y aplicaciones para flujos de trabajo.

2.2.2. Detección de bordes en imágenes digitales

En el ámbito cotidiano, un borde se define como el límite o extremo donde comienza o termina un objeto o área. En el contexto del procesamiento de imágenes digitales, un borde se caracteriza como una discontinuidad o un cambio abrupto en los valores de intensidad de los píxeles de una imagen, ya sea en escala de grises o en formato Red Green Blue (RGB).

La detección de bordes se basa en calcular la variación de la intensidad en cada píxel mediante el gradiente de intensidad en diferentes direcciones de la imagen. Para una imagen en escala de grises $I(x, y)$, los gradientes en las direcciones horizontal x y vertical y se determinan mediante las derivadas parciales, expresadas como:

$$G_x(x, y) = \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$G_y(x, y) = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \quad (2.2)$$

La magnitud del gradiente, que indica la variación total de intensidad en un punto dado, se calcula con:

$$|\nabla I(x, y)| = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (2.3)$$

Un valor elevado de la magnitud del gradiente sugiere la presencia de un borde. Además, la dirección del gradiente, que señala el sentido de la mayor variación de intensidad (y, por tanto, la orientación del borde), se calcula como:

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)}\right) \quad (2.4)$$

Las derivadas parciales en cada píxel de una imagen se aproximan utilizando operadores aplicados mediante convoluciones con máscaras o filtros que calculan las diferencias de intensidad entre píxeles vecinos.

Un operador ampliamente utilizado para la detección de bordes es el filtro *Sobel*, representado por las siguientes matrices para las direcciones x e y :

$$S_x^S = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; S_y^S = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

La convolución de estas máscaras con la imagen permite calcular los gradientes en x e y para cada píxel, según:

$$G_x(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 S_x^S(i, j) \cdot I(x + i, y + j) \quad (2.6)$$

$$G_y(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 S_y^S(i, j) \cdot I(x + i, y + j) \quad (2.7)$$

Finalmente, los máximos locales de $G_x(x, y)$ y $G_y(x, y)$ representan los puntos de la imagen correspondientes a bordes. La dirección de estos bordes está determinada por $\theta(x, y)$.

2.2.3. Detección de figuras geométricas en imágenes digitales

La detección de figuras geométricas en imágenes digitales es fundamental en el procesamiento de imágenes debido a su amplia variedad de aplicaciones. Entre las figuras geométricas, los círculos son particularmente útiles debido a su representación simple, lo que facilita su detección.

Uno de los métodos más efectivos para la detección de círculos en imágenes digitales es la transformada circular de Hough (HCT) [30], la cual consiste en la determinación de los centros de los círculos en la imagen a través de posibles candidatos.

En una imagen bidimensional, un círculo puede ser representado de la forma:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (2.8)$$

Donde (a, b) corresponden a las coordenadas desconocidas del centro del círculo y r al radio conocido del círculo.

En primer lugar, se realiza una detección de bordes en la imágenes analizadas en escala de grises a través del operador *Sobel* (Sección 2.2.3), de esta forma se identifican los bordes que podrían formar parte de un círculo.

Para cada píxel (a, b) identificado como un borde en la imagen, se evalúan los posibles círculos que podrían pasar por ese píxel, según la Ec. 2.8. Para cada conjunto de posibles centros de círculos generados, se emite un voto en la posición correspondiente a esos centros. Esto significa que cada intersección de posibles centros de círculos en el acumulador incrementa el conteo para el centro correspondiente.

Una vez que todos los píxeles en los bordes han contribuido con sus votos, se buscan los píxeles en el acumulador con la mayor cantidad de votos. Estos píxeles, que superan un umbral establecido, se identifican como los posibles centros de círculos con el radio r en la imagen.

En la Figura 2.2 se muestra cómo funciona la detección del centro de un círculo a través del uso de la transformada circular de Hough a partir de cuatro puntos de su perímetro detectados como bordes.

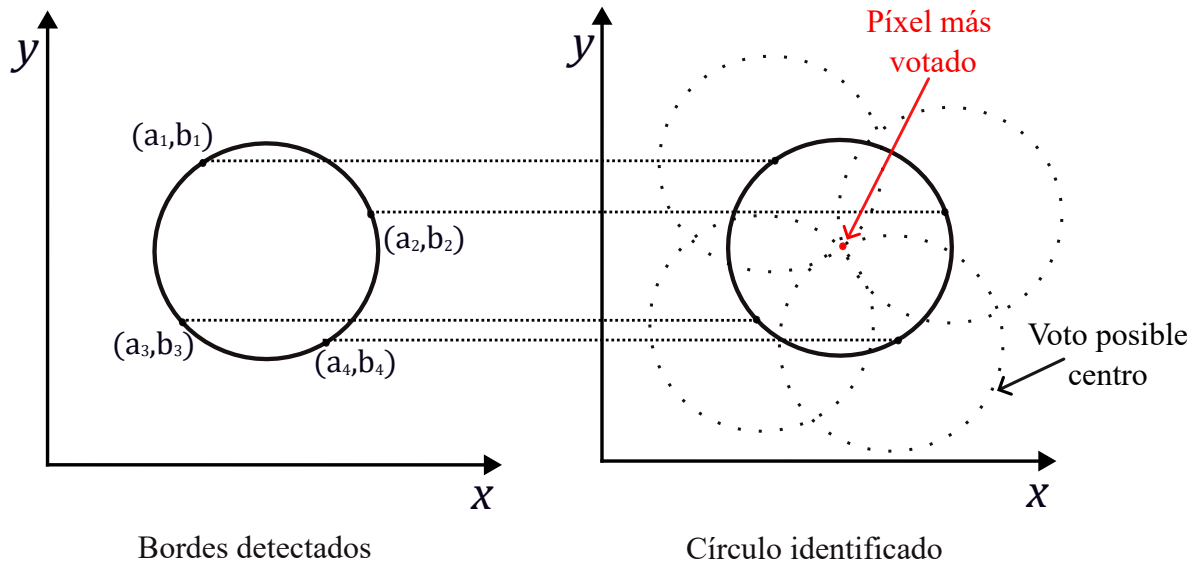


Figura 2.2 Esquema transformada circular de Hough

2.2.4. Amplificación de movimiento

La amplificación de movimiento es una técnica de procesamiento de video cuyo objetivo es aumentar, por un factor determinado, la visibilidad de movimientos que, de otra forma, serían difíciles o imposibles de observar.

En general, los métodos de amplificación de movimiento se fundamentan en la variación de intensidad de un píxel respecto al promedio de intensidad de un conjunto definido de píxeles vecinos.

Entre los métodos lineales, los más comúnmente utilizados son los métodos eulerianos. En este tipo de métodos, el video de entrada se descompone en bandas o rangos de frecuencia espacial utilizando una pirámide de imágenes. Luego, se aplica un filtro temporal común a todas las

bandas con el objetivo de eliminar el ruido en cada fotograma y seleccionar las frecuencias específicas de interés. Posteriormente, las bandas espaciales filtradas se amplifican según un factor de amplificación establecido. La señal resultante de este proceso se combina con la señal original obtenida durante la descomposición. Finalmente, las bandas espaciales se vuelven a unir, generando el video de salida amplificado.

Para explicar la relación entre el procesamiento temporal y la amplificación de movimiento, se considera el caso simple de una señal unidimensional (1D) que experimenta un movimiento de traslación. Este análisis puede después ser expandido a un movimiento bidimensional (2D). Si se considera una posición x , un tiempo t y una función de desplazamiento $\delta(t)$, la función de intensidad observada de la imagen se puede expresar como:

$$I(x, t) = f(x + \delta(t))$$

Si $t = 0$, se cumple que $\delta(t) = 0$. El objetivo consiste en amplificar el movimiento $\delta(t)$ mediante un factor de amplificación α . La señal deseada se puede expresar como:

$$\hat{I}(x, t) = f(x + (1 + \alpha)\delta(t))$$

Asumiendo un pequeño desplazamiento $\delta(t)$, es posible aplicar series de Taylor de primer orden alrededor de x para aproximar la función de intensidad tal que:

$$I(x, t) \approx f(x) + \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

Aplicando un filtro pasa banda a la señal $I(x, t)$ en cada posición de x , se obtiene una señal resultante $B(x, t)$ tal que:

$$B(x, t) = \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

Luego, la señal filtrada se amplifica por el factor de amplificación α y se añade de vuelta a $I(x, t)$, de forma que:

$$\tilde{I}(x, t) = I(x, t) + \alpha B(x, t)$$

Finalmente, combinando las ecuaciones, se llega a:

$$\tilde{I}(x, t) \approx f(x) + (1 + \alpha) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

Es posible que, al aplicar el filtro pasa banda, $\delta(t)$ no esté completamente dentro de la banda, por lo que se considera un factor de atenuación γ_k tal que la señal filtrada se expresa como:

$$B(x, t) = \sum_k \gamma_k \delta_k(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

De esta forma, la señal procesada se puede expresar como:

$$\tilde{I}(x, t) \approx f(x + \sum_k (1 + \alpha \gamma_k) \delta_k(t))$$

Por su parte, los métodos no lineales de amplificación de movimiento más comunes se fundamentan en la variación de fase. Aunque estos métodos presentan una mayor exigencia computacional, son menos sensibles al ruido, lo que evita la amplificación de movimientos irrelevantes.

Al igual que en los métodos lineales, los métodos basados en fase pueden ser explicados considerando el caso simple de la intensidad de una imagen unidimensional, la cual experimenta una traslación en el tiempo, $f(x + \delta(t))$, con un desplazamiento $\delta(t)$. Utilizando una descomposición en series de Fourier se tiene:

$$f(x + \delta(t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))}$$

En donde cada banda corresponde a una única frecuencia ω que se define como:

$$S_{\omega}(x, t) = A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))}$$

Como $S_{\omega}(x, t)$ es una senoidal, su frecuencia $\omega(x + \delta(t))$ contiene información sobre el movimiento. Como en el teorema del desplazamiento de Fourier, es posible manipular el movimiento modificando la fase. Al aplicar un filtro a la fase en un rango determinado de frecuencias se obtiene:

$$B_{\omega}(t) = \omega \delta(t)$$

Luego, amplificando la señal filtrada por un factor de amplificación α y sumándola a la banda inicial $S_{\omega}(x, t)$, se obtiene:

$$\hat{s}_{\omega}(x, t) = A_{\omega} e^{i\omega(x+(1+\alpha)\delta(t))}$$

2.2.5. Aliasing en registros vibratorios obtenidos con un smartphone

El aliasing es un fenómeno que ocurre en el procesamiento de señales y la adquisición de datos. Este efecto se manifiesta cuando la frecuencia de muestreo con la que se están adquiriendo los datos es insuficiente para representar correctamente la información presente en la señal, es decir, cuando la frecuencia de muestreo es menor que la frecuencia de Nyquist, lo que provoca distorsiones en la señal medida, tal como se muestra en la Figura 2.3. Como consecuencia, los

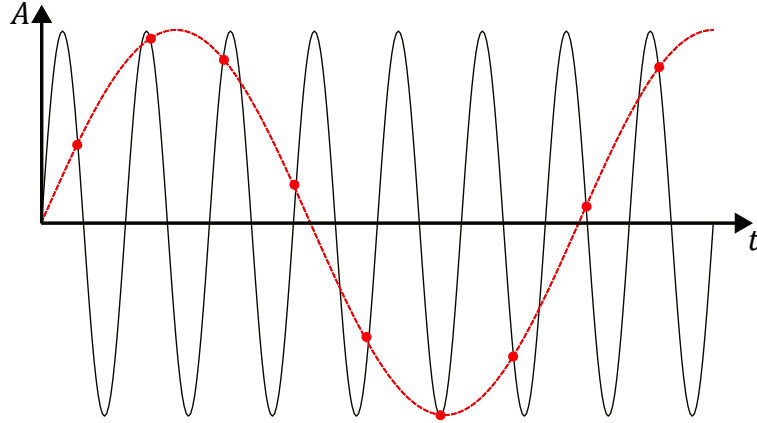


Figura 2.3 Representación de una señal con aliasing.

componentes periódicos de alta frecuencia en la señal aparecen de forma errónea a frecuencias más bajas, dificultando la correcta interpretación de los datos.

Una de las principales limitaciones del uso de un smartphone como herramienta de medición de vibraciones, es la frecuencia de muestreo de las mediciones, la cual está limitada por los fotogramas por segundo a los que pueden capturar videos estos equipos, lo que los vuelve propensos a experimentar el fenómeno del aliasing.

Con el objetivo de solucionar esta limitación, se escogió de la literatura el método propuesto por Yang et al [31]. Este método se basa en la analogía del aliasing del papel plegado (Figura 2.4), la cual describe cómo las frecuencias de una señal se “pliegan” en el espectro cuando la frecuencia de muestreo utilizada en una medición no es lo suficientemente alta.

El método consiste en utilizar múltiples mediciones con diferentes frecuencias de muestreo (FPS) no correlacionadas, es decir, que tengan una relación irracional entre sí, para así obtener sets de datos independientes. Al conocer cómo se comporta el espectro en frecuencia de una señal la cual presenta aliasing, es posible determinar las posibles frecuencias reales de un componente espectral. Las frecuencias reales f_M en el espectro para cada medición a partir del número de pliegues m , la frecuencia de muestreo f_s y la frecuencia medida \hat{f} como:

$$\begin{aligned}
 f_{M,1} &= \begin{cases} m_1^+ f_{s,1} + \hat{f}_1 \\ (m_1^- + 1) f_{s,1} - \hat{f}_1 \end{cases} & \forall m_1 \in \mathbb{Z} \\
 f_{M,2} &= \begin{cases} m_2^+ f_{s,2} + \hat{f}_2 \\ (m_2^- + 1) f_{s,2} - \hat{f}_2 \end{cases} & \forall m_2 \in \mathbb{Z}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Las soluciones generales factibles de f_M son la intersección entre ambos conjuntos de soluciones $\{f_{M,1}\} \cap \{f_{M,2}\}$. Mientras mayor sea el número de mediciones utilizadas, mayor será la precisión de las frecuencias identificadas y la garantía de que las frecuencias determinadas corresponden a las frecuencias reales de la señal. En la Figura 2.5 se muestra un esquema general del método propuesto para n mediciones.

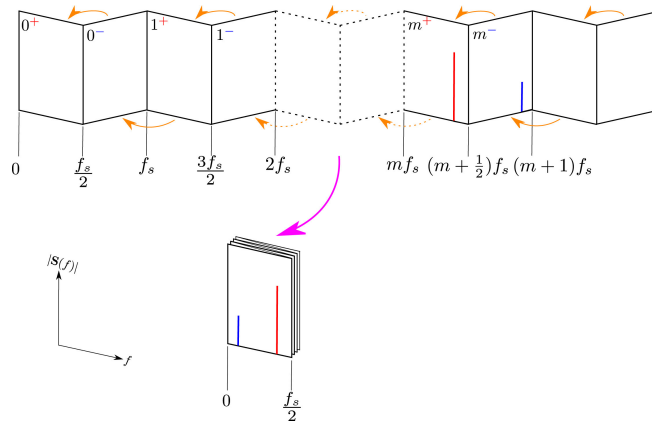


Figura 2.4 Representación del aliasing papel plegado [31].

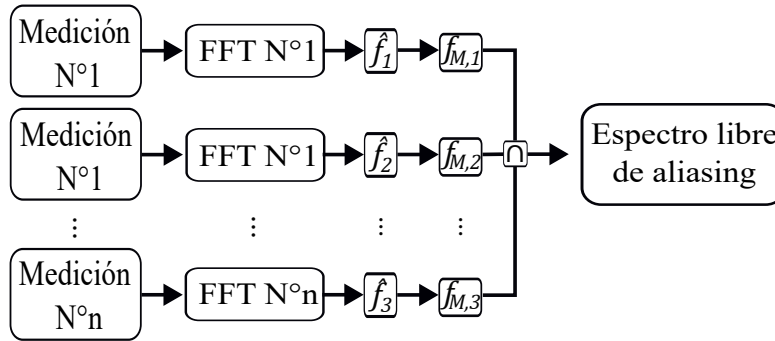


Figura 2.5 Esquema funcionamiento del método propuesto.

2.2.6. Distorsión en imágenes digitales

Al utilizar la visión artificial como herramienta, es fundamental que las imágenes obtenidas representen correctamente la forma y las proporciones de las estructuras analizadas en toda su extensión. Es por esta razón que la correcta corrección de las fuentes de alteración en los videos capturados es fundamental para aumentar la precisión de los resultados obtenidos, especialmente si el método utilizado para la medición está basado en la identificación y seguimiento de figuras geométricas.

La distorsión óptica es un tipo de alteración geométrica que ocurre en imágenes digitales debido al lente utilizado y sus características (forma y tamaño). Este efecto produce un cambio local en la escala de la imagen, lo cual puede producir que las líneas rectas en el mundo real aparezcan curvadas o deformadas en imágenes. Existen diversos tipos de distorsión óptica, siendo los más comunes la distorsión radial, en la cual las líneas rectas se curvan hacia afuera desde el centro, y la distorsión tangencial, en la cual las líneas rectas se curvan hacia el centro, tal como se muestra en la Figura 2.6.

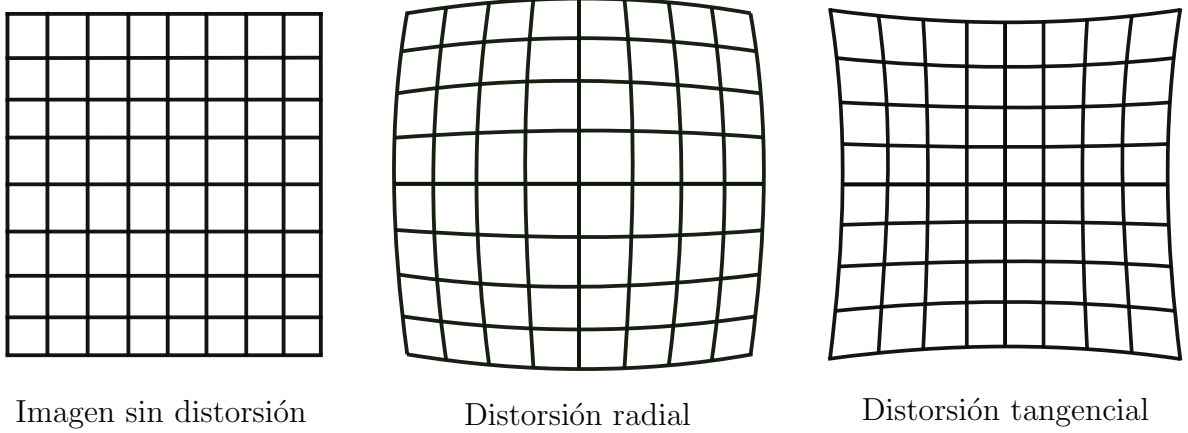


Figura 2.6 Tipos de distorsión óptica.

La distorsión óptica no reduce la información contenida en una imagen, sino que modifica la posición de esta en la imagen. Es por esto que es posible corregir el efecto de la distorsión óptica en las imágenes capturadas a través de un proceso de calibración. Uno de los métodos más ampliamente utilizados para calibrar una cámara es el basado en el modelo de distorsión de Brown-Conrady [32], con el cual es posible modelar tanto la distorsión radial como la tangencial simultáneamente de la forma:

$$x_0 = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2\lambda_1xy + \lambda_2(r^2 + 2x^2) \quad (2.10)$$

$$y_0 = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + \lambda_1(r^2 + 2y^2) + 2\lambda_2xy \quad (2.11)$$

Donde (x_0, y_0) son las coordenadas de cada punto en la imagen después de la corrección, k_1, k_2, k_3 son los coeficientes de calibración de la distorsión radial, λ_1, λ_2 son los coeficientes de calibración de la distorsión tangencial, y r es la distancia entre un punto en la imagen distorsionada y el centro de la distorsión.

Para determinar los coeficientes específicos de distorsión correspondientes a cada lente o cámara, es necesario realizar un proceso sistemático de calibración utilizando un patrón de referencia, generalmente un tablero de ajedrez colocado sobre una superficie plana. Este patrón debe ser asimétrico, es decir, uno de sus lados debe contener un número impar de rectángulos por fila y un número par de rectángulos por columna, o viceversa. La asimetría del patrón permite identificar de manera precisa la orientación y posición del tablero durante el proceso de calibración.

El proceso de calibración implica tomar múltiples imágenes del patrón de calibración, desde distintos ángulos y distancias. A partir de estas imágenes, se detectan las intersecciones de las líneas del patrón, que sirven como puntos de referencia. Se definen las posiciones de estos puntos de referencia en el mundo real, asumiendo que el tablero de ajedrez es plano y que sus dimensiones son conocidas. Con esta información, se optimizan y estiman los coeficientes del lente utilizando el método de mínimos cuadrados no lineales, lo que permite corregir las distorsiones de la imagen de manera precisa. En la Figura 2.7 se muestra un esquema del proceso de calibración y de la corrección de la distorsión óptica en imágenes.

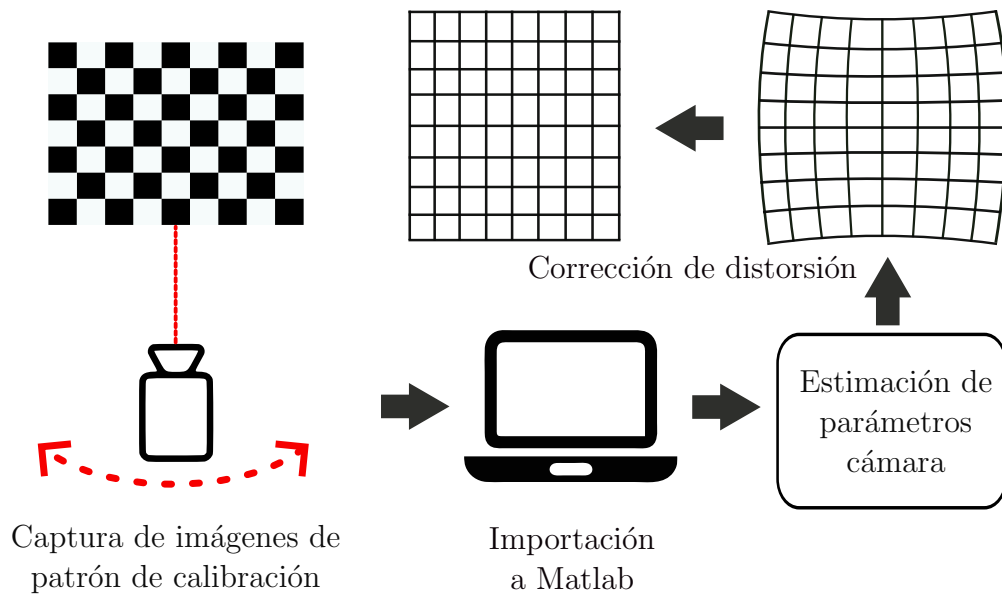


Figura 2.7 Esquema corrección de distorsión óptica.

2.3. Medición de vibraciones

En esta sección se describirá la metodología empleada para obtener registros vibratorios a partir de videos capturados con la cámara de un smartphone a través de técnicas de procesamiento de imagen y video.

2.3.1. Construcción código de medición

El método seleccionado para la obtención de vibraciones es el seguimiento de objetivos o marcadores circulares artificiales de plástico posicionados en la superficie de las estructuras que se quieren analizar.

Mediante el uso de la plataforma MATLAB, se desarrolló un algoritmo para obtener registros vibratorios de una estructura a través del procesamiento de videos capturados con la cámara de un smartphone (Anexo A). Los parámetros de entrada para la realización de los cálculos corresponden al video, al diámetro de los objetivos circulares en milímetros, el diámetro aproximado de los marcadores en píxeles, el número de objetivos a los que se les quiere dar seguimiento, el factor de amplificación de movimiento, y los fotogramas por segundo del video a analizar (ya que, dependiendo del tipo de video, los FPS de grabación no coinciden con los FPS de reproducción).

El algoritmo permite identificar y seleccionar objetivos circulares para su seguimiento, a través de la aplicación de la transformada circular de Hough (sección 2.2.3) a partir del diámetro en píxeles aproximado de los marcadores en el video. Además, determina la ubicación del centroide y el diámetro equivalente en píxeles de los marcadores. Este procedimiento se repite en cada fotograma de forma iterativa, obteniendo las coordenadas de estos objetivos en los ejes x e y de las imágenes. Este proceso permite posteriormente calcular el desplazamiento de los objetivos a partir de la diferencia entre la posición actual e inicial de cada centroide, el diámetro en

milímetros de los marcadores, y los fotogramas por segundo del video. En la Figura 2.8 se muestra un esquema del procedimiento de medición de vibraciones.

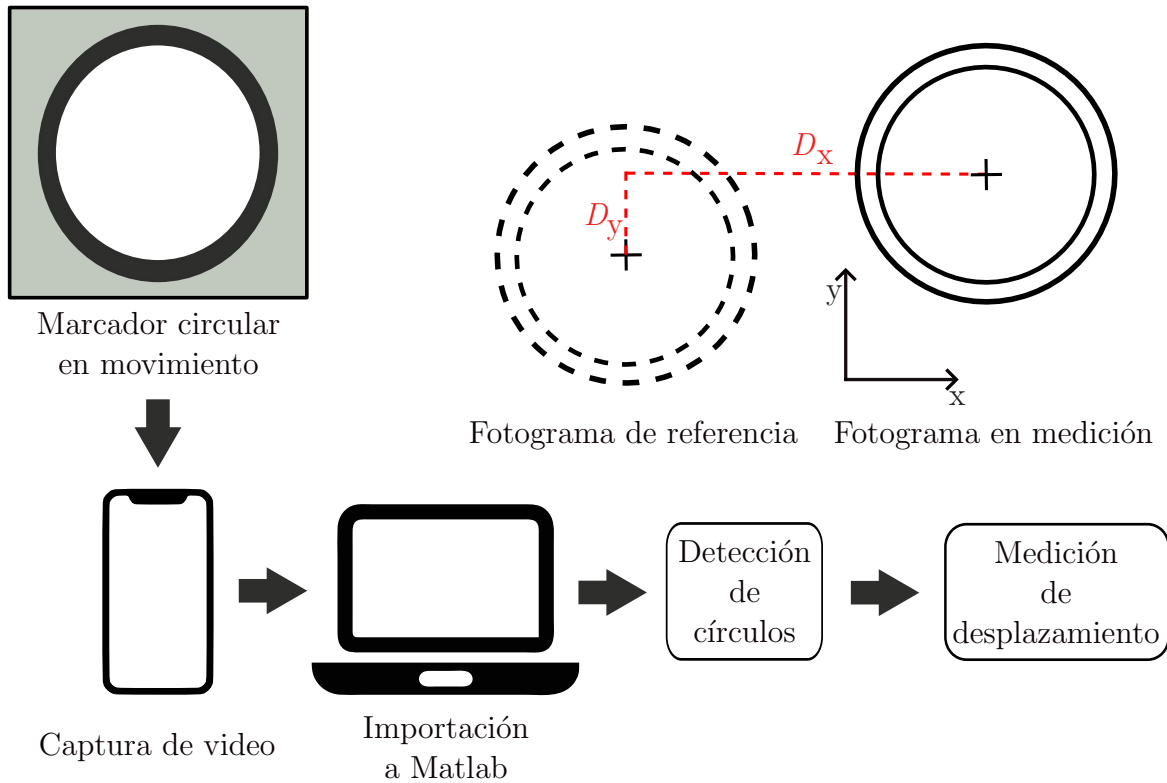


Figura 2.8 Esquema algoritmo de medición.

Adicionalmente al algoritmo base de medición de vibraciones, y con el objetivo de mejorar la precisión de las mediciones obtenidas, se implementó en MATLAB una función para corregir la distorsión óptica producida por el lente de la cámara de los smartphones basado en el modelo de distorsión de Brown-Conrady. Para llevar a cabo esta corrección, además del video que se desea analizar, es necesario un conjunto de imágenes de un patrón de calibración (como se detalla en la sección 2.2.6). Dado que una mayor cantidad de imágenes mejora la efectividad de la calibración, se utiliza un video del patrón visto desde distintos ángulos y distancias. Este proceso de calibración es específico para cada lente y configuración, por lo que es indispensable utilizar un video capturado con la misma cámara y configurada con la misma resolución que el video que se desea corregir. Ya que la distorsión óptica depende de la forma del lente, dos teléfonos del mismo modelo pueden tener parámetros de corrección ligeramente diferentes debido a deformaciones por caídas o golpes durante su uso.

Particularmente, en la realización de mediciones se configuró la cámara del smartphone para trabajar con dos resoluciones diferentes. Los parámetros obtenidos para la corrección de distorsión en el teléfono utilizado se muestran en la Tabla 2.1.

Tal como se indicó previamente, los coeficientes de calibración del lente varían según la resolución en píxeles utilizada, por lo que este factor debe ser considerado al realizar la corrección. En ambos casos, se observa que los coeficientes de distorsión radial son mayores que los tangenciales. Esto se debe a que la distorsión radial es la más predominante en todo tipo de lentes, ya que afecta

Cuadro 2.1 Coeficientes de calibración para la corrección de la distorsión óptica iPhone 14.

Resolución	Distorsión Radial			Distorsión Tangencial	
	k_1	k_2	k_3	λ_1	λ_2
4K (3840x2160)	0.2092	-0.5791	-0.0214	0.0010	0.0024
Full HD (1920x1080)	0.2268	-0.8106	0.8251	0.000881	0.0011

principalmente a los bordes de la imagen y requiere corregir variaciones de mayor magnitud en comparación con la distorsión tangencial.

De manera similar, se implementó un algoritmo de amplificación de movimiento euleriano lineal (como se detalla en la sección 2.2.4) para resaltar el movimiento presente en los videos con la distorsión óptica ya corregida. Los parámetros de entrada para este algoritmo son el factor de amplificación y el rango de frecuencias que se desea amplificar, los cuales son cruciales para evitar la introducción de ruido y asegurar que solo se resalten las frecuencias de interés.

2.3.2. Diseño marcadores circulares

Para la realización de pruebas experimentales, se utilizaron dos tipos de marcadores fabricados a partir de PLA mediante impresoras 3D. En primer lugar, los marcadores mostrados en la Figura 2.9 están compuestos por un círculo blanco interior de 29.65 mm de diámetro, rodeado de un anillo negro de 35.30 mm de diámetro, y un imán de neodimio N38 en la parte trasera. Esta configuración de colores tiene el objetivo de crear un mayor contraste entre el círculo y el fondo de la imagen, facilitando su detección. Además, este diseño permite posicionar el círculo en el mismo sentido de instalación del marcador.



(a) Vista de frente

(b) Vista isométrica

Figura 2.9 Diseño objetivos circulares.

El segundo tipo de marcador, mostrado en la Figura 2.10, está compuesto por un círculo blanco interior de 25 mm de diámetro, rodeado de un marco negro para mayor contraste. A diferencia del primer tipo de marcador, estos se instalan de forma perpendicular a la dirección del círculo blanco debido a la posición de la base imantada. Su diseño estructural robusto proporciona una mayor estabilidad en la instalación y una capacidad mejorada para mantener una posición fija respecto a la estructura a la que está adherido. Este diseño permite reducir el movimiento no

diseño del marcador, el cual podría afectar la precisión de las mediciones de vibraciones. La robustez del diseño también ayuda a mitigar las fuerzas de corte que podrían desestabilizar el marcador durante las pruebas.

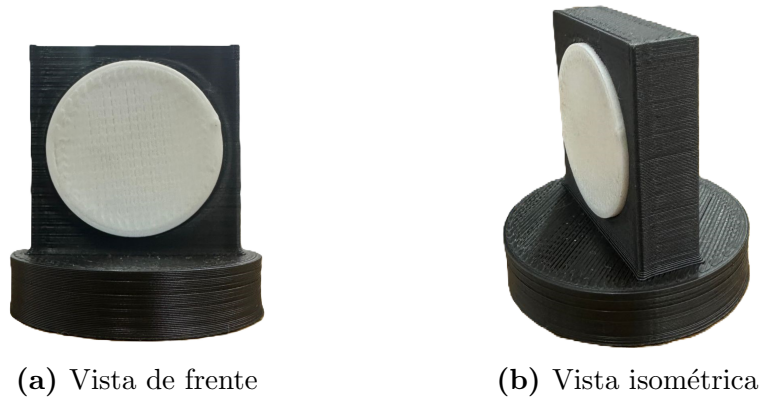


Figura 2.10 Segundo diseño objetivos circulares.

2.3.3. Software y hardware

El software utilizado para el procesamiento de imágenes y videos es la versión R2023a de MATLAB, instalado en un computador ASUS Vivobook 16X M1603QA-MB055W con procesador Ryzen 5 5600H, Windows 11 y 16 GB de memoria RAM. Debido a su versatilidad, el smartphone utilizado para la captura de videos corresponde a un iPhone 14, con capacidad de capturar imágenes con resolución 4K (3.840 x 2.160 píxeles) hasta 60 FPS , imágenes FullHD (1.920 x 1.080 píxeles) hasta 120 FPS e imágenes HD (1.280 x 720 píxeles) hasta 240 FPS sin recurrir a interpolación de fotogramas.

Los objetivos circulares deben colocarse sobre la superficie de la estructura en los puntos específicos donde se desea medir las vibraciones. La cantidad de grados de libertad que pueden ser evaluados está determinada por el número de marcadores instalados. Este método permite medir el desplazamiento en el plano del video.

2.3.4. Iluminación

La iluminación juega un papel crucial en la calidad de las imágenes capturadas, ya que influye directamente en el contraste, la claridad y la visibilidad de los marcadores. En entornos de baja luminosidad, las imágenes pueden volverse borrosas o dificultar la detección precisa de los marcadores, lo que afectaría la precisión de la medición de las vibraciones. Por tanto, se debe procurar una iluminación homogénea y suficiente que evite sombras o reflejos indeseados sobre los marcadores.

Para garantizar una iluminación óptima durante la realización de los ensayos experimentales, se utilizan dos reflectores de luz del tipo *Light Emitting Diode* (LED) de 50 W de potencia, posicionados de manera que los marcadores queden completamente iluminados en todo momento. Esta configuración permite obtener imágenes claras y con un alto nivel de contraste, facilitando así la detección y seguimiento de los marcadores.

Adicionalmente, es importante considerar el impacto de la iluminación ambiental y la instalación lumínica en la habitación durante las mediciones. La corriente alterna de 50 Hz puede generar fluctuaciones en la intensidad luminosa, especialmente perceptibles a velocidades de captura de imágenes superiores a 100 FPS. Debido a esto, durante las mediciones solo se utilizan los reflectores LED como fuente de iluminación, asegurando una iluminación constante y sin parpadeos.

2.3.5. Estabilidad

La estabilidad del smartphone durante el proceso de medición es esencial para minimizar errores en la localización de los marcadores en los fotogramas y garantizar la precisión de las mediciones de desplazamiento. Con el objetivo de evitar movimientos no deseados del teléfono y mitigar los movimientos involuntarios inherentes a la manipulación manual, es importante utilizar un trípode ajustable adaptado para estos dispositivos. Este trípode permite fijar el teléfono de manera segura en la posición deseada, asegurando que se mantenga estable durante todo el proceso de grabación. Adicionalmente, para evitar movimientos innecesarios del teléfono, se emplea un accesorio externo para iniciar y finalizar la captura de imágenes durante la medición. Asimismo, para asegurar la perpendicularidad del teléfono respecto al suelo y separar correctamente el movimiento vertical del horizontal, es importante utilizar un inclinómetro.

3. Ensayos experimentales

En esta sección se detallarán los ensayos experimentales realizados durante la investigación, describiendo cada uno de ellos e indicando sus objetivos.

3.1. Descripción de los ensayos a realizar

Los ensayos experimentales a realizar se describen en la Tabla 3.1. Los ensayos preliminares tienen como objetivo comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo desarrollado. Posteriormente, se implementaron ensayos para determinar la efectividad del método seleccionado como herramienta para medir vibraciones y observar el comportamiento del sistema estudiado, utilizando como referencia señales obtenidas con acelerómetros comúnmente utilizados en la industria.

El análisis comparativo se realizó mediante la evaluación de la velocidad vibratoria, calculada a partir de dos métodos principales: la derivada del desplazamiento obtenido mediante el algoritmo propuesto y la integración de la señal capturada por los acelerómetros de referencia.

Cuadro 3.1 Ensayos experimentales

Ensayo	Descripción	Objetivo
Videos artificiales.	Movimiento forzado de círculos artificiales.	Verificar el correcto funcionamiento del código.
Pruebas en Shaker.	Vibración forzada, grabaciones a 48, 55 y 60 FPS, referencia acelerómetro.	Determinar efectividad del método seleccionado.
Harnero vibratorio.	Grabación a 60 y 120 FPS durante el funcionamiento del harnero vibratorio.	Medir vibraciones, comparar resultados y observar el comportamiento del sistema.

3.1.1. Comprobación del correcto funcionamiento del código

Para la comprobación del correcto funcionamiento del código, se utilizó un video generado en MATLAB a 120 FPS, el cual consiste en 10 círculos blancos de 100 píxeles de diámetro distribuidos de forma aleatoria sobre un fondo negro de dimensiones 800x800 píxeles. En la Figura 3.1a se muestra el primer fotograma del video analizado antes de su procesamiento, mientras que en la Figura 3.1b se presenta el mismo fotograma después del proceso inicial de identificación de círculos. Es posible observar que el algoritmo es capaz de detectar cada círculo presente en la imagen a partir del diámetro aproximado de los círculos en píxeles, incluyendo aquellos círculos parcialmente obstruidos por los límites de la imagen. Por lo tanto, en una aplicación real, no debería afectar que un círculo salga de escena mientras una fracción de este siga siendo visible.

Con el objetivo de corroborar la capacidad del código para calcular el desplazamiento de los objetivos, los círculos generados presentan distintas características en su movimiento. En la Figura 3.2 se muestran las formas de onda y los espectros en frecuencia obtenidos de un círculo

con movimiento senoidal perturbado por un pulso (a), con movimiento senoidal y ruido agregado (b), con movimiento compuesto por tres senoidales de distinta amplitud y frecuencia (c) y con desplazamiento nulo en todo instante de tiempo (d).

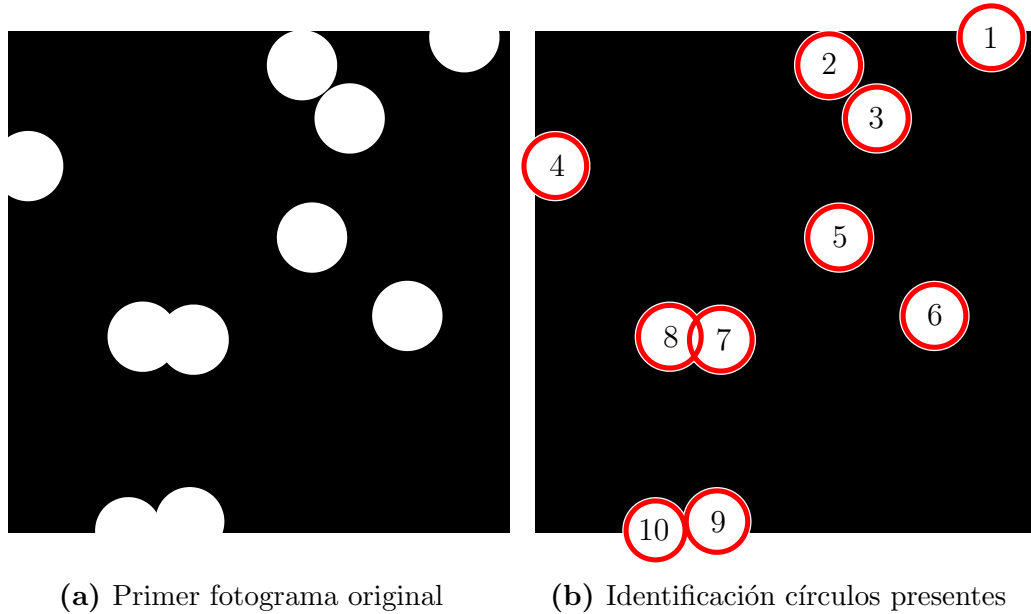


Figura 3.1 Comprobación identificación de objetivos.

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes y el movimiento programado del círculo. Este último estaba compuesto por tres senoidales con amplitudes de 10, 20 y 30 píxeles y frecuencias de 10, 20 y 30 Hz , respectivamente. Los resultados se resumen en la Tabla 3.2.

En términos de frecuencia se observa que el algoritmo es capaz de determinar de forma precisa, teniendo un promedio de error del 0.00%. Sin embargo, en las amplitudes se aprecia un error relativo que oscila entre el 0.30% y el 0.75%. Este error puede atribuirse principalmente a la frecuencia de muestreo del video analizado.

El análisis muestra que el algoritmo es capaz de calcular con precisión el desplazamiento de un círculo en un video, lo que permite la percepción de diversos fenómenos dinámicos. Bajo condiciones ideales de contraste y características geométricas, las señales obtenidas mediante el método seleccionado presentan un comportamiento similar al de señales obtenidas de forma analógica con un sensor de contacto. Sin embargo, para la obtención de registros vibratorios reales, es necesario considerar factores adicionales. Entre ellos se incluyen la iluminación, el contraste, el tamaño de los objetivos, la frecuencia de muestreo (FPS) y la amplitud del movimiento.

Como se muestra en el gráfico (a), el método no introduce ruido por sí solo. Cualquier ruido presente en las mediciones reales se debe a factores externos, como la iluminación, las limitaciones del sensor de la cámara o los movimientos internos del dispositivo utilizado.

Señales videos generados, 120 FPS

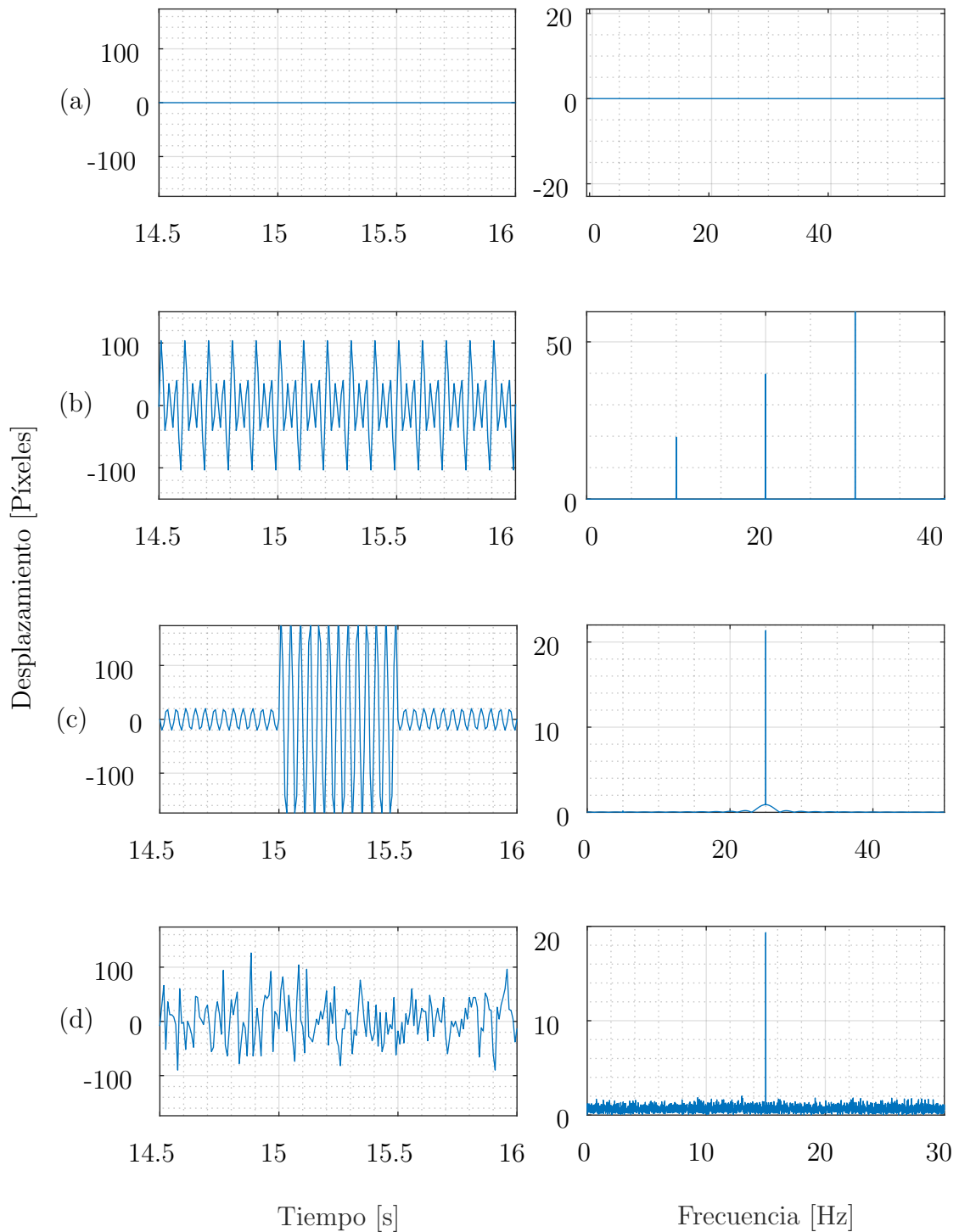


Figura 3.2 Formas de onda (izquierda) y espectros en frecuencia (derecha) ((a): Señal con desplazamiento nulo, (b): Señal movimiento compuesto por tres senoidales, (c): Señal movimiento senoidal perturbada por un pulso, (d): Señal movimiento senoidal con ruido aleatorio).

Cuadro 3.2 Comparación de resultados obtenidos mediante video y señal generada

Componente	Frecuencia (Hz)			Amplitud (Píxeles)		
	Video	Señal	Error	Video	Señal	Error
1	10.00	10.00	0.00 %	19.85	20.00	0.75 %
2	20.00	20.00	0.00 %	39.88	40.00	0.30 %
3	30.00	30.00	0.00 %	59.79	60.00	0.35 %

3.1.2. Pruebas con shaker electrodinámico

Para comprobar la aplicación del método seleccionado para solucionar el aliasing en mediciones tomadas con la cámara de un smartphone, se utilizó como banco de ensayos un generador de vibraciones (Shaker) modelo TIRAvib S 51110. El montaje utilizado para realizar las mediciones se muestra en la Figura 3.3.

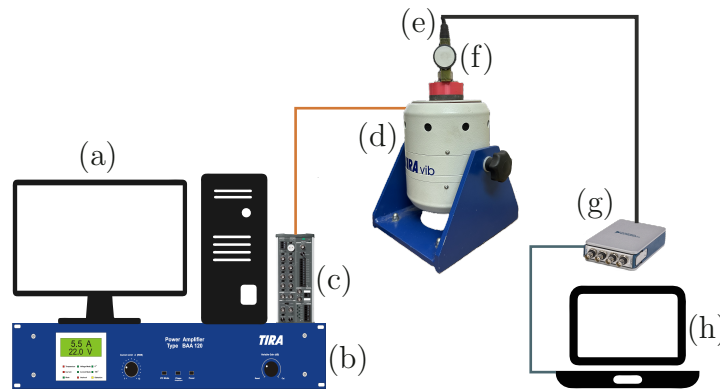


Figura 3.3 Montaje shaker electrodinámico: (a) Computador, (b) Amplificador, (c) Bloque conector BNC 2120, (d) Shaker, (e) Acelerómetro IMI 603C01, (f) Objetivo circular, (g) Módulo de entrada NI 9234, (h) Laptop.

El shaker fue configurado para generar un movimiento con dos condiciones diferentes. La primera condición consiste en dos componentes senoidales: uno con una frecuencia de 15 Hz y el otro de mayor amplitud con una frecuencia de 40 Hz. Para esta configuración, se realizaron mediciones a 48 y a 60 FPS. Con esta combinación de frecuencias de muestreo, se produce el fenómeno de aliasing en ambas mediciones, dado que la frecuencia de muestreo es inferior al doble de la frecuencia del componente senoidal de mayor frecuencia generado por el shaker. Como resultado, la componente de 40 Hz se pliega en el espectro de frecuencia, apareciendo a una frecuencia más baja que su valor real.

En la medición realizada a 48 FPS, se identificaron dos componentes espectrales: el primero con una frecuencia de 7,99 Hz, y el segundo, de mayor amplitud, con una frecuencia de 15,00 Hz. Por otro lado, en la medición a 60 FPS, se identificaron tanto una componente a 15,00 Hz, como un componente de menor amplitud con frecuencia de 19,99 Hz.

Utilizando el método descrito en la sección 2.2.5, se identificó que en ambas mediciones el componente de mayor amplitud y frecuencia de 15 Hz se presentaba en su frecuencia correcta

en los espectros, cumpliendo con los resultados esperados según el teorema de muestreo de Nyquist. En el caso del componente de menor amplitud, a partir de la frecuencia obtenida en cada medición, se identificó correctamente su frecuencia real de 40 Hz con un error del 0,025 %. Para las mediciones a 48 y 60 FPS se tiene respectivamente:

$$f_{M,1} = (0 + 1) \cdot 48 - 7,99 = 40,01 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

$$f_{M,2} = (0 + 1) \cdot 60 - 20,00 = 40,00 \text{ Hz} \quad (3.2)$$

Los espectros de velocidad de las mediciones obtenidas a través del procesamiento de los videos capturados, junto con el espectro de la medición de referencia del acelerómetro, se presentan en la Figura 3.4. Adicionalmente, para visualizar los resultados obtenidos, se incluye el espectro de velocidad generado a partir de la señal de desplazamiento reconstruida, utilizando la frecuencia del componente identificado y el promedio de las amplitudes en desplazamiento de los componentes en las mediciones realizadas a 48 y 60 FPS.

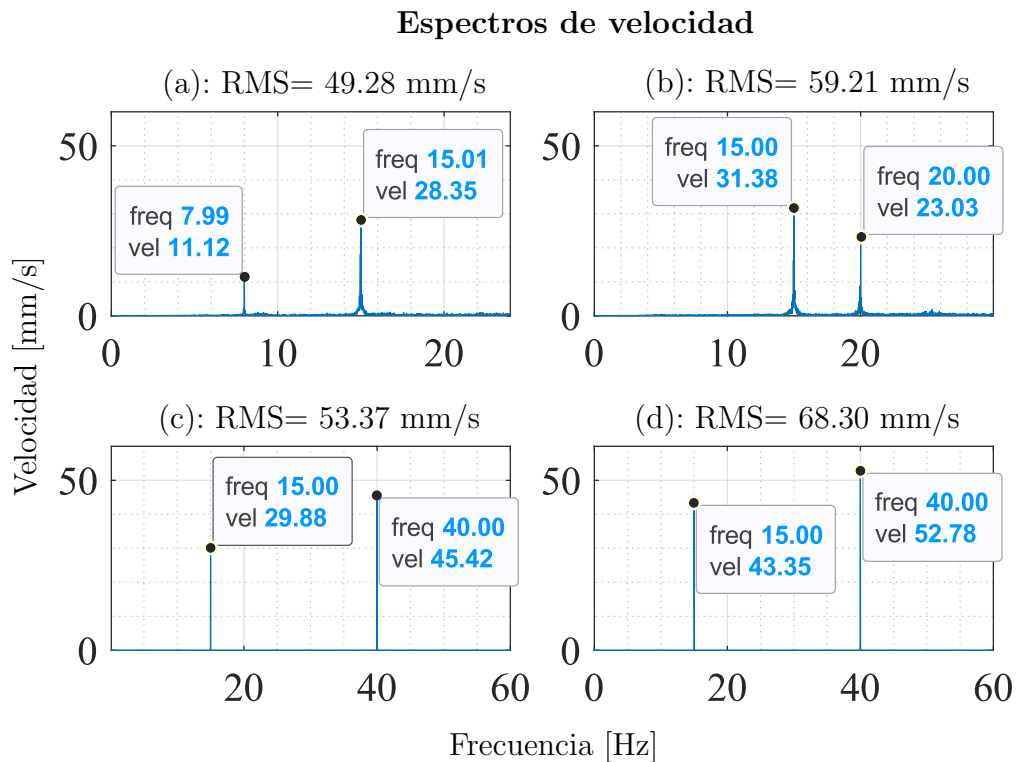


Figura 3.4 Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 1 ((a): Medición 48 FPS, (b): Medición 60 FPS, (c): Medición referencia acelerómetro 2048 FPS, (d) Componentes espectrales identificados).

La segunda condición configurada en el shaker consiste en un movimiento compuesto por un único componente senoidal con una frecuencia de 50 Hz. Para esta configuración, se realizaron mediciones a 48, 55 y 60 FPS . Al igual que en la primera condición, las frecuencias de muestreo utilizadas no son lo suficientemente altas para identificar correctamente la frecuencia del movimiento del shaker, lo que da lugar al fenómeno del aliasing.

Se obtuvo el espectro en frecuencia para cada una de las mediciones realizadas. En la medición a 48 FPS, se identificó un único componente espectral con una frecuencia de 2,00 Hz. Para la medición a 55 FPS, el espectro mostró un componente con una frecuencia de 5,00 Hz. Finalmente, en la medición a 60 FPS, se identificó un componente con una frecuencia de 9,99 Hz.

Utilizando el método descrito, se identificó correctamente la frecuencia real del componente senoidal de 50 Hz afectado por aliasing. Para las mediciones realizadas a 48, 55 y 60 FPS, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$f_{M,1} = (0 + 1) \cdot 48 + 2,00 = 50,00 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

$$f_{M,2} = (0 + 1) \cdot 55 - 5,00 = 50,00 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$$f_{M,3} = (0 + 1) \cdot 60 - 9,99 = 49,99 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

En el caso de las mediciones a 48 y 55 FPS, se obtuvo el resultado exacto de 50 Hz. Por otro lado, en la medición a 60 FPS, se presentó una pequeña diferencia de 0,01 Hz, la cual se atribuye a la precisión en la identificación de frecuencia del método de medición. No obstante, esta discrepancia es insignificante y no afecta la correcta identificación de la frecuencia real del componente senoidal de 50 Hz.

Los espectros de las mediciones obtenidas a través del procesamiento de los videos capturados se muestran en la Figura 3.5. Por otro lado, los espectros obtenidos de la medición de referencia y la señal reconstruida con los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.6.

Los espectros de velocidad obtenidos a partir del procesamiento de los videos capturados se presentan en la Figura 3.5. Por otro lado, la Figura 3.6 muestra los espectros de velocidad correspondientes a la medición de referencia y a la señal reconstruida, generada utilizando las frecuencias identificadas de los componentes y el promedio de las amplitudes de desplazamiento en las mediciones realizadas a 48, 55 y 60 FPS.

A partir de los resultados obtenidos con ambas configuraciones, se concluye que el método es efectivo como una solución al problema del aliasing en mediciones derivadas del procesamiento de videos capturados con cámaras de smartphones. Gracias al bajo error en frecuencia que presenta este método, es posible determinar las intersecciones de las posibles soluciones de frecuencias reales en cada medición. Aunque es factible obtener resultados precisos utilizando únicamente dos mediciones con frecuencias de captura diferentes (como en la configuración 1), se recomienda emplear al menos tres frecuencias de muestreo no correlacionadas para minimizar el riesgo de falsas intersecciones.

Espectros de velocidad

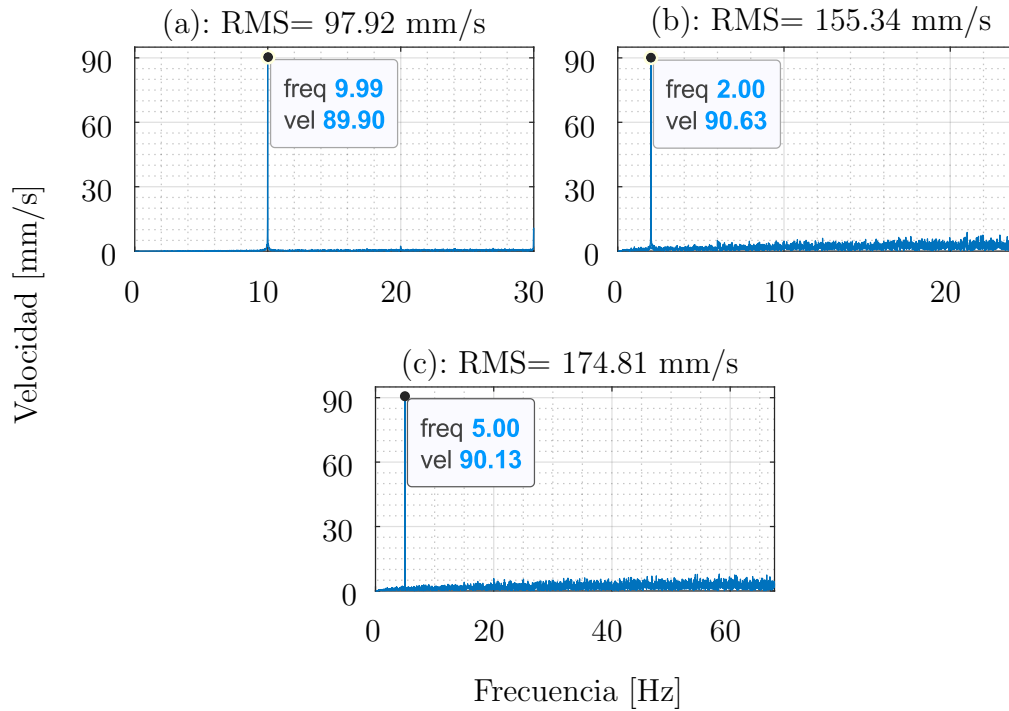


Figura 3.5 Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 ((a): Medición a 60 FPS, (b) Medición 48 FPS, (c): Medición 55 FPS).

Espectros de velocidad

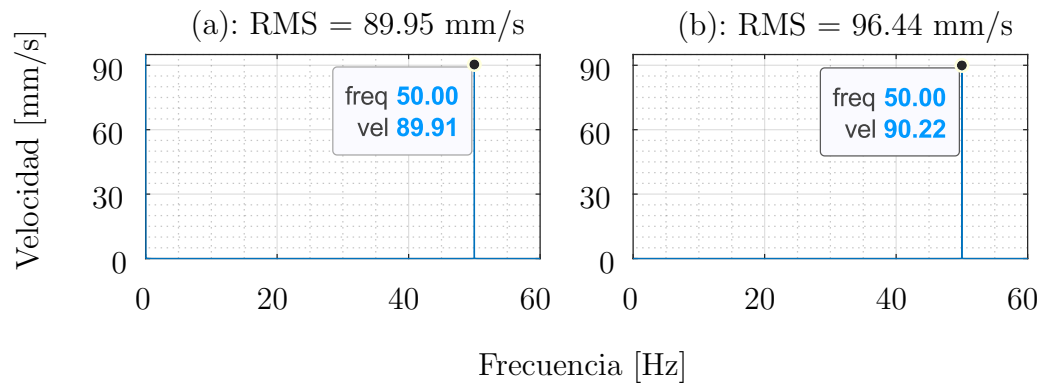


Figura 3.6 Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 ((a): Medición de referencia acelerómetro 2048 FPS, (b) Componente espectral identificado).

3.1.3. Pruebas en harnero vibratorio

Como una aplicación del método planteado, se realizaron mediciones sobre el harnero vibratorio instalado en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción, configurado con una fuerza de 192 N (20 % de la fuerza nominal máxima del motor). Para ello, se instalaron cuatro objetivos del tipo 2 en los puntos indicados en la Figura 3.7 junto con el montaje del banco de ensayos. Dos acelerómetros se instalaron en el apoyo A (S3) y dos en el apoyo B (S4), con H y V indicando las direcciones horizontal y vertical, respectivamente. Se realizaron cuatro mediciones en total: un ensayo de partida del harnero a 60 FPS, un ensayo de golpe vertical sobre el harnero a 60 FPS, y dos mediciones sucesivas del harnero durante su funcionamiento estacionario a 60 y 120 FPS.

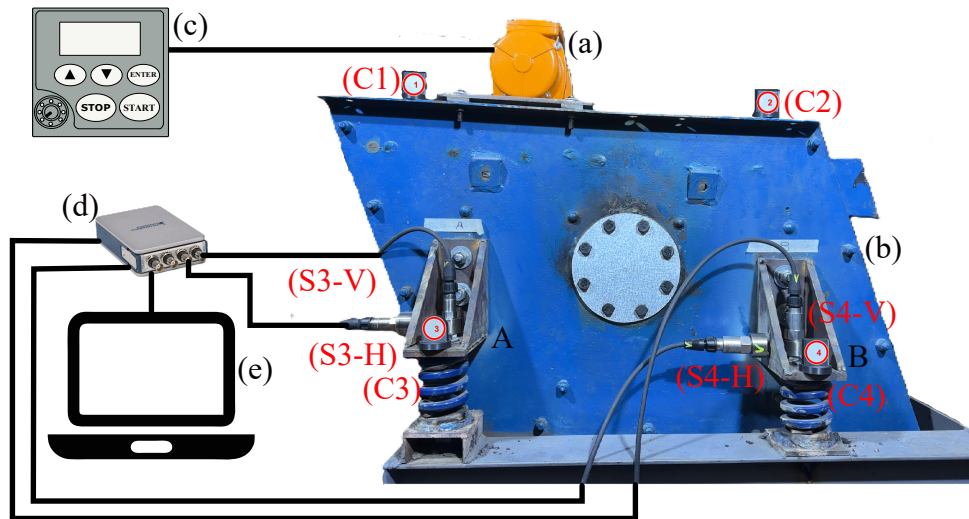


Figura 3.7 Montaje ensayos harnero vibratorio: (a) Excitador, (b) Harnero vibratorio, (c) Variador de frecuencia, (d) Módulo de entrada NI 9234, (e) Laptop, (f) Acelerómetros, (1-4) Marcadores artificiales.

Los videos capturados fueron procesados realizando previamente una corrección de la distorsión óptica, de la cual se discutirá en la siguiente sección. Los resultados obtenidos en las mediciones se presentan a continuación. La Figura 3.8 muestra el ensayo de partida del harnero vibratorio hasta la velocidad nominal del motor de 25 RPM. La Figura 3.9 muestra los resultados del ensayo de golpe vertical. Las Figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 muestran los espectros en frecuencia de velocidad en los apoyos del harnero para las mediciones a 60 y 120 FPS, mientras que las Figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 muestran sus órbitas de desplazamiento. Adicionalmente, dado que el movimiento de un harnero vibratorio presenta un componente predominante a la velocidad de rotación del excitador, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en velocidad en el apoyo A mediante procesamiento de videos y acelerómetros, la cual se muestra en la Tabla 3.3.

Cuadro 3.3 Comparación de resultados obtenidos mediante video y acelerómetros

Movimiento	Medición	FPS	Componente 1X harnero vibratorio					
			Frecuencia (Hz)			Amplitud (mm/s ²)		
			Video	Sensor	Error	Video	Sensor	Error
Horizontal	1	60	24.73	24.67	0.243 %	22.48	22.97	2.13 %
	2	120	24.71	24.67	0.162 %	22.08	22.97	3.875 %
Vertical	1	60	24.73	24.67	0.243 %	21.57	21.99	1.91 %
	2	120	24.71	24.67	0.162 %	22.96	21.99	4.41 %

Ensayo de partida Harnero, 60 FPS

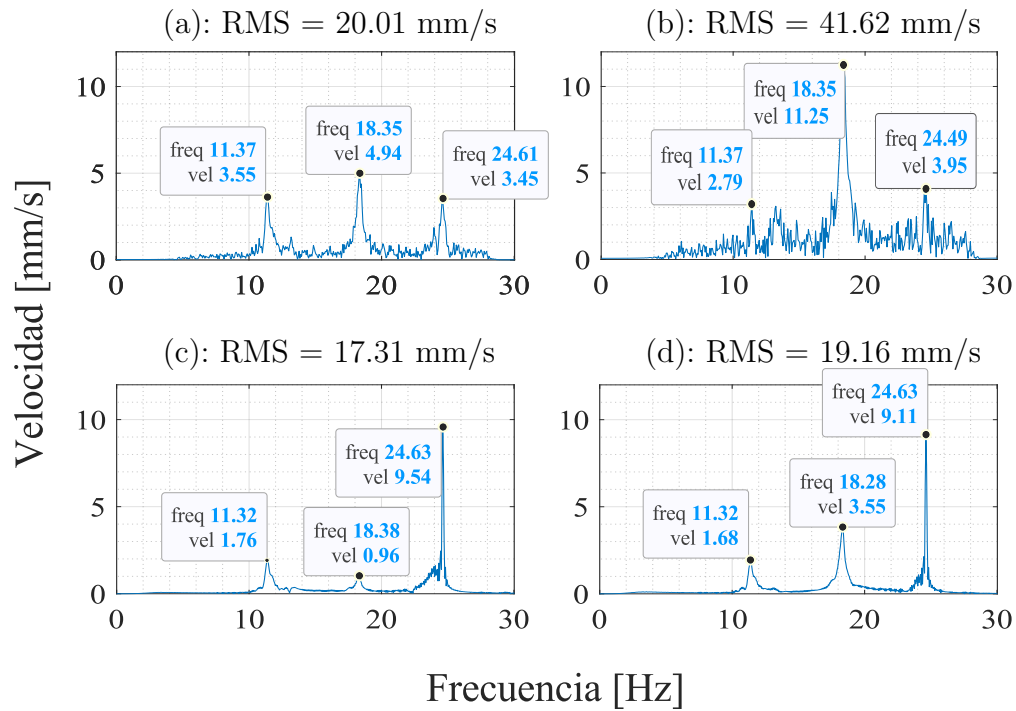


Figura 3.8 Espectros ensayo de partida harnero, grabación a 60 FPS apoyos ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 3, (b): Movimiento dirección vertical círculo 3, (c): Acelerómetro horizontal S3-H, (d): Acelerómetro vertical S3-V).

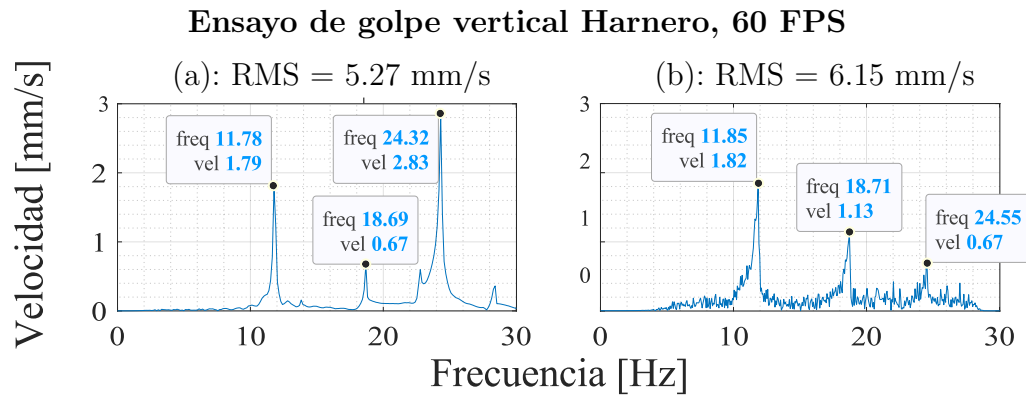


Figura 3.9 Espectros ensayo de golpe vertical harnero, grabación a 60 FPS apoyo A (a): acelerómetro vertical S3-V, (b): movimiento dirección vertical círculo 3).

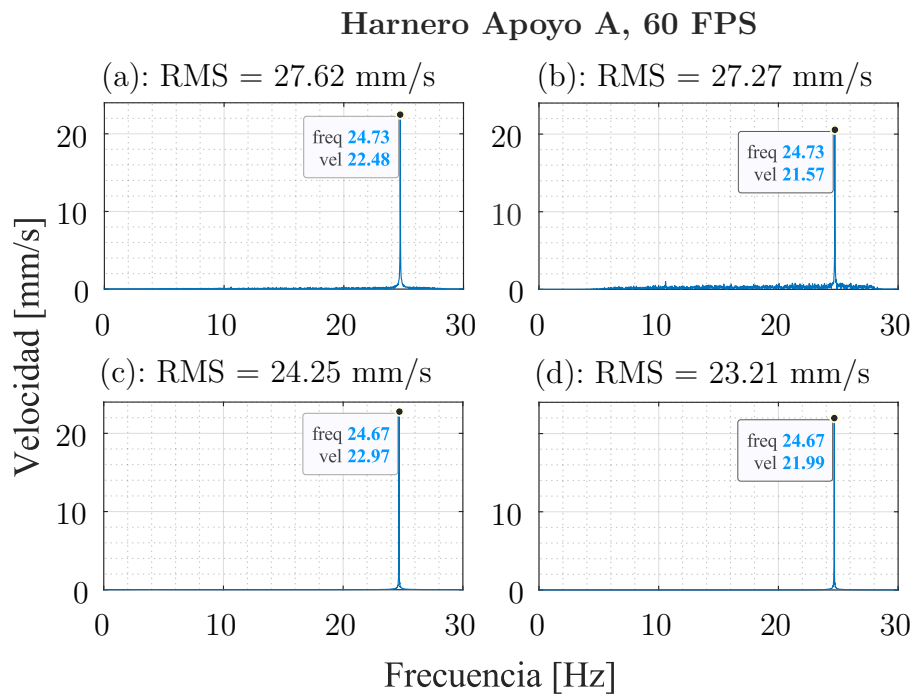


Figura 3.10 Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo A ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 3, (b): Movimiento dirección vertical círculo 3, (c): Acelerómetro horizontal S3-H, (d): Acelerómetro vertical S3-V).

Harnero Apoyo B, 60 FPS

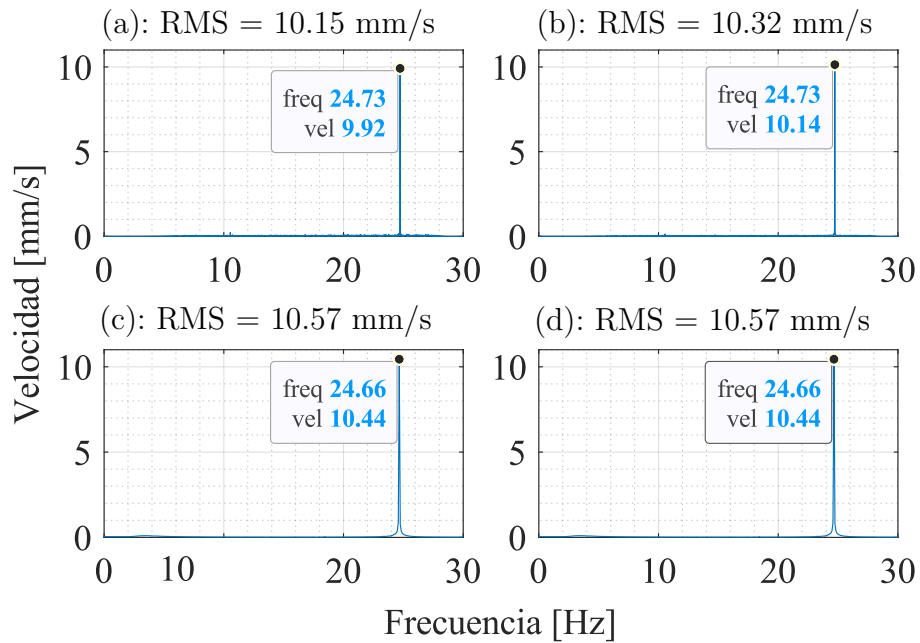


Figura 3.11 Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo B ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 4, (b): Movimiento dirección vertical círculo 4, (c): Acelerómetro horizontal S4-H, (d): Acelerómetro vertical S4-V).

Harnero Apoyo A, 120 FPS

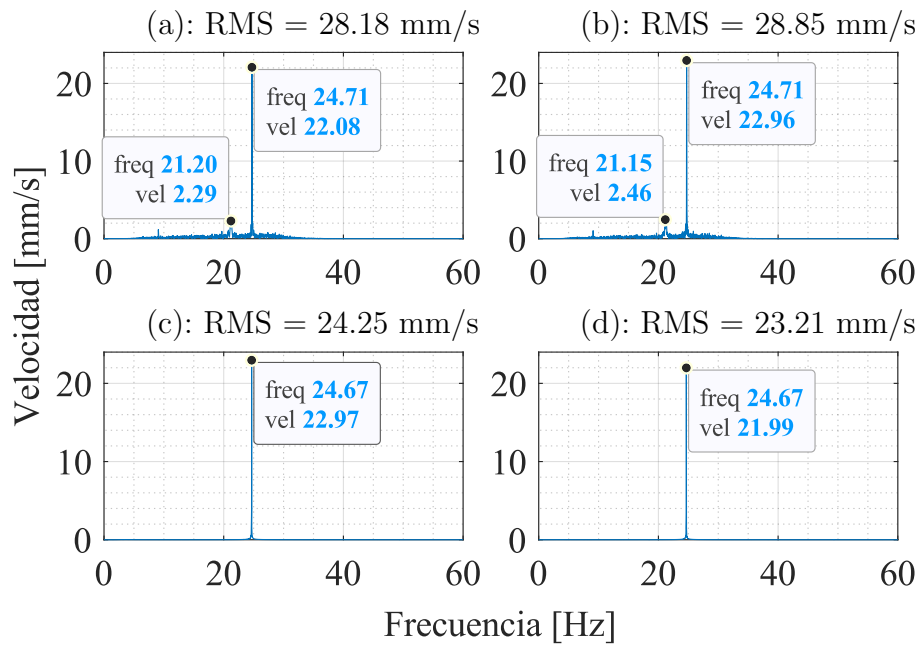


Figura 3.12 Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo A ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 3, (b): Movimiento dirección vertical círculo 3, (c): Acelerómetro horizontal S3-H, (d): Acelerómetro vertical S3-V).

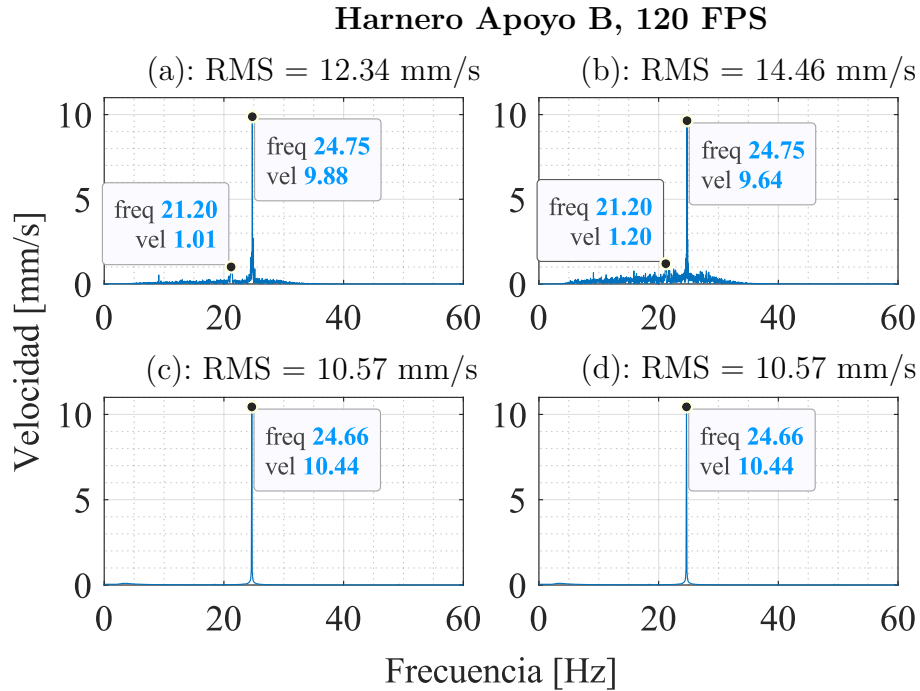


Figura 3.13 Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo B ((a): Movimiento dirección horizontal círculo 4, (b): Movimiento dirección vertical círculo 4, (c): Acelerómetro horizontal S4-H, (d): Acelerómetro vertical S4-V).

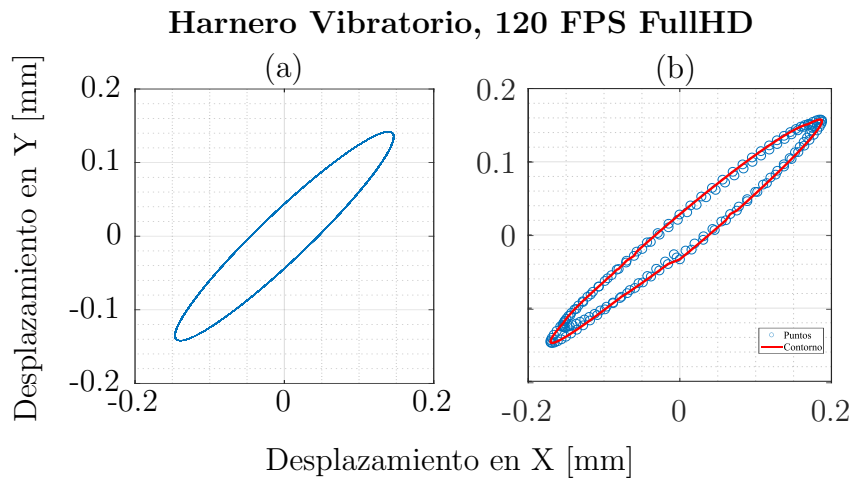


Figura 3.14 Órbita harnero, grabación 120 FPS, apoyo A ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 20 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).

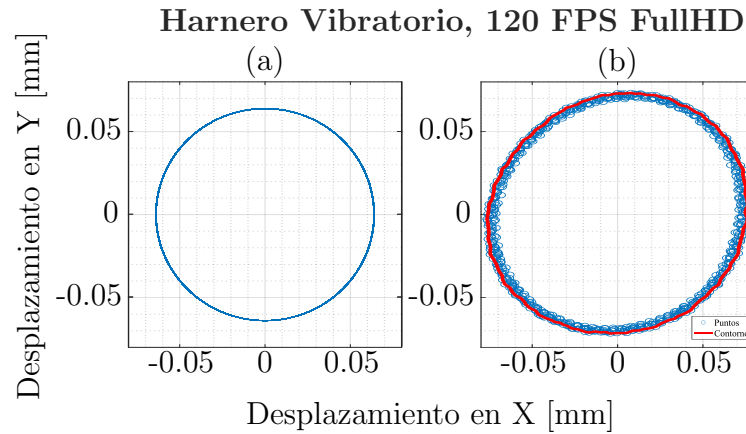


Figura 3.15 Órbita harnero, grabación 120 FPS, apoyo B ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 20 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).

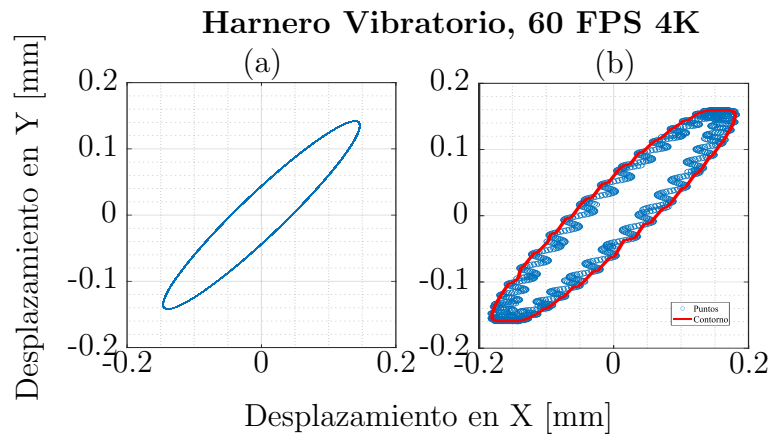


Figura 3.16 Órbita harnero, grabación 60 FPS, apoyo A ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 100 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).

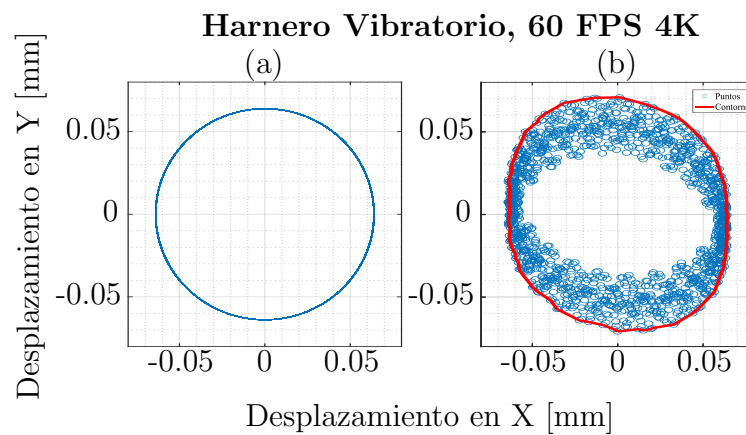


Figura 3.17 Órbita harnero, grabación 60 FPS, apoyo B ((a): Medición acelerómetros, (b): Nube de puntos para 100 ciclos de movimiento medición procesamiento de video).

Al analizar los resultados, se observa que, en general, los espectros en frecuencia de las mediciones realizadas a 120 FPS presentan un mayor nivel de ruido en comparación con las mediciones tomadas a 60 FPS, lo cual se traduce en un mayor porcentaje de error en la amplitud del componente predominante en el espectro en frecuencia (2.15 % de diferencia en el promedio del error en las mediciones en ambos apoyos del harnero). Este mayor nivel de ruido se evidencia tanto en el incremento del nivel global de ruido o "pasto" en el espectro como en el mayor valor RMS del mismo, así como en la aparición de pequeños componentes de menor frecuencia que no se observan en las mediciones a 60 FPS ni en las obtenidas con los acelerómetros. Esta diferencia puede explicarse debido a la variación en la calidad de las imágenes capturadas en cada medición. Al tener los videos a 60 FPS una mayor resolución, estos presentan una mayor precisión espacial y, por lo tanto, menor ruido en el desplazamiento medido.

En cada medición realizada, se obtuvo la misma frecuencia predominante en ambos apoyos del harnero. Se observa que el error obtenido en las mediciones a 60 FPS, comparado con las mediciones realizadas con los acelerómetros, es mayor que en las mediciones a 120 FPS (aproximadamente 1.5 veces el error obtenido para 120 FPS). Esta diferencia en el error puede explicarse por la diferencia en la resolución temporal ($1/f_s$) producida por la mayor cantidad de fotogramas por segundo capturados.

De esta forma, se observa que la precisión en los resultados obtenidos en amplitud, en condiciones ideales de medición, se ve afectada mayormente por la resolución del video utilizado, mientras que el error en frecuencia está más influenciado por los FPS. Por lo tanto, al trabajar con smartphones, se genera un compromiso entre la resolución temporal y espacial al seleccionar las características del video, ya que generalmente no es posible obtener simultáneamente la mayor resolución y la máxima cantidad de FPS.

Respecto a las órbitas obtenidas para los apoyos del harnero, se puede apreciar que las obtenidas en las mediciones realizadas a 120 FPS presentan un comportamiento más cercano a las órbitas de referencia obtenidas con acelerómetros en comparación con las obtenidas en las mediciones a 60 FPS. Esto se debe directamente a la diferencia en la frecuencia de muestreo entre ambos sets de mediciones.

En las mediciones realizadas a 60 FPS, la relación entre la frecuencia de muestreo y la frecuencia del excitador del harnero vibratorio es de 2,4, lo que implica que en cada ciclo de vibración del harnero se capturan aproximadamente dos o tres fotogramas. Por otro lado, en las mediciones a 120 FPS, esta relación aumenta a 4,8, permitiendo capturar entre cuatro y cinco fotogramas por ciclo de movimiento. Esta baja cantidad de fotogramas por ciclo dificulta la representación de las órbitas del harnero como gráficos de líneas continuas. Esto ocurre debido a un efecto similar al aliasing, donde la frecuencia de muestreo no es suficiente para reconstruir de manera precisa el movimiento continuo de la órbita.

Como alternativa, es posible graficar los puntos obtenidos en las mediciones en forma de nube de puntos en lugar de un gráfico de líneas, como se muestra en la Figura 3.18. Esta representación permite visualizar la forma de la órbita mediante el contorno definido por la distribución de puntos. A medida que se incrementa la cantidad total de fotogramas (o ciclos analizados), el contorno se vuelve más claro y representativo del movimiento real del harnero. Sin embargo, a menor frecuencia de muestreo, se requiere analizar un mayor número de ciclos (o un tiempo de medición más prolongado) para obtener una representación precisa de la órbita.

En las mediciones realizadas a 60 FPS, se utilizó un total de 100 ciclos del harnero, correspondientes a un tiempo de medición de aproximadamente 4 segundos, mientras que para las mediciones a 120 FPS, fueron utilizados 20 ciclos o 0.8 segundos de medición. La cantidad de ciclos necesarios dependerá, además, de otros factores, como el nivel de ruido presente en las mediciones.

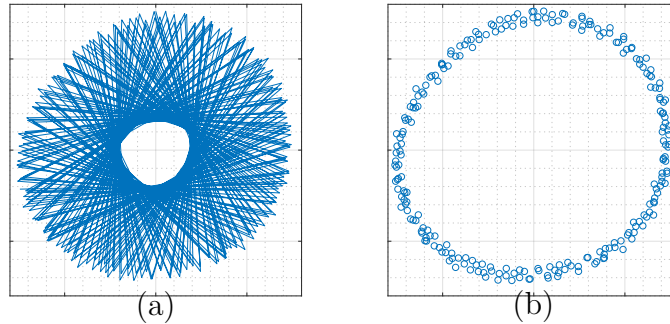


Figura 3.18 Órbita obtenida utilizando: (a) gráfico de líneas, (b): nube de puntos.

Del ensayo de partida del harnero se puede observar que la medición a través de procesamiento de imágenes fue capaz de determinar las primeras tres frecuencias naturales del harnero con un error relativo promedio entre los resultados de referencia obtenidos con acelerómetros y los obtenidos mediante procesamiento de video del 0.619 % para la primera frecuencia natural (11.32 Hz), 0.437 % para la segunda (18.38 Hz), y 2.8 % para la tercera (24.63 Hz). Además, se puede apreciar que el componente en el espectro correspondiente a la segunda frecuencia natural tiene una amplitud considerablemente mayor en el espectro vertical que en el horizontal, por lo que se puede concluir que corresponde a un modo de vibrar vertical, lo cual coincide con resultados obtenidos en trabajos anteriores [33].

De forma similar, en el ensayo de golpe se identificaron las primeras tres frecuencias naturales del harnero vibratorio con un error relativo entre los resultados del acelerómetro y los obtenidos mediante procesamiento de imágenes de 0.594 % para la primera frecuencia natural (11.78 Hz), 0.107 % para la segunda (18.69 Hz) y 2.8 % para la tercera (23.92 Hz). Se observa que las frecuencias naturales obtenidas a partir de ambos ensayos presentan ligeras diferencias, lo cual puede atribuirse a la naturaleza distinta de las pruebas. Mientras que el ensayo de golpe excita el sistema brevemente y lo deja vibrar libremente en un rango de frecuencias, el ensayo de partida utiliza la excitación del motor, que induce frecuencias específicas.

De los resultados obtenidos, es posible apreciar que el harnero trabaja dentro de una zona resonante, correspondiente a su tercera frecuencia natural, lo cual no es recomendable en el funcionamiento de ningún equipo. Además, es la razón por la cual el excitador no es utilizado con fuerza centrífuga mayor. Como trabajo futuro, se intercambiarán los resortes del harnero por unos del mismo tipo, pero con mayor longitud y menor diámetro de cable, para así bajar la rigidez del sistema y asegurar que el sistema trabaje en zona másica.

Adicionalmente, se llevó a cabo una medición del harnero sin utilizar un trípode, sujetando el celular únicamente con las manos. Dado que el movimiento del harnero consiste en un movimiento senoidal claro, cuya frecuencia es notablemente superior al movimiento típicamente asociado con las manos de una persona, es posible minimizar en gran medida el efecto de la inestabilidad

al aplicar un filtro pasa alto o pasa banda. En la Figura 3.19 se presenta la comparación de los espectros de frecuencia de las señales de desplazamiento obtenidas del círculo 1 instalado en el harnero durante su funcionamiento estacionario. La figura incluye las señales originales de la medición sin trípode, las señales filtradas con un pasa alto sobre los 15 Hz y las señales provenientes de la medición realizada con trípode.

Después de aplicar el filtro pasa alto, es posible apreciar claramente el único componente senoidal esperado del movimiento del harnero. Por lo tanto, se puede concluir que, para ciertas aplicaciones en las que se tiene un movimiento senoidal claro y no se esperan componentes de baja frecuencia, como ocurre en el caso de un harnero vibratorio, es posible obtener resultados representativos sin el uso de un trípode.

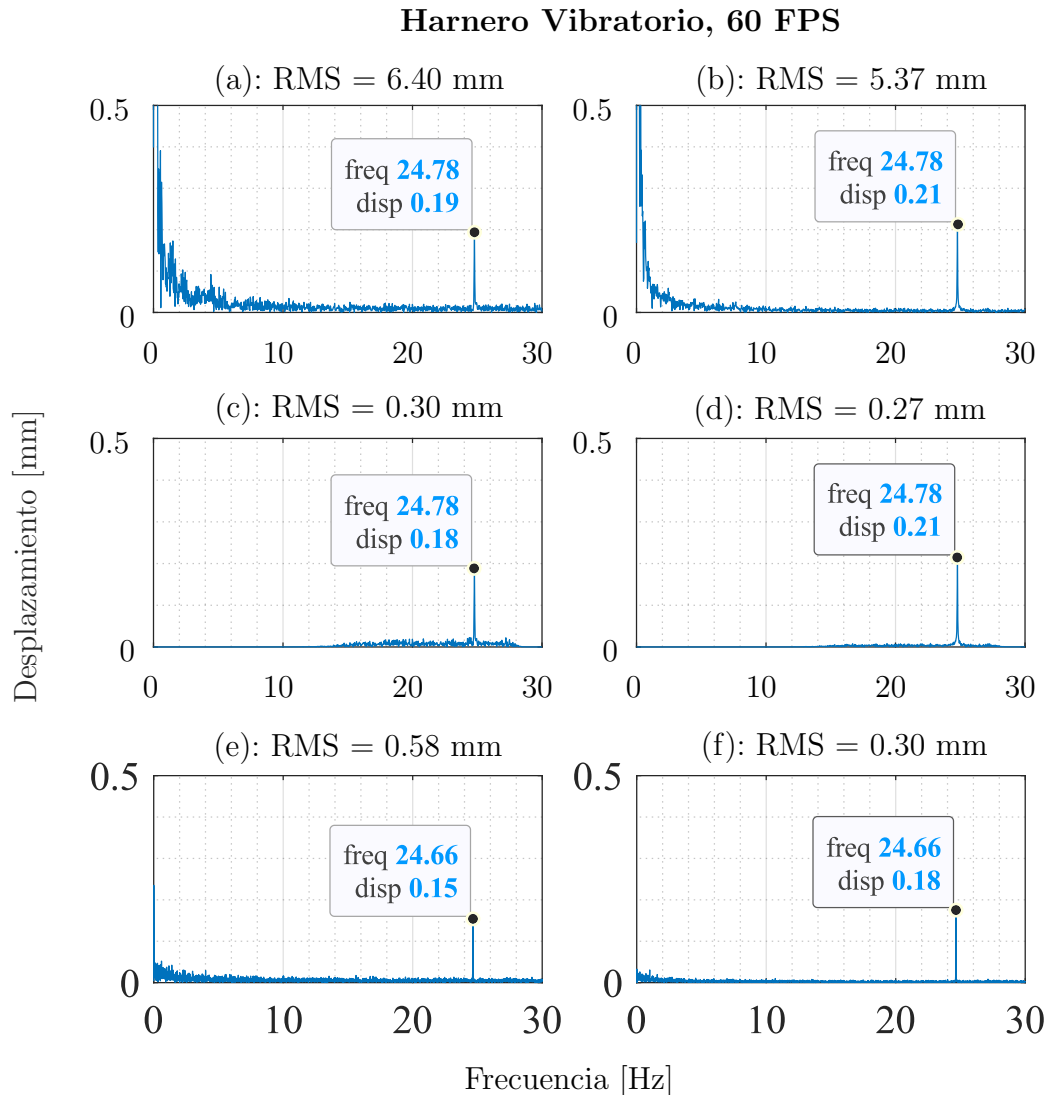


Figura 3.19 Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS círculo 1 ((a): movimiento horizontal sin trípode, (b): movimiento vertical sin trípode, (c): movimiento horizontal filtro pasa banda, (d): movimiento vertical filtro pasa banda, (e): movimiento horizontal con trípode, (f) movimiento vertical con trípode).

3.1.4. Corrección de la distorsión óptica y amplificación de movimiento

En el análisis de los videos obtenidos durante las distintas mediciones realizadas, se aplicó la corrección de la distorsión óptica con el objetivo de mejorar la precisión de los resultados obtenidos. En el caso del harnero vibratorio, al ser una estructura de mayor tamaño, no todos los puntos de medición se encuentran alejados de los bordes de las imágenes, donde la distorsión óptica es más pronunciada. Por esta razón, la corrección resulta de mayor utilidad, a diferencia del objetivo circular instalado sobre el shaker electrodinámico, el cual se encuentra en la zona central en cada fotograma.

La Figura 3.20 presenta los espectros en frecuencia del desplazamiento del círculo 1, instalado en el harnero durante su funcionamiento estacionario, obtenidos tanto con corrección óptica como sin ella.

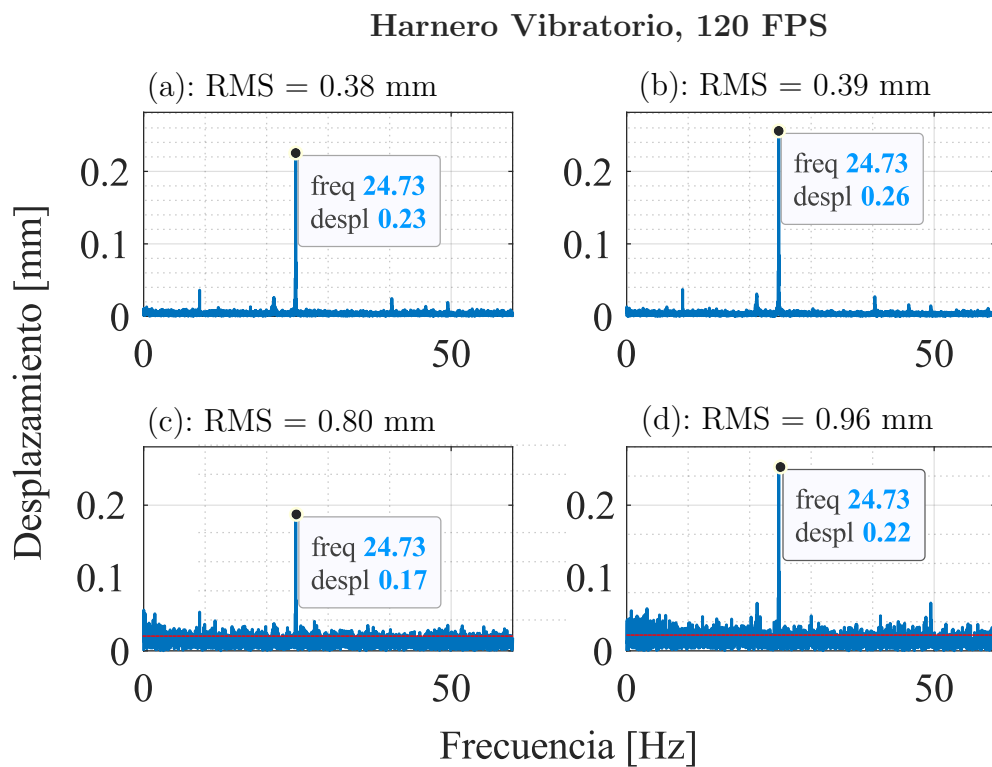


Figura 3.20 Espectros del harnero vibratorio para grabación a 120 FPS, círculo 1: (a) movimiento horizontal con distorsión corregida, (b) movimiento horizontal sin corrección, (c) movimiento vertical con distorsión corregida, (d) movimiento vertical sin corrección.

Los resultados muestran que la corrección de la distorsión óptica reduce ligeramente el nivel de ruido presente en las mediciones en el círculo 1, ubicado más cerca del centro del cuadro del video. Los espectros en frecuencia obtenidos a partir de los videos con distorsión corregida presentan un menor nivel de ruido, evidenciado tanto en el valor global RMS como en la reducción del ruido "pasto" visible.

Adicionalmente, se evaluó la implementación de técnicas de amplificación de movimiento con el objetivo de mejorar la sensibilidad del método de medición para detectar movimientos de menor amplitud. En la Figura 3.21 se presentan los resultados de desplazamiento para el shaker

electrodinámico, obtenidos tanto a partir del video original capturado a 48 FPS como del video procesado mediante amplificación de movimiento euleriana lineal con un factor de amplificación de 20. El shaker se configuró para generar un movimiento compuesto por un único componente senoidal de 100 Hz de frecuencia y una amplitud pico menor a 5 píxeles.

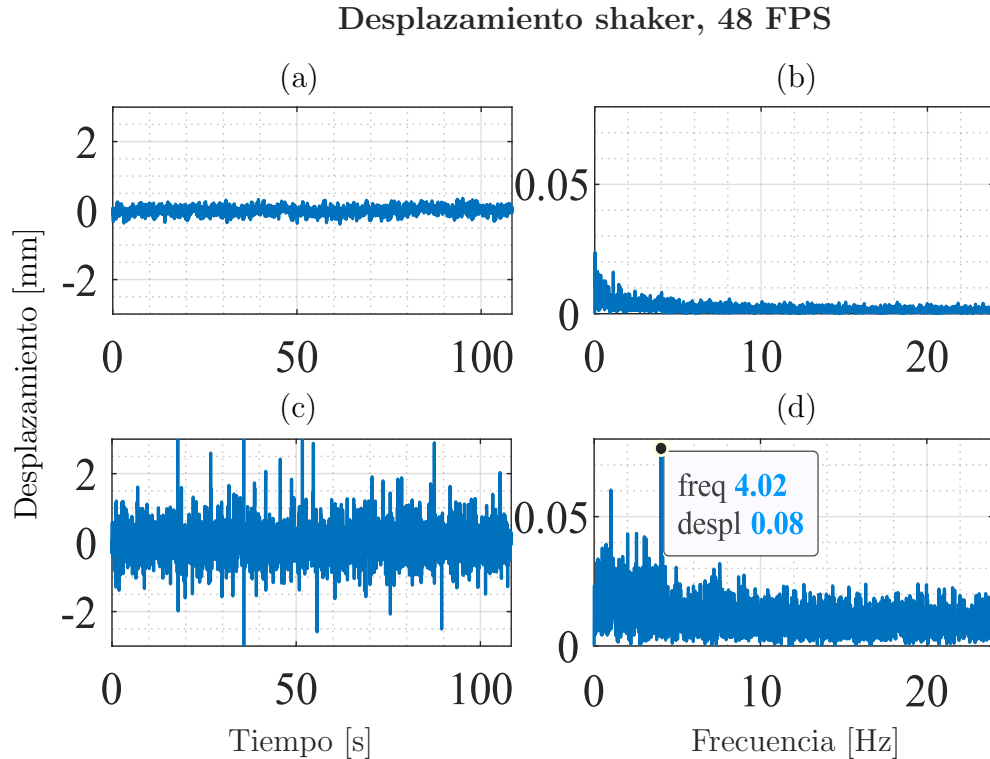


Figura 3.21 Desplazamiento shaker electrodinámico, grabación 48 FPS ((a): forma de onda video original, (b) espectro en frecuencia video original, (c): forma de onda video con movimiento amplificado, (d): espectro en frecuencia video con movimiento amplificado).

Dado que se conocen tanto la frecuencia de muestreo como la frecuencia del movimiento del shaker, es posible determinar la frecuencia percibida de este movimiento en la medición debido al fenómeno del aliasing, que en este caso es aproximadamente 4 Hz. Sin embargo, dado que la amplificación de movimiento amplifica todos los movimientos presentes en el video, incluyendo el ruido, resulta necesario implementar un filtro pasa banda para resaltar el movimiento de interés. En este caso, se utilizó un rango de frecuencias entre 2 y 8 Hz, ya que la frecuencia del movimiento es conocida.

En los resultados obtenidos a partir del video con movimiento amplificado, se identifica claramente el componente espectral correspondiente al movimiento del shaker, ubicado aproximadamente en 4 Hz. La técnica de amplificación permitió resaltar el movimiento presente en el video, lo cual se observa tanto en las formas de onda como en los espectros de frecuencia. Sin embargo, a pesar de la implementación de un filtro pasa banda durante la construcción del video amplificado, la señal resultante presenta un nivel significativo de ruido a lo largo de todo el rango de frecuencias del espectro, lo que limita la claridad y precisión de los resultados obtenidos.

Este nivel de ruido puede explicarse por el hecho de que, al amplificar el movimiento en un

video, también se amplifica el ruido presente en cada fotograma. Esto se evidencia en la Figura 3.22, que muestra un fotograma correspondiente al mismo instante de tiempo tanto en el video original como en el video con el movimiento amplificado.

Este nivel de ruido puede explicarse por el hecho de que, al amplificar el movimiento en un video, también se amplifica el ruido presente en cada fotograma. Este ruido puede tener su origen en diversas fuentes, como el ruido digital generado por el sensor de la cámara, cambios en la luminosidad, los artefactos de compresión del video o incluso pequeñas vibraciones no relacionadas con el movimiento de interés. Esto se evidencia en la Figura 3.22, que muestra un fotograma correspondiente al mismo instante de tiempo tanto en el video original como en el video con el movimiento amplificado.

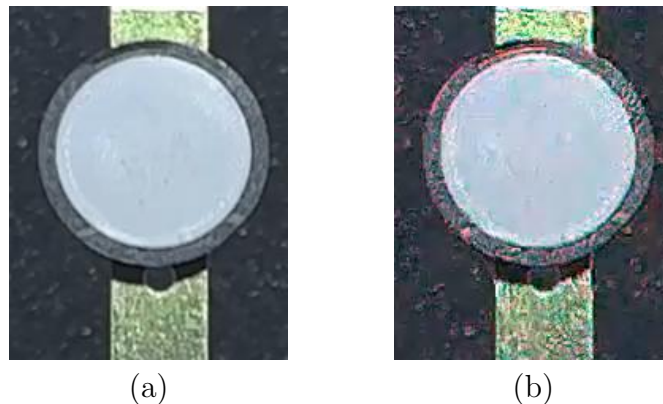


Figura 3.22 Fotograma medición shaker, 48 FPS ((a) video original, (b) video con el movimiento amplificado).

Debido a las limitaciones asociadas al nivel de ruido presente en las mediciones obtenidas mediante amplificación de movimiento, así como a la necesidad de conocer previamente el rango de frecuencias de interés para reducir dicho ruido, la implementación de esta técnica como herramienta para aumentar la sensibilidad del método de medición está condicionada por la aplicación específica y las condiciones del proceso de medición. Adicionalmente, el video generado con el movimiento amplificado puede ser utilizado como una herramienta visual complementaria para facilitar el diagnóstico en distintos equipos.

4. Conclusiones y perspectivas

4.1. Conclusiones

La cámara de un teléfono inteligente, bajo condiciones favorables de iluminación y estabilidad, se presenta como una alternativa válida a la implementación de sensores tradicionales para medir vibraciones. Su uso ofrece una herramienta de bajo costo para el análisis de vibraciones en objetos o estructuras.

Aunque este tipo de métodos de medición de vibraciones tiene la limitación de una baja frecuencia de muestreo asociada a los fotogramas por segundo de la cámara utilizada, es posible solucionar el problema del aliasing realizando múltiples mediciones sucesivas con distintas frecuencias de captura de imágenes en condiciones de movimiento estacionarias. De esta manera, se pueden identificar correctamente componentes espectrales con un error menor al 1 %, evitando así una mala interpretación de las señales.

El seguimiento de objetivos circulares se demuestra como un método preciso para la determinación del movimiento de un círculo. En la práctica, esta precisión se ve afectada tanto por la resolución del video analizado como por sus FPS. En los equipos de gama media y alta, el uso de una mayor cantidad de FPS conlleva una menor resolución de imágenes, lo que crea un compromiso entre la resolución temporal y espacial al seleccionar las características del video con el que se realizan las mediciones. Este aspecto debe ser analizado para cada aplicación.

La corrección de la distorsión óptica y la amplificación del movimiento se presentan como herramientas complementarias al seguimiento de figuras geométricas. En particular, la corrección de la distorsión resulta especialmente valiosa para reducir el nivel de ruido en puntos de medición ubicados cerca de los bordes del video, que tienden a ser los más afectados por los efectos ópticos.

Por otro lado, la amplificación del movimiento, aunque útil en ciertas aplicaciones, introduce un aumento en el nivel de ruido en todo el rango de frecuencias. Esto implica que su factibilidad de uso dependerá directamente de la naturaleza de la aplicación y de las condiciones específicas de medición.

4.2. Perspectivas

Como trabajo futuro, se plantea:

- El uso de un sensor de desplazamiento sin contacto para determinar la precisión en la medición de desplazamiento del método seleccionado en aplicaciones reales.
- El rediseño del montaje del harnero vibratorio, reemplazando los resortes actuales en función de la frecuencia natural del sistema y la deflexión de estos frente a la fuerza centrífuga del motor. Además, se modificará el método de sujeción de los resortes a la base de acero del harnero.
- El análisis de la influencia de la distorsión de perspectiva en el error relativo en la medición de vibraciones mediante técnicas de procesamiento de imágenes.

Referencias

- [1] P. Saavedra, “Análisis de vibraciones de máquinas rotatorias, nivel 1. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Mecánica..”
- [2] R. Kulichevsky, M. Sacchi, and M. Ghiselli, “Medición y análisis de vibraciones: una herramienta para la predicción y evaluación de fallas en maquinarias,” tech. rep., Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, 2024.
- [3] Cognex, *Introducción a la visión artificial: Una guía para la automatización de procesos y mejorar la calidad*. Cognex, 2012.
- [4] H. Sarmadi, A. Entezami, K.-V. Yuen, and B. Behkamal, “Review on smartphone sensing technology for structural health monitoring,” *Measurement*, vol. 223, p. 113716, Dec. 2023.
- [5] Y.-Z. Song, C. R. Bowen, A. H. Kim, A. Nassehi, J. Padget, and N. Gathercole, “Virtual visual sensors and their application in structural health monitoring,” *Structural Health Monitoring*, vol. 13, pp. 251–264, 2 2014.
- [6] globalspec, “High speed cameras selection guide: Types, features, applications — globalspec.”
- [7] C. Shannon, “Communication in the presence of noise,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, pp. 447–457, 2 1998.
- [8] T. Verwimp, A. Mauricio, and K. Gryllias, “Rotating machinery speed extraction through smartphone video acquisition from a radial viewpoint,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 205, p. 110836, 12 2023.
- [9] B. Adum, K. Halsan, P. Sidenvall, C. Ahlholm, L. Carlshem, M. Jalonen, and M. Palsson, “Measuring aeolian vibrations by video analysis,” in *MEASURING AEOLIAN VIBRATIONS BY VIDEO ANALYSIS*, 09 2021.
- [10] A. N. P, A. Singh, R. Lambora, and M. Law, “Methods to estimate subpixel level small motion from video of vibrating cutting tools,” *CIRP journal of manufacturing science and technology*, vol. 39, pp. 175–184, 11 2022.
- [11] Y. Kato and S. Watahiki, “Vibration mode identification method for structures using image correlation and compressed sensing,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 199, p. 110495, 9 2023.
- [12] P. Neri, A. Paoli, A. V. Razionale, and C. Santus, “Low-speed cameras system for 3D-DIC vibration measurements in the kHz range,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 162, p. 108040, 1 2022.
- [13] Y. Yang, C. Dorn, T. Mancini, Z. Talken, S. Nagarajaiah, G. Kenyon, C. Farrar, and D. Mascareñas, “Blind identification of full-field vibration modes of output-only structures from uniformly-sampled, possibly temporally-aliased (sub-Nyquist), video measurements,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 390, pp. 232–256, 3 2017.
- [14] P. qué sucede la distorsión en las fotografías, “Fotografía para principiantes. <https://fotografiapincipiantes.wordpress.com/>,” 2013.

- [15] S. Photography, “Photo distortion in smartphone photography,” 5 2021.
- [16] L. out for lens distortion, “Learning with experts. <https://www.learningwithexperts.com/photography/blog/look-out-for-lens-distortion>,” 2021.
- [17] T. Ni, L. Wang, X. Yin, Z. Cai, Y. Yang, D. Kong, and J. Liu, “Experimental study on measuring and tracking structural displacement based on surveillance video image analysis,” *Sensors*, vol. 24, no. 2, 2024.
- [18] A. Davies, “Smartphone vs Digital Camera: Which is better? — Amateur Photographer,” 5 2024.
- [19] F. V. G. QUILAQUEO, *USO DE VIDEO Y PROCESAMIENTO DE IMAGEN COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES*. Tesis de magister, Universidad de Concepción, C, 2023.
- [20] T. Verwimp, A. Mauricio, and K. Gryllias, “Rotating machinery speed extraction through smartphone video acquisition from a radial viewpoint,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 205, p. 110836, 2023.
- [21] T. Ni, L. Wang, X. Yin, Z. Cai, Y. Yang, D. Kong, and J. Liu, “Experimental study on measuring and tracking structural displacement based on surveillance video image analysis,” *Sensors*, vol. 24, no. 2, 2024.
- [22] MathWorks, “Computer vision.”
- [23] A. González Marcos, F. J. Martínez de Pisón Ascacíbar, A. V. Pernía Espinoza, F. Alba Elías, M. Castejón Limas, J. B. Ordieres Meré, and E. P. Vergara González, *Técnicas y Algoritmos Básicos de Visión Artificial*. Logroño: Universidad de La Rioja, 2006.
- [24] J. M. Molina, “Qué es Computer Vision.”
- [25] H. Gajjar, S. Sanyal, and M. Shah, “A comprehensive study on lane detecting autonomous car using computer vision,” *Expert Systems with Applications*, vol. 233, p. 120929, 12 2023.
- [26] Y. M. Bhavsar, M. S. Zaveri, M. S. Raval, and S. B. Zaveri, “Vision-based investigation of road traffic and violations at urban roundabout in India using UAV video: A case study,” *Transportation Engineering*, vol. 14, p. 100207, 12 2023.
- [27] C. O’Donovan, C. Giannetti, and C. Pleydell-Pearce, “Revolutionising the Sustainability of Steel Manufacturing Using Computer Vision,” *Procedia Computer Science*, vol. 232, pp. 1729–1738, 1 2024.
- [28] A. Ettalibi, A. Elouadi, and A. Mansour, “Ai and computer vision-based real-time quality control: A review of industrial applications,” *Procedia Computer Science*, vol. 231, pp. 212–220, 2024. 14th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks / 13th International Conference on Current and Future Trends of Information and Communication Technologies in Healthcare (EUSPN/ICTH 2023).
- [29] T. Pun, G. Gerig, and O. Ratib, “Image analysis and computer vision in medicine,” *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 18, no. 2, pp. 85–96, 1994. Multimedia Techniques in the Medical Environment.

- [30] A. Rodzi, Z. Zin, and N. Ibrahim, “Eye gaze detection using hough circle transform,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, pp. 14452–14459, 2017.
- [31] Y. Yang, C. Dorn, T. Mancini, Z. Talken, S. Nagarajaiah, G. Kenyon, C. Farrar, and D. Mascareñas, “Blind identification of full-field vibration modes of output-only structures from uniformly-sampled, possibly temporally-aliased (sub-Nyquist), video measurements,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 390, pp. 232–256, 12 2016.
- [32] T. A. Clarke and J. G. Fryer, “The development of camera calibration methods and models,” *The Photogrammetric Record*, vol. 16, no. 91, pp. 51–66, 1998.
- [33] P. E. B. Gallegos, *ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS SOBRE LA MALLA DE UN HARNERO VIBRATORIO DE LABORATORIO*. Memoria de título, Universidad de Concepción, C, 2024.

Anexo: Código MATLAB para Procesamiento de Video

Listing 1 Código MATLAB para procesamiento de video

```
1 app.d_mm = app.Diametroenmm.Value;
2 app.n_ptos = app.Npuntosdemedicion.Value;
3 app.F_amp = app.Factordeamplificacion.Value;
4 n_frames = app.video.NumFrames;
5 app.f_m = app.fpsvideo.Value;
6
7 C_px = zeros(n_frames, app.n_ptos, 2);
8 d_i = zeros(n_frames, app.n_ptos);
9 d_px_aprox = app.Diametroenpxaprox.Value;
10
11 min_radius = round(d_px_aprox / 2 - ((d_px_aprox / 2) * 0.1));
12 max_radius = round(d_px_aprox / 2 + ((d_px_aprox / 2) * 0.1));
13
14 first_frame = read(app.video, 1);
15 [centres, radii] = imfindcircles(first_frame, [min_radius,
16     max_radius], 'Sensitivity', 0.96, 'Method', 'TwoStage');
17
18 factor_conversion = (app.d_mm / mean(selected_radii * 2));
19 d_px1 = mean(selected_radii * 2);
20
21 for i = 1:n_frames
22     if ~isempty(centres)
23         for p = 1:app.n_ptos
24             distances = sqrt((centres(:, 1) - selected_circles(p,
25                 1)).^2 + (centres(:, 2) - selected_circles(p, 2))
26                 .^2);
27             [~, idx] = min(distances);
28             c_i = centres(idx, :);
29             d_j = radii(idx) * 2;
30             d_i(i, p) = d_j;
31             C_px(i, p, :) = c_i;
32         end
33     end
34 end
35
36 app.r = app.d_mm / d_px1;
37 app.D = ((C_ref * app.r) * -1);
```