



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Evaluación del uso de la cámara de un teléfono inteligente en la medición de vibraciones

POR

Juan Pablo Hernández Fuentes

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar
al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

Profesor guía:
Dr.-Ing. Cristián Javier Vicuña Molina.

Mayo 2026
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 evalúa el uso de la cámara de un teléfono inteligente como herramienta para la medición de vibraciones, analizando sus principales limitaciones asociadas a la frecuencia de muestreo, la distorsión óptica producida por el lente de la cámara y la precisión en la estimación de amplitudes.

Se presenta el desarrollo teórico del método de medición empleado, basado en la identificación de bordes, la detección y el seguimiento de objetivos circulares en secuencias de imágenes. La validación experimental se llevó a cabo utilizando diversos bancos de ensayo, incluyendo un shaker electrodinámico, un harnero vibratorio de laboratorio, un harnero vibratorio de la industria minera, un conjunto moto-compresor y un generador diésel.

Se evalúa la implementación de la corrección de la distorsión óptica y de la amplificación de movimiento como parte del procesamiento del video. Los resultados mostraron que la corrección de la distorsión óptica permite disminuir el nivel de ruido en los puntos de medición más afectados por los efectos ópticos, mientras que la amplificación de movimiento, debido al aumento del nivel de ruido asociado a su implementación, se presenta como una herramienta útil dependiendo de la aplicación y de las condiciones específicas de medición; además, constituye un apoyo visual complementario al análisis vibratorio.

Asimismo, se implementa una metodología para la generación de animaciones tridimensionales de estructuras, a partir de la sincronización de señales obtenidas desde distintas vistas del objeto, lo que permite una mejor visualización e interpretación del comportamiento dinámico.

Se realizaron mediciones con diferentes frecuencias de captura de fotogramas. En el caso del shaker electrodinámico, fue posible identificar correctamente la frecuencia del movimiento bajo dos configuraciones distintas, incluso en presencia de aliasing, mediante la realización de múltiples mediciones sucesivas en condiciones de movimiento estacionario, alcanzando errores inferiores al 1 %.

Las mediciones realizadas sobre el harnero vibratorio en operación fueron comparadas con mediciones de referencia obtenidas mediante acelerómetros, obteniéndose un error promedio máximo del 4.14 % en amplitud y del 0.162 % en frecuencia. Asimismo, se analizó la influencia conjunta de la frecuencia de muestreo y la resolución espacial del video en la precisión de los resultados.

Adicionalmente, se determinan las tres primeras frecuencias naturales del sistema mediante ensayos de partida y de golpe, considerando dos configuraciones distintas de resortes, con un error máximo en frecuencia del 2.8 %. También se obtuvieron las órbitas de vibración del harnero en distintos puntos del equipo y bajo diferentes configuraciones de FPS.

Finalmente, se realizaron mediciones sobre un harnero vibratorio industrial durante su operación, obteniendo un error variable entre 1.5 % y 15.4 % en la estimación del stroke de las órbitas, y entre 1.2 % y 13.1 % en el ángulo de la órbita.

Tabla de contenido

| | Página |
|--|-----------|
| Índice de figuras | vii |
| Índice de Tablas | xi |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Contexto | 1 |
| 1.2. Estado del arte | 4 |
| 1.3. Hipótesis | 5 |
| 1.4. Objetivos | 5 |
| 1.4.1. Objetivo general | 6 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 6 |
| 1.5. Metodología | 6 |
| 1.6. Plan de trabajo | 8 |
| 2. Metodología | 9 |
| 2.1. Marco teórico | 9 |
| 2.1.1. Análisis de vibraciones | 9 |
| 2.1.2. Visión artificial | 10 |
| 2.2. Procesamiento de imágenes | 11 |
| 2.2.1. Entorno de Implementación: Plataforma MATLAB-MathWorks | 11 |
| 2.2.2. Detección de bordes en imágenes digitales | 11 |
| 2.2.3. Detección de figuras geométricas en imágenes digitales | 13 |
| 2.2.4. Amplificación de movimiento | 14 |
| 2.2.5. Aliasing en registros vibratorios obtenidos con un smartphone | 16 |
| 2.2.6. Distorsión en imágenes digitales | 18 |
| 2.3. Medición de vibraciones | 20 |
| 2.3.1. Construcción código de medición | 20 |
| 2.3.2. Construcción de la aplicación para animación del movimiento en 3D | 22 |
| 2.3.3. Diseño de marcadores circulares | 23 |
| 2.3.4. Software y hardware | 24 |
| 2.3.5. Iluminación | 24 |
| 2.3.6. Estabilidad | 25 |
| 2.4. Comprobación del correcto funcionamiento del código | 26 |
| 3. Ensayos experimentales | 29 |
| 3.1. Descripción de los bancos de ensayos | 29 |
| 3.2. Descripción de los ensayos a realizar | 30 |
| 3.3. Comprobación del correcto funcionamiento del código | 31 |
| 3.4. Pruebas en harnero vibratorio de laboratorio | 35 |
| 3.4.1. Corrección de distorsión óptica | 36 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4.2. | Uso de estabilizador | 37 |
| 3.4.3. | Composición 3D del movimiento | 39 |
| 3.4.4. | Set de mediciones experimentales en la configuración original de resortes | 40 |
| 3.4.5. | Set de mediciones experimentales nueva configuración de resortes . | 46 |
| 3.5. | Pruebas en banco de ensayos Viga-resorte | 51 |
| 3.6. | Pruebas con shaker electrodinámico | 53 |
| 3.6.1. | Aliasing en mediciones tomadas con smartphone | 53 |
| 3.6.2. | Amplificación de movimiento | 57 |
| 3.7. | Pruebas en conjunto moto-compresor | 59 |
| 3.8. | Pruebas en Generador diésel | 61 |
| 3.9. | Pruebas en harnero vibratorio minero | 62 |
| 4. | Conclusiones y perspectivas | 67 |
| 4.1. | Conclusiones | 67 |
| 4.2. | Perspectivas | 68 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Carta Gantt planificación proyecto | 8 |
| 2.1. | Esquema forma de onda senoidal simple. | 9 |
| 2.2. | Esquema transformada circular de Hough | 14 |
| 2.3. | Representación de una señal con aliasing. | 17 |
| 2.4. | Representación del aliasing papel plegado. | 18 |
| 2.5. | Esquema funcionamiento del método propuesto. | 18 |
| 2.6. | Tipos de distorsión óptica. | 19 |
| 2.7. | Esquema corrección de distorsión óptica. | 20 |
| 2.8. | Esquema algoritmo de medición. | 21 |
| 2.9. | Interfaz del programa para la generación de animaciones tridimensionales del harnero vibratorio. | 23 |
| 2.10. | Diseño objetivos circulares. | 24 |
| 2.11. | Segundo diseño objetivos circulares. | 24 |
| 2.12. | Comprobación identificación de objetivos. | 26 |
| 2.13. | 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). | 28 |
| 3.1. | Bancos de ensayos: (a) Harnero vibratorio de laboratorio, (b) Conjunto Viga-Resorte, (c) Shaker electrodinámico, (d) Conjunto moto-compresor, (e) Generador diésel, (f) Harnero industrial. | 29 |
| 3.2. | Comprobación identificación de objetivos. | 32 |
| 3.3. | 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). | 34 |
| 3.4. | Vistas montaje ensayos harnero vibratorio: (a) Vista 1, (b) Vista 2, (c) Vista 3, (d) Vista 4. | 35 |
| 3.5. | Espectros del harnero vibratorio para grabación a 120 FPS, círculo 1L (a) Movimiento horizontal con distorsión corregida, (b) Movimiento horizontal sin corrección, (c) Movimiento vertical con distorsión corregida, (d) Movimiento vertical sin corrección. | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.6. | Espectros en frecuencia del segundo modo de vibrar del harnero vibratorio, grabación a 60 FPS con objetivo L1 (a) Movimiento horizontal con estabilizador, (b) Movimiento horizontal a mano, (c) Movimiento vertical con estabilizador, (d) Movimiento vertical a mano. | 37 |
| 3.7. | Espectros en frecuencia correspondientes al segundo modo de vibrar del harnero vibratorio, grabación a 60 FPS con objetivo L1. ((a) Movimiento vertical a mano, (b) Movimiento vertical con estabilizador, (c) Movimiento vertical con trípode, (d) Movimiento vertical con trípode y estabilizador. | 38 |
| 3.8. | Muestra animación tridimensional Harnero vibratorio. | 39 |
| 3.9. | Espectros ensayo de partida harnero, grabación a 60 FPS apoyos (a) Movimiento dirección horizontal 3L. (b) Movimiento dirección vertical 3L. (c) Acelerómetro horizontal en 3L. (d) Acelerómetro vertical en 3L. | 41 |
| 3.10. | Espectros ensayo de golpe vertical harnero, grabación a 60 FPS apoyo A (a) Acelerómetro vertical en 3L. (b): Movimiento dirección vertical círculo 3L. | 42 |
| 3.11. | Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo A (a) Movimiento dirección horizontal en 3L. (b) Movimiento dirección vertical en 3L. (c) Acelerómetro horizontal en 3L. (d) Acelerómetro vertical en 3L. | 42 |
| 3.12. | Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo B (a) Movimiento dirección horizontal 4L. (b) Movimiento dirección vertical 4L. (c) Acelerómetro horizontal en 4L. (d) Acelerómetro vertical en 4L. | 43 |
| 3.13. | Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo A (a) Movimiento dirección horizontal 3L, (b) Movimiento dirección vertical 3L, (c) Acelerómetro horizontal en 3L, (d) Acelerómetro vertical en 3L. | 43 |
| 3.14. | Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo B (a) Movimiento dirección horizontal 4L. (b) Movimiento dirección vertical 4L. (c) Acelerómetro horizontal en 4L, (d) Acelerómetro vertical en 4L. | 44 |
| 3.15. | Muestra animación tridimensional segundo modo Harnero vibratorio. | 45 |
| 3.16. | Comparación instalación harnero vibratorio. | 46 |
| 3.17. | Espectros de velocidad harnero vibratorio ensayo de parada, grabación 60 FPS (a): Movimiento dirección horizontal 3L, (b): Movimiento dirección vertical 3L, (c): Acelerómetro horizontal 3L, (d): Acelerómetro vertical 3L. | 47 |
| 3.18. | Muestra animación tridimensional nuevo segundo modo Harnero vibratorio. | 48 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.19. | Espectros de velocidad harnero vibratorio dirección horizontal 3L (a): Grabación 960 FPS, (b): Grabación 60 FPS, (c): Grabación 120 FPS, (d): Medición acelerómetro. | 49 |
| 3.20. | Espectros de velocidad harnero vibratorio dirección vertical 3L (a): Grabación 960 FPS, (b): Grabación 60 FPS, (c): Grabación 120 FPS, (d): Medición acelerómetro. | 49 |
| 3.21. | Configuración experimental y ubicación de los objetivos sobre la viga. | 51 |
| 3.22. | 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. | 53 |
| 3.23. | Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 1 (a): Medición 48 FPS. (b): Medición 60 FPS. (c): Componentes espectrales identificados. (d): Medición referencia acelerómetro 2048 FPS. | 54 |
| 3.24. | Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 (a): Medición a 60 FPS. (b) Medición 48 FPS. (c): Medición 55 FPS. | 56 |
| 3.25. | Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 (a): Medición de referencia acelerómetro 2048 FPS. (b) Componente espectral con aliasing corregido. | 56 |
| 3.26. | 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. | 57 |
| 3.27. | Fotograma medición shaker, 48 FPS (a) video original, (b) video con el movimiento amplificado. | 58 |
| 3.28. | Puntos de medición en el conjunto moto–compresor. | 59 |
| 3.29. | Espectros de velocidad en la dirección horizontal objetivo 3 con presión de estanque variable (a) 4 bar. (b) 6 bar. (c) 8 bar. (d) 10 bar. | 59 |
| 3.30. | Espectros de velocidad en la dirección vertical objetivo 1 con presión de estanque variable (a) 4 bar. (b) 6 bar. (c) 8 bar. (d) 10 bar. | 60 |
| 3.31. | Puntos de medición en generador diésel. | 61 |
| 3.32. | Espectros de velocidad video horizontal objetivo 2 (a) Sin carga. (b) Ventilador conectado. (c) Dos ventiladores conectados. | 61 |
| 3.33. | Espectros de velocidad acelerómetro horizontal objetivo 2 (a) Sin carga. (b) Ventilador conectado. (c) Dos ventiladores conectados. | 62 |
| 3.34. | Puntos de medición Harnero Minero (a) Alimentación Izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga Izquierda. (d) Descarga Derecha. | 63 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.35. | Espectros de Desplazamiento harnero industrial dirección horizontal (a) Alimentación izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga izquierda. (d) Descarga derecha. | 64 |
| 3.36. | Espectros de Desplazamiento harnero industrial dirección vertical (a) Alimentación izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga izquierda. (d) Descarga derecha. | 65 |
| 3.37. | Órbitas de Desplazamiento harnero industrial (a) Alimentación izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga izquierda. (d) Descarga derecha. | 65 |

Índice de Tablas

| | | |
|------|---|----|
| 2.1. | Coefficientes de calibración para la corrección de la distorsión óptica iPhone 14. | 22 |
| 2.2. | Comparación de resultados obtenidos mediante video y señal generada . | 27 |
| 3.1. | Equipos utilizados en los bancos de ensayos | 30 |
| 3.2. | Resumen de los ensayos experimentales realizados | 31 |
| 3.3. | Comparación de resultados obtenidos mediante video y señal generada . | 32 |
| 3.4. | Comparación de resultados obtenidos mediante video y acelerómetros . | 40 |
| 3.5. | Comparación características resortes utilizados | 46 |
| 3.6. | Comparación de frecuencias naturales con las distintas configuraciones de resortes. | 48 |
| 3.7. | Comparación de resultados obtenidos mediante video y acelerómetros . | 50 |
| 3.8. | Comparación Experimental de Parámetros Operativos | 64 |

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Contexto

En el ámbito industrial, el mantenimiento es una actividad esencial a la hora de mantener el óptimo 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 lo más eficientes y efectivos 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 e indicadores que la máquina manifiesta 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 con el objetivo de preservar la operatividad del equipo y la seguridad de sus usuarios, reduciendo así el tiempo de inactividad y mantenimiento. Esta práctica es especialmente relevante en equipos críticos, ya que un menor tiempo de inactividad se traduce en una menor pérdida de producción.

Esta estrategia se basa principalmente en el análisis y monitoreo de vibraciones, así como en el análisis de otras magnitudes complementarias como el análisis de aceite, 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 sus vibraciones. Se estima que cerca del 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 especializados para medir vibraciones en equipos de distintas características.

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 comprende las aplicaciones que combinan hardware y software para realizar diversas funciones a través de 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 ni necesidad de estructuras externas invasivas adicionales. Además, la visión artificial permite medir vibraciones en múltiples puntos del equipo y en diferentes direcciones simultáneamente con un solo video.

En contraste, un acelerómetro convencional como los comúnmente utilizados en la industria 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 se debe 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 en 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 cuando se les compara con cámaras industriales o sensores de vibraciones tradicionales. En primer lugar, la cantidad máxima de FPS que un smartphone puede capturar es relativamente baja, usualmente en el rango de 60, 120 o 240 FPS reales, dependiendo del modo de grabación y de la gama del dispositivo utilizado.

Esta limitación se debe a una combinación de factores inherentes al diseño de los smartphones, 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. Si bien algunos smartphones de gama alta disponibles en el mercado ofrecen tasas de FPS más altas, como 480 o incluso 960 FPS, estos valores suelen obtenerse mediante interpolación de imágenes, por lo que no representan valores reales ni representativos 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 determinada 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], lo que provoca una representación incorrecta del movimiento de la estructura analizada. En consecuencia, los componentes vibratorios de alta frecuencia se muestran a frecuencias inferiores a las reales, lo que puede conducir a errores de interpretación y diagnósticos erróneos.

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 diferentes escenarios [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 distorsiona 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 al menor tamaño de su sensor y lentes [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 abordado el tema de la corrección de la distorsión producida por el lente en cámaras industriales [17], no existen estudios que apliquen este procedimiento a videos capturados con cámaras de smartphones para medir vibraciones mediante procesamiento de imágenes, ni que evalúen el impacto de la distorsión óptica en la precisión de las mediciones obtenidas con estos dispositivos.

Otra limitación del uso 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 implica una menor precisión y capacidad para detectar pequeños desplazamientos [18]. Generalmente, esta limitación es más importante cuando se capturan videos con una mayor cantidad de FPS, ya que la mayoría de teléfonos sacrifican resolución de imagen a cambio de una mayor frecuencia de muestreo cuando se utiliza el modo de cámara lenta.

En base a lo anterior, en este proyecto de investigación se propone desarrollar e implementar un software en MATLAB, utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y señales. El objetivo es obtener registros vibratorios a partir de videos de smartphones con un error absoluto menor al 6% en amplitud y 1% en frecuencia en comparación con las mediciones obtenidas con un acelerómetro piezoeléctrico industrial convencional. Para lograrlo, el método implementado aborda el problema del aliasing, corrige la distorsión óptica inherente a las cámaras de smartphones y emplea técnicas de amplificación de movimiento para aumentar la precisión y sensibilidad de las mediciones. Se busca así superar las restricciones de los dispositivos móviles y posibilitar la medición precisa de vibraciones en un amplio rango de frecuencias y amplitudes.

1.2. Estado del arte

A continuación se presenta 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 y videos.

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

En este trabajo, el autor desarrolla un programa en 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:

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

Finalmente se concluye 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 d y del ángulo θ 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 pico de velocidad comparado con un acelerómetro industrial convencional bajo condiciones controladas para movimientos superiores a cinco píxeles en un rango de frecuencias entre 0 y 100 Hz.

1.4. Objetivos

A partir de lo mostrado anteriormente, se plantean los siguientes objetivos para este trabajo.

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 la eliminación del aliasing en las señales vibratorias obtenidas mediante el procesamiento de videos capturados con un smartphone.
- OE3: Implementar la corrección de la distorsión provocada por el lente de la cámara en los videos capturados con un smartphone.
- OE4: Implementar un algoritmo que permita amplificar pequeños desplazamientos en registros vibratorios.
- OE5: 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 tomadas con videos a diferente frecuencia de muestreo, de identificar a través de otro procesamiento, los componentes espectrales producidos por el aliasing y determinar su frecuencia 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 un conjunto de fotos de un patrón de calibración tomadas con esta. Debe corregir la distorsión 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 utilizar técnicas de amplificación de movimiento eulerianas, las cuales implican descomponer un video en bandas espaciales y amplificar el movimiento presente en él por un factor determinado, generando un nuevo video con movimiento visiblemente amplificado.

OE5: 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 electrodinámico, 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. Adicionalmente, se utilizará un harnero vibratorio de laboratorio.

1.6. Plan de trabajo

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

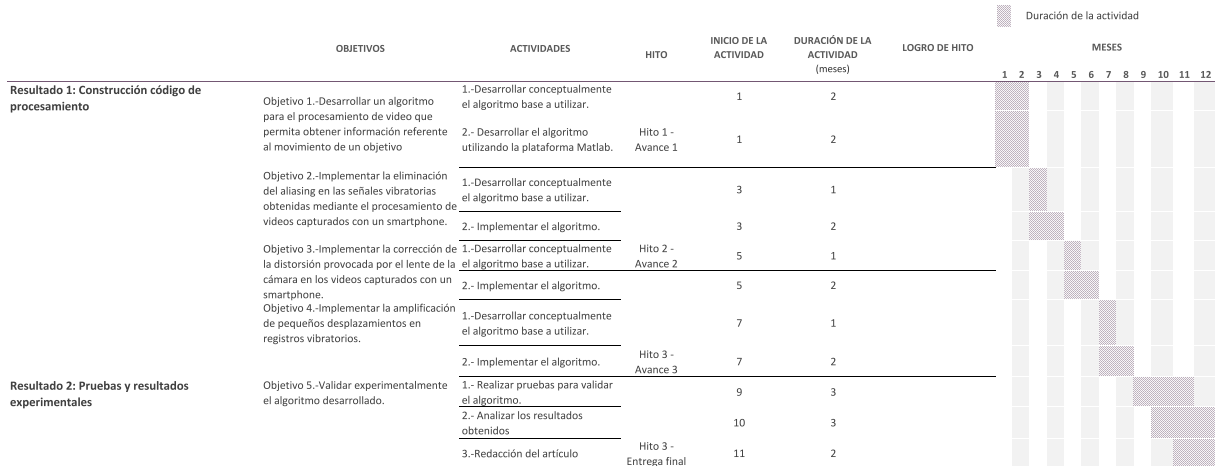


Figura 1.1 Carta Gantt planificación proyecto

CAPÍTULO 2

Metodología

2.1. Marco teórico

2.1.1. Análisis de vibraciones

En términos simples, la vibración puede ser considerada como el movimiento de una máquina, estructura, o uno de sus componentes, alrededor de su posición de reposo (o de equilibrio) [1]. Dependiendo del enfoque y tipo de análisis, esta puede expresarse en términos de desplazamiento vibratorio, velocidad vibratoria y aceleración vibratoria.

El registro gráfico de la vibración en función del tiempo se denomina forma de onda de la vibración. La forma de onda más elemental es la de un armónico simple, cuya representación matemática es:

$$x(t) = A_0 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2.1)$$

Donde A_0 representa la amplitud (magnitud máxima del movimiento), f a la frecuencia en Hertz (ciclos por segundo) y ϕ a la fase inicial [1]. Un esquema de esta forma de onda se presenta en la Figura 2.1.

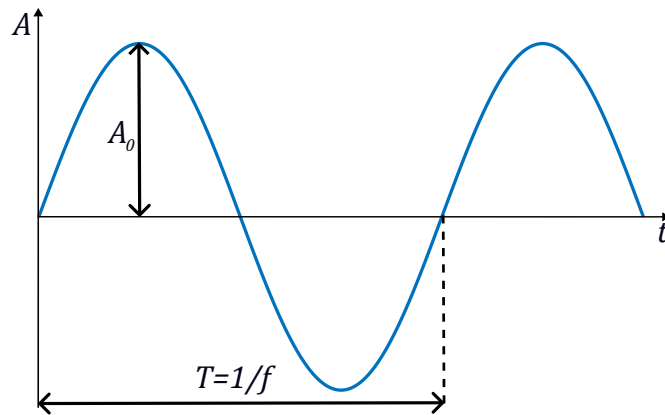


Figura 2.1 Esquema forma de onda senoidal simple.

El análisis de vibraciones es una herramienta ampliamente utilizada en la mayoría de las estrategias de mantenimiento predictivo. Esto se debe a que, al monitorear los movimientos que ocurren en una máquina, es posible inferir las características de las diversas fuerzas dinámicas que actúan 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 Rápida de Fourier (FFT), y

posteriormente asociar las amplitudes y frecuencias de dichos componentes con las fuerzas dinámicas que actúan sobre la máquina [1].

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

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

Además de diagnosticar una máquina, el análisis de vibraciones es utilizado para cuantificar la severidad de las vibraciones en un equipo a través de estándares internacionales como las normas ISO 10816-3 e ISO 2372, dependiendo de las características del equipo analizado. Estas normas establecen límites de vibración admisibles para diferentes clases de maquinaria industrial, permitiendo determinar si los niveles vibratorios son perjudiciales para la máquina.

Adicionalmente, otras herramientas que se utilizan para monitorear 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 general de la máquina antes del análisis espectral.

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]. El objetivo de esta disciplina es 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 físicas 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 llamados píxeles, cada uno con una ubicación e intensidad específicas. La intensidad de un píxel indica su nivel de brillo. Para simplificar y optimizar el procesamiento computacional, es

común trabajar con imágenes en escala de grises, donde la intensidad de cada píxel varía típicamente entre 0 (negro) y 255 (blanco) [24].

Dado que todas las operaciones en visión artificial se basan en algoritmos matemáticos, su desarrollo e implementación se realizan con herramientas de software especializadas como Python (con librerías como OpenCV y PyTorch), MATLAB, Simulink [24] u otras.

La visión artificial posee un amplio rango de aplicaciones en diversas industrias, que incluyen, entre otras:

- **Control de accesos de seguridad privada:** La visión artificial 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 artificial 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 artificial 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. Entorno de Implementación: Plataforma MATLAB-MathWorks

Para la implementación de los algoritmos de procesamiento de imágenes y visión artificial requeridos en esta investigación, se seleccionó el entorno de desarrollo MATLAB. Esta plataforma 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 (px) 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:

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

$$G_y(x, y) = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \quad (2.3)$$

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

$$|\nabla I(x, y)| = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (2.4)$$

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:

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)}\right) \quad (2.5)$$

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 :

$$S_x^S = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; S_y^S = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

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

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

$$G_y(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 S_y^S(i, j) \cdot I(x + i, y + j) \quad (2.8)$$

Finalmente, los puntos de la imagen que corresponden a bordes se identifican como los máximos locales en la magnitud del gradiente $|\nabla I(x, y)|$. Estos puntos indican dónde ocurren los cambios más abruptos de intensidad, mientras que la dirección de dichos 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 determinar 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:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (2.9)$$

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 las 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

$$(x, y)$$

identificado como un borde, la Ec. 2.9 define un círculo de posibles centros

$$(a, b)$$

en un espacio de parámetros (conocido como espacio acumulador). Cada punto en este círculo de posibles centros recibe un “voto”. Al repetir este proceso para todos los píxeles de borde, los puntos en el espacio acumulador que reciben más votos corresponden a la intersección de múltiples de estos círculos, indicando así la ubicación más probable del centro del círculo en la imagen original. 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 como 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. En la Figura 2.2(A) los puntos azules representan los píxeles de borde identificados en una imagen. En la Figura 2.2(B) los guiones negros representan votos de posibles centros obtenidos a partir de los bordes identificados en (A) y el punto rojo representa el píxel donde interceptan la mayor cantidad de posibles centros, es decir, el centro del círculo.

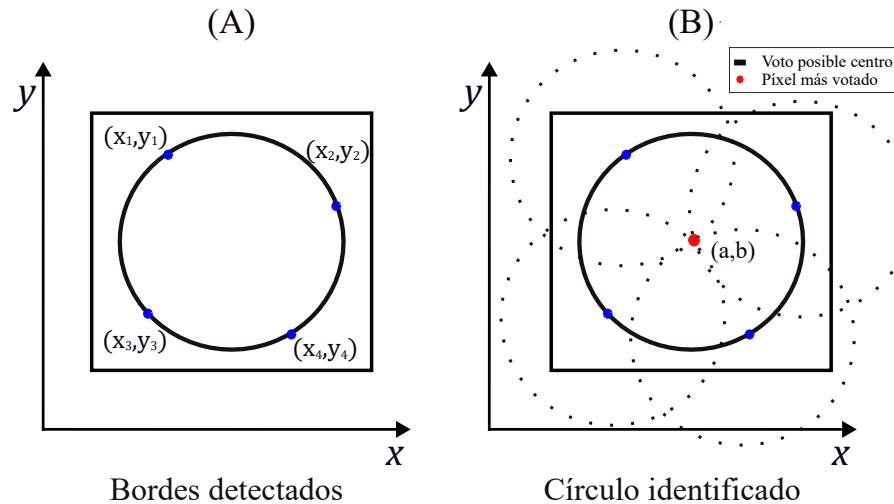


Figura 2.2 Esquema transformada circular de Hough

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 a simple vista.

Existen principalmente dos familias de algoritmos para esta tarea. La primera corresponde a los métodos lineales, que operan sobre la intensidad de los píxeles a lo largo del tiempo. La segunda abarca los métodos no lineales, que se fundamentan en el análisis de la fase de la señal de video para inferir el movimiento.

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:

$$I(x, t) = f(x + \delta(t)) \quad (2.10)$$

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:

$$\hat{I}(x, t) = f(x + (1 + \alpha)\delta(t)) \quad (2.11)$$

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:

$$I(x, t) \approx f(x) + \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (2.12)$$

Aplicando un filtro pasa banda en el dominio temporal a la señal de intensidad $I(x, t)$, considerando cada posición espacial x de manera independiente, se obtiene una señal resultante $B(x, t)$. Este filtrado temporal permite aislar las componentes de frecuencia asociadas al movimiento de interés, eliminando variaciones de muy baja frecuencia, como cambios de iluminación, y componentes de alta frecuencia dominadas por ruido. Bajo estas condiciones, la señal filtrada puede aproximarse como:

$$B(x, t) = \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (2.13)$$

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

$$\tilde{I}(x, t) = I(x, t) + \alpha B(x, t) \quad (2.14)$$

Finalmente, combinando las ecuaciones, se llega a:

$$\tilde{I}(x, t) \approx f(x) + (1 + \alpha) \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (2.15)$$

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:

$$B(x, t) = \sum_k \gamma_k \delta_k(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (2.16)$$

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

$$\tilde{I}(x, t) \approx f(x + \sum_k (1 + \alpha\gamma_k)\delta_k(t)) \quad (2.17)$$

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:

$$f(x + \delta(t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))} \quad (2.18)$$

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

$$S_{\omega}(x, t) = A_{\omega} e^{i\omega(x+\delta(t))} \quad (2.19)$$

Como $S_{\omega}(x, t)$ es una señal senoidal, su fase $\omega(x + \delta(t))$ contiene la información asociada al movimiento. De manera análoga al teorema del desplazamiento de Fourier, el desplazamiento espacial puede ser representado como una variación temporal de la fase. En este contexto, el filtrado se aplica sobre la fase de la señal compleja $S_{\omega}(x, t)$ en el dominio temporal, para un rango determinado de frecuencias, con el objetivo de aislar las variaciones de fase asociadas al movimiento de interés y atenuar contribuciones no deseadas. Como resultado de este proceso, se obtiene la señal filtrada:

$$B_{\omega}(t) = \omega\delta(t) \quad (2.20)$$

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

$$\hat{s}_{\omega}(x, t) = A_{\omega} e^{i\omega(x+(1+\alpha)\delta(t))} \quad (2.21)$$

2.2.5. Aliasing en registros vibratorios obtenidos con un smartphone

El aliasing es un fenómeno que ocurre durante el procesamiento y la adquisición de datos y señales. 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. Esto sucede cuando no se cumple con el criterio de Nyquist, es decir, cuando

la señal original contiene componentes de frecuencia superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo, lo que provoca distorsiones en la señal medida, tal como se ejemplifica en la Figura 2.3. Como consecuencia, los componentes periódicos de alta frecuencia en la señal aparecen de forma errónea en el espectro a frecuencias más bajas, dificultando la correcta interpretación de los datos. En el caso de las señales obtenidas mediante acelerómetros convencionales, las señales analógicas pasan previamente por un filtro antialiasing, el cual elimina las componentes de frecuencia que no satisfacen el criterio establecido por el teorema de Nyquist, antes de realizar la conversión análoga-digital.

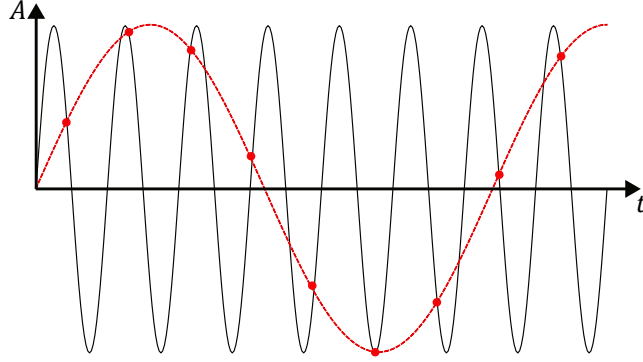


Figura 2.3 Representación de una señal con aliasing.

Una de las principales limitaciones del uso de la cámara de un smartphone como herramienta de medición de vibraciones es su frecuencia de muestreo, la cual está determinada por la tasa de fotogramas por segundo (FPS) a los que pueden capturar videos estos equipos. Esta limitación de hardware vuelve las mediciones propensas a sufrir el fenómeno de aliasing.

Para abordar esta limitación, se adoptó 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 no es lo suficientemente alta.

El método consiste en utilizar múltiples mediciones con diferentes frecuencias de muestreo no correlacionadas, es decir, que tengan una relación irracional entre sí, para así obtener conjuntos de datos independientes. Conociendo cómo se comporta el espectro en frecuencia resultante de una señal con aliasing para las distintas frecuencias de muestreo, es posible determinar las posibles frecuencias reales de cada componente espectral medido. Para cada medición, las posibles frecuencias reales f_M se calculan a partir del número de pliegues m , la frecuencia de muestreo f_s y la frecuencia medida \hat{f} , según:

$$f_{M,1} = \begin{cases} m_1^+ f_{s,1} + \hat{f}_1 \\ (m_1^- + 1) f_{s,1} - \hat{f}_1 \end{cases} \quad \forall m_1 \in \mathbb{Z} \quad (2.22)$$

$$f_{M,2} = \begin{cases} m_2^+ f_{s,2} + \hat{f}_2 \\ (m_2^- + 1) f_{s,2} - \hat{f}_2 \end{cases} \quad \forall m_2 \in \mathbb{Z}$$

La verdadera frecuencia de cada componente será aquella que sea común a todas las series de soluciones generales f_M ; por tanto, la solución final es la intersección de estos conjuntos: $\{f_{M,1}\} \cap \{f_{M,2}\} \cap \dots \cap \{f_{M,n}\}$. Mientras mayor sea el número de mediciones con FPS distintas utilizadas, mayor es la probabilidad de que las frecuencias identificadas sean las frecuencias reales de la señal. En la Figura 2.5 se muestra un esquema general de este método.

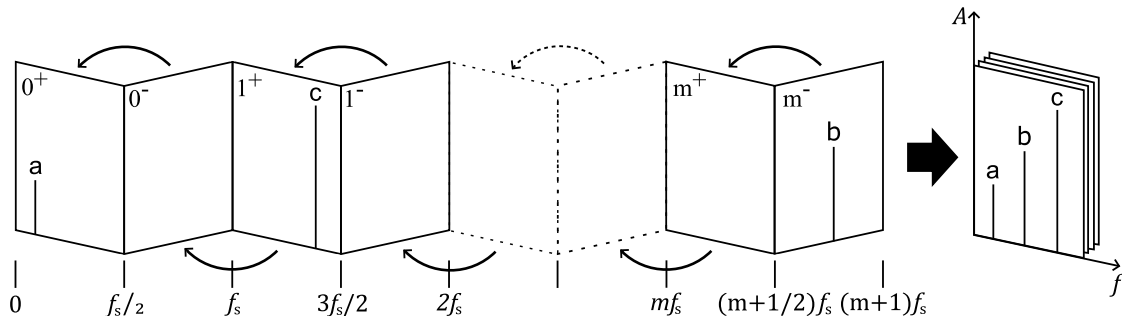


Figura 2.4 Representación del aliasing papel plegado.

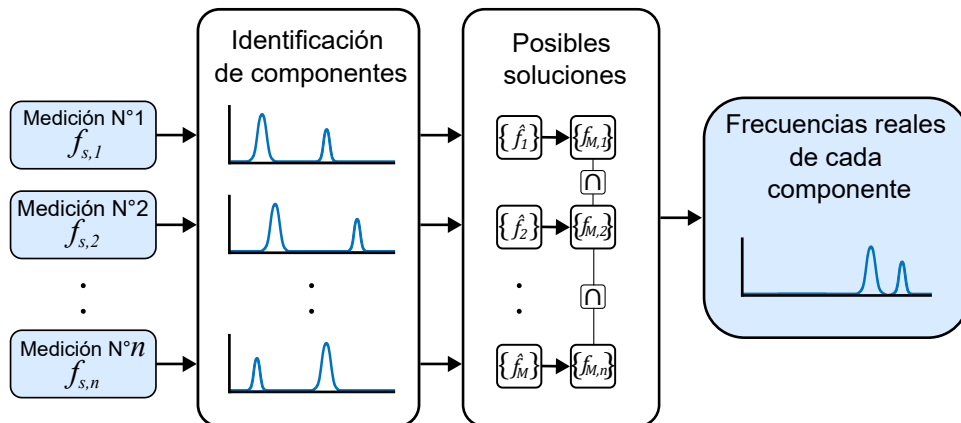


Figura 2.5 Esquema funcionamiento del método propuesto.

2.2.6. Distorsión en imágenes digitales

Al utilizar la visión artificial como herramienta, es fundamental que las imágenes representen correctamente la forma y proporciones de las estructuras analizadas en su totalidad. Por ello, la corrección de las alteraciones geométricas introducidas por el sistema óptico es un paso indispensable para aumentar la precisión de los resultados, especialmente en métodos basados en la detección y seguimiento de figuras geométricas.

La distorsión óptica es una alteración geométrica que deforma las imágenes debido a las características físicas de la lente. Su efecto principal es que las líneas rectas en la escena real aparecen curvadas en la imagen digital. Los tipos más comunes son la distorsión radial, que provoca que las líneas se curven, manifestándose como distorsión de barril cuando se

curvan hacia afuera, o como distorsión de almohada cuando se curvan hacia adentro, y la distorsión tangencial, causada por un montaje imperfecto de la lente respecto al sensor. La Figura 2.6 ilustra estos efectos.

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

$$x_0 = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2\lambda_1xy + \lambda_2(r^2 + 2x^2) \quad (2.23)$$

$$y_0 = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + \lambda_1(r^2 + 2y^2) + 2\lambda_2xy \quad (2.24)$$

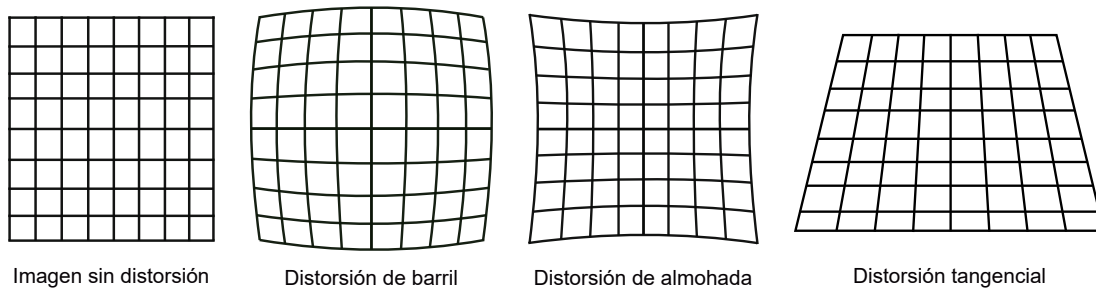


Figura 2.6 Tipos de distorsión óptica.

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 de distorsión específicos (k_i, λ_i) 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 consiste en capturar múltiples imágenes del patrón de calibración desde distintos ángulos y distancias. A partir de estas imágenes, se detectan las esquinas del tablero, 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 estiman los coeficientes de distorsión

que minimizan el error de reproyección, usualmente mediante un método de optimización de mínimos cuadrados no lineales (ver junto a ejemplo en Anexo B). En la Figura 2.7 se muestra un esquema del proceso de calibración y de la corrección de la distorsión óptica en imágenes.

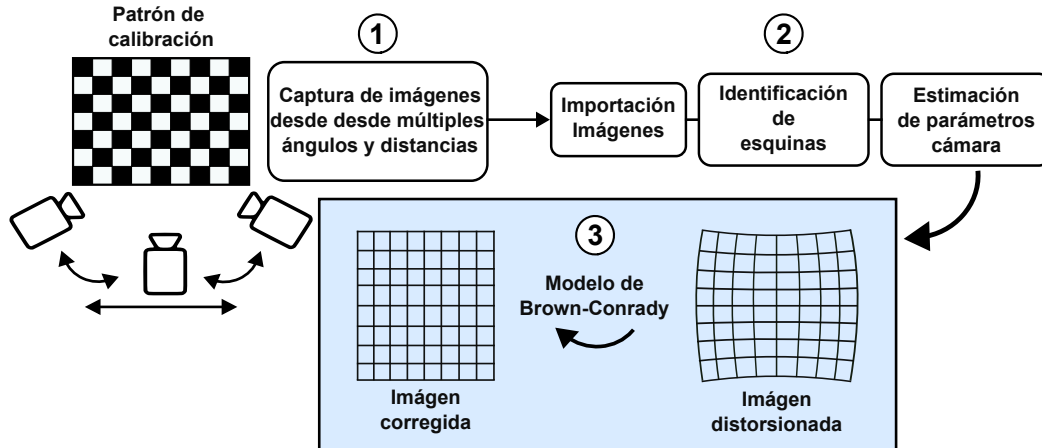


Figura 2.7 Esquema corrección de distorsión óptica.

2.3. Medición de vibraciones

En esta sección se describe la metodología empleada para obtener registros vibratorios a partir de videos capturados con la cámara de un smartphone, a través de la aplicación 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 (ver Anexo A). Los parámetros de entrada para la ejecución del algoritmo corresponden al video, al diámetro real de los marcadores circulares en milímetros (mm), el diámetro aproximado de los marcadores en píxeles (utilizado para definir el rango de búsqueda en la Transformada de Hough), el número de marcadores a los que se les quiere dar seguimiento, y la tasa de fotogramas por segundo del video a analizar, dado que la tasa de FPS de grabación puede no coincidir con la de reproducción (como en el caso de los videos capturados en modo cámara lenta).

El algoritmo identifica y permite seleccionar los objetivos circulares aplicando 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.

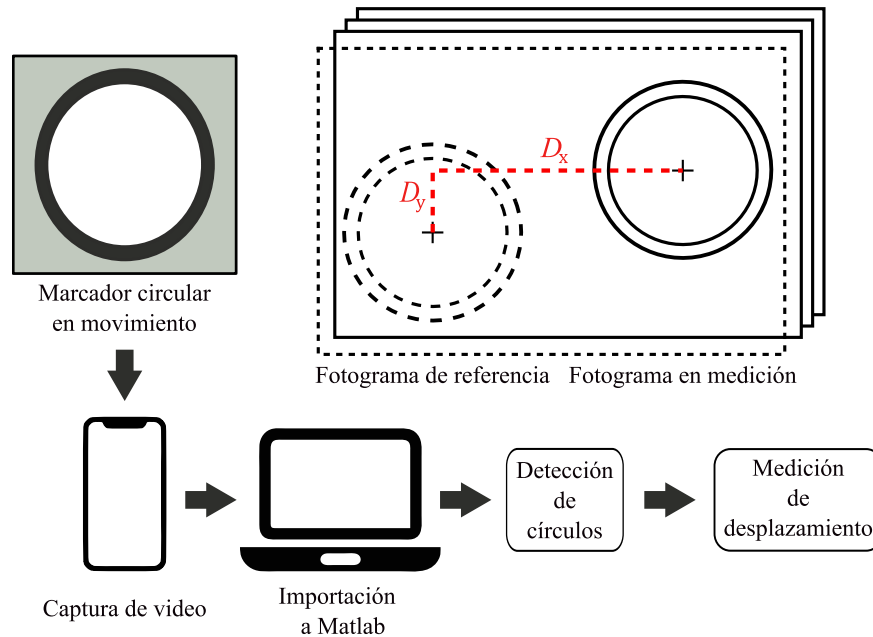


Figura 2.8 Esquema algoritmo de medición.

Como un paso previo a la medición de desplazamiento, y con el objetivo de mejorar la precisión en las mediciones, se construyó un algoritmo en MATLAB el cual corrige la distorsión óptica del video, basada en el modelo de Brown-Conrady y el proceso de calibración detallados en la Sección 2.2.6. El flujo de trabajo consiste en aplicar primero la corrección de distorsión a cada fotograma y, posteriormente, realizar el seguimiento de los marcadores sobre el video ya corregido. La calibración requiere un video de un patrón de referencia (tablero de ajedrez) capturado desde múltiples ángulos y distancias, independientemente de la posición relativa entre el objeto filmado y la cámara. Este proceso es específico para cada lente y configuración de resolución. Por este motivo, la calibración debe realizarse con la misma cámara y resolución que se usarán en la medición final. Esta especificidad es necesaria porque incluso dos teléfonos del mismo modelo pueden tener parámetros de corrección ligeramente distintos debido a tolerancias de fabricación o a deformaciones por golpes durante su uso. Una vez realizado el proceso con un equipo en específico, sus parámetros pueden ser guardados para evitar este paso en futuras mediciones.

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, y como se observa en Tabla 2.1, los coeficientes de cali-

Tabla 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 |
| FullHD (1920x1080) | 0.2268 | -0.8106 | 0.8251 | 0.000881 | 0.0011 |

bración 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 significativamente mayores en magnitud que los tangenciales. Esto se debe a que la distorsión radial es la más predominante en todo tipo de lentes, ya que afecta principalmente a los bordes de la imagen y requiere corregir variaciones de mayor magnitud en comparación con la distorsión tangencial.

Adicionalmente, 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. Construcción de la aplicación para animación del movimiento en 3D

Una de las principales ventajas del uso de teléfonos inteligentes en comparación con sensores tradicionales es la posibilidad de medir simultáneamente vibraciones en múltiples puntos de un equipo a partir de un único registro de video. En el caso de estructuras con geometrías simples, es posible obtener una representación global 3D de su movimiento mediante la utilización de cuatro vistas distintas registradas de forma simultánea. Por otro lado, cuando el movimiento es predominantemente senoidal, como en el caso de un harnero vibratorio, es posible sincronizar las señales obtenidas a partir de videos registrados de manera no simultánea desde distintas vistas empleando puntos de referencia comunes, lo que permite corregir las diferencias de fase entre los registros. De este modo, es factible reconstruir el movimiento completo del equipo y generar una animación tridimensional de su movimiento.

Se diseñó una aplicación en MATLAB con el objetivo de generar animaciones tridimensionales de estructuras simples. La aplicación utiliza como entradas señales previamente procesadas, las coordenadas geométricas de la estructura, la frecuencia de muestreo de las señales, un factor de amplificación del movimiento y la duración de la animación. Adicionalmente, permite la aplicación de un filtro pasabanda en casos donde las señales presentan altos niveles de ruido, así como la definición de la conectividad entre los distintos puntos que conforman la estructura, tal como se muestra en la Figura 2.9.

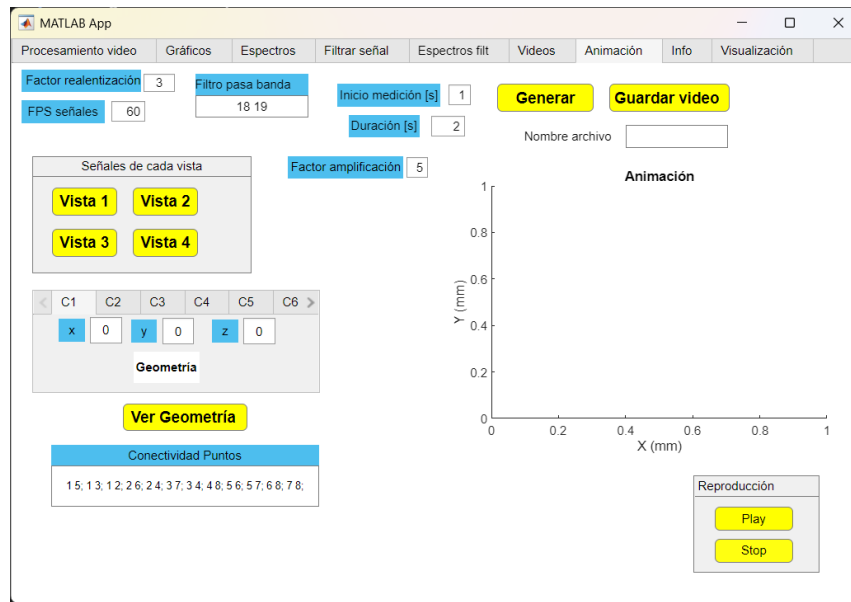


Figura 2.9 Interfaz del programa para la generación de animaciones tridimensionales del harnero vibratorio.

2.3.3. Diseño de marcadores circulares

Con el propósito de realizar las pruebas experimentales, se diseñaron y fabricaron marcadores circulares utilizando impresión 3D en material PLA. Se desarrollaron dos configuraciones principales, diferenciadas por el tipo de superficie sobre la cual pueden ser instaladas.

El primer diseño (Tipo 1), ilustrado en la Figura 2.10, consiste en un círculo interior blanco de 29.65 mm de diámetro, rodeado por un anillo negro de 35.30 mm de diámetro, con un imán de neodimio N38 incorporado en la parte posterior. La combinación de colores tiene como finalidad maximizar el contraste entre el marcador y el fondo de la imagen, lo que facilita su detección mediante técnicas de procesamiento de imágenes. Además, este diseño permite instalar el marcador de manera paralela a la superficie de apoyo, resultando especialmente adecuado para estructuras que no presentan superficies horizontales planas.

El segundo diseño (Tipo 2), mostrado en la Figura 2.11, está compuesto por un círculo blanco interior de 25 mm de diámetro rodeado por un marco negro que mejora el contraste visual. A diferencia del primer diseño, estos marcadores se instalan de manera perpendicular a la superficie de contacto, debido a la orientación de la base imantada. Esta configuración permite reducir las fuerzas de corte, aumentando la estabilidad de la fijación y favoreciendo el mantenimiento de una posición constante respecto de la estructura. De este modo, se minimiza el movimiento no deseado del marcador, lo cual contribuye a preservar la precisión en la medición de vibraciones. Adicionalmente, se fabricaron variantes de este diseño con distintas alturas, con el fin de adaptarse a geometrías y requerimientos específicos de las estructuras en estudio.



(a) Vista de frente



(b) Vista isométrica

Figura 2.10 Diseño objetivos circulares.



(a) Vista de frente



(b) Vista isométrica



(c) Vista inferior

Figura 2.11 Segundo diseño objetivos circulares.

2.3.4. 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.

2.3.5. 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, es necesario 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 LED de 50 W de potencia, posicionados estratégicamente para generar una iluminación cruzada que minimice las sombras y garantice 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 (videos en cámara lenta). Debido a esto, durante las mediciones solo se utilizan los reflectores LED como fuente de iluminación, asegurando una iluminación constante y sin parpadeos. Debido a la intensidad de la luz LED, se evitan además fluctuaciones de iluminación debido a cambios en las condiciones meteorológicas como el movimiento de nubes.

2.3.6. Estabilidad

La estabilidad del dispositivo móvil durante el proceso de medición resulta fundamental para reducir los errores asociados a la localización de los marcadores en los fotogramas y, en consecuencia, garantizar la precisión en la estimación de los desplazamientos. Con el propósito de evitar movimientos no deseados y mitigar las perturbaciones inherentes a la manipulación manual, se empleó un trípode ajustable, modelo WT 3130, con un rango de altura entre 45 y 125 cm y un peso de 2 kg, diseñado para teléfonos inteligentes. Este soporte permitió fijar el dispositivo en la posición requerida, asegurando su inmovilidad durante todo el proceso de adquisición de imágenes y ofreciendo la posibilidad de regular su altura.

Adicionalmente, para minimizar posibles desplazamientos ocasionados por la interacción directa con el dispositivo al manipularlo manualmente, se utilizó un control externo Bluetooth destinado a iniciar y finalizar la grabación, lo cual contribuyó a preservar la estabilidad del montaje. Con el fin de mantener la perpendicularidad del dispositivo respecto al plano de referencia y garantizar una adecuada separación entre los componentes de movimiento vertical y horizontal, se recurrió al uso complementario de un inclinómetro externo y del giroscopio integrado en el propio teléfono, accesible mediante una aplicación.

Finalmente, se evaluó la implementación de un estabilizador mecánico modelo Nuskon CS-24 compuesto por dos pequeños motores, cuyo objetivo fue incrementar la estabilidad global del sistema de medición y reducir aún más las perturbaciones inducidas por vibraciones externas o irregularidades en el montaje.

2.4. Comprobación del correcto funcionamiento del código

Para la validación del correcto funcionamiento del algoritmo de detección y seguimiento desarrollado, se empleó un video sintético generado en MATLAB a 120 FPS. Dicho video consiste en diez círculos blancos de 100 px de diámetro distribuidos aleatoriamente sobre un fondo negro con dimensiones de 800x800 px. Se optó por un video simulado con el objetivo de aislar el algoritmo de otras variables de la vida real, como la iluminación o la distorsión del lente.

En la Figura 3.2a se muestra el primer fotograma del video antes de su procesamiento, mientras que en la Figura 3.2b se presenta el mismo fotograma tras la etapa inicial de identificación de círculos. Se observa que el algoritmo logra detectar cada círculo presente en la imagen a partir de su diámetro aproximado en píxeles, incluyendo aquellos que se encuentran parcialmente obstruidos por los límites del video, así como también los que aparecen superpuestos entre sí. En consecuencia, en una aplicación práctica, la salida parcial de un círculo de la escena no debería comprometer su detección, siempre que al menos la mitad de este permanezca visible.

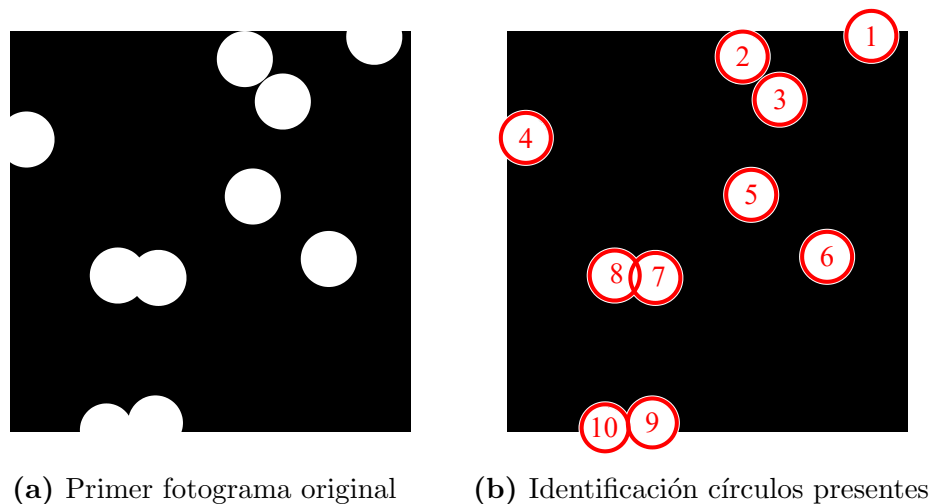


Figura 2.12 Comprobación identificación de objetivos.

Con el propósito de corroborar la capacidad del código para calcular el desplazamiento de los objetivos, los círculos generados fueron configurados con distintas características de movimiento. En la Figura 3.3 se presentan las formas de onda y los espectros en frecuencia correspondientes a cuatro casos: (a) desplazamiento nulo en todo instante de tiempo, (b) movimiento compuesto por tres componentes senoidales de distinta amplitud y frecuencia, (c) movimiento senoidal perturbado por un pulso, y (d) movimiento senoidal con ruido aleatorio agregado.

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes y el movimiento programado del círculo con movimiento (b). Este último estaba compuesto por tres senoidales con amplitudes pico de 10, 20 y 30 px y frecuencias de 10, 20 y 30 Hz, respectivamente. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.3.

Tabla 2.2 Comparación de resultados obtenidos mediante video y señal generada

| Componente | Frecuencia (Hz) | | | | Amplitud (px) | | | |
|------------|-----------------|-------|-------|-----------|---------------|-------|-------|-----------|
| | Video | Señal | Error | Error (%) | Video | Señal | Error | Error (%) |
| 1 | 10.00 | 10.00 | 0.00 | 0.00 % | 19.85 | 20.00 | -0.15 | 0.75 % |
| 2 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 % | 39.88 | 40.00 | -0.12 | 0.30 % |
| 3 | 30.00 | 30.00 | 0.00 | 0.00 % | 59.79 | 60.00 | -0.21 | 0.35 % |

En términos de frecuencia, se observa que el algoritmo es capaz de determinar los valores de forma precisa, obteniendo un promedio de error de 0.00 %. No obstante, en las amplitudes pico se registra un error relativo que varía entre 0.12 y 0.21 px, correspondiente a un rango porcentual de 0.30 % a 0.75 %. Este error puede atribuirse principalmente a la frecuencia de muestreo del video analizado (120 FPS), la cual no siempre coincide con los instantes de máxima amplitud de la señal, generando una ligera subestimación respecto al valor real.

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) de la Figura 3.3, el método utilizado no introduce ruido a las señales por sí solo. Cualquier tipo de ruido presente en las mediciones reales capturadas con la cámara de un teléfono 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

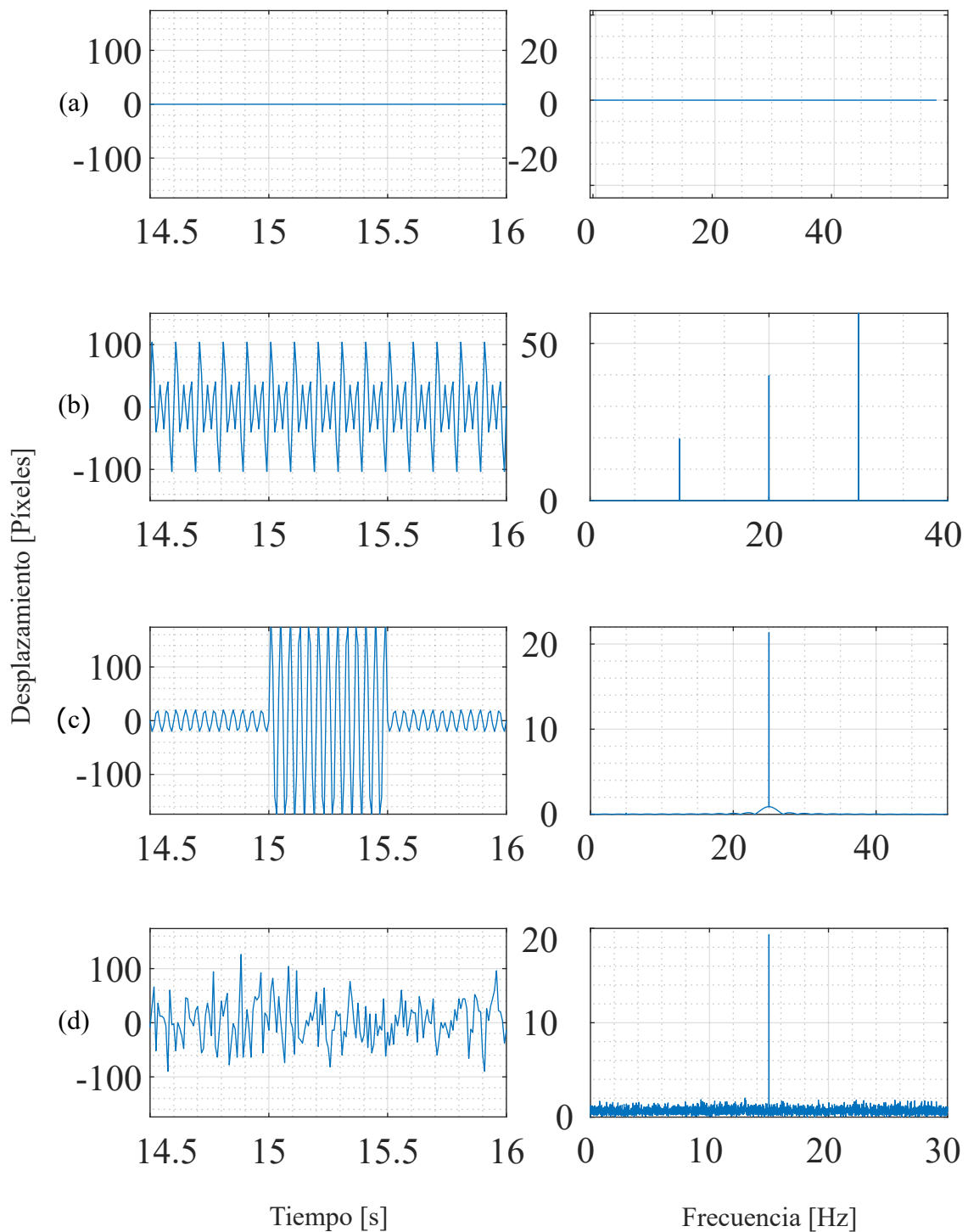


Figura 2.13 Formas de onda (izquierda) y espectros en frecuencia (derecha) ((a): Señal con desplazamiento nulo, (b): Señal movimiento compuesto por tres senoidales, (c): Señal movimiento senoidal perturbada por un pulso, (d): Señal movimiento senoidal con ruido aleatorio).

CAPÍTULO 3

Ensayos experimentales

En esta sección se presentan y describen los ensayos experimentales realizados durante el desarrollo de la investigación, indicando para cada uno sus objetivos, condiciones de ejecución y parámetros de adquisición de video.

3.1. Descripción de los bancos de ensayos

Los bancos de ensayos utilizados para las mediciones experimentales corresponden a varios equipos ubicados en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción. Estos corresponden a un harnero vibratorio de laboratorio (mostrado en la Figura 3.1a); un conjunto viga-resorte excitado a través de un motor eléctrico desbalanceado (Figura 3.1b); un shaker electrodinámico (Figura 3.1c); un conjunto motor-compresor (Figura 3.1d); y finalmente, un generador eléctrico diésel (Figura 3.1e). Además de los ensayos realizados en equipos de laboratorio, se realizó un último conjunto de mediciones sobre un harnero vibratorio de la industria minera de tamaño industrial, el cual se muestra en la Figura 3.1f.



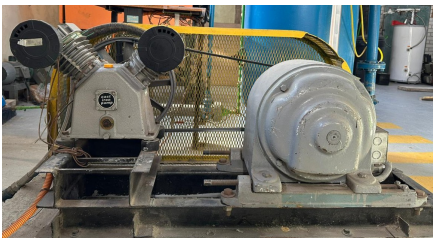
(a)



(b)



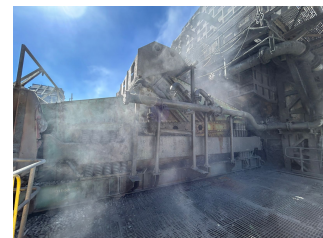
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.1 Bancos de ensayos: (a) Harnero vibratorio de laboratorio, (b) Conjunto Viga-Resorte, (c) Shaker electrodinámico, (d) Conjunto moto-compresor, (e) Generador diésel, (f) Harnero industrial.

En la Tabla 3.1 se describen de forma general las características de los equipos correspon-

dientes a cada banco de ensayo.

Tabla 3.1 Equipos utilizados en los bancos de ensayos

| Banco de ensayo | Equipo | Descripción |
|-----------------------------------|------------------------|--|
| Harnero vibratorio de laboratorio | Motor eléctrico | Motor trifásico, 90 W, 1500 rpm, 400 V, F_{\max} 960 N. |
| Conjunto viga-resorte | Motor CC | 2000 rpm, 7.3 V, torque 1900 g·cm. |
| Shaker electrodinámico | — | 2 Hz–7 kHz; acel. máx. 45 g; vel. máx. 1.5 m/s; displ. máx. 13 mm. |
| Conjunto moto-compresor | Motor | Motor trifásico, 7.5 HP, 1450 rpm. |
| | Compresor | Pistones en V, dos etapas, 1050 rpm. |
| Generador diésel | eléctrico Motor | Motor diésel, 3000 rpm. |
| Harnero vibratorio industrial | in- Motores eléctricos | Dos motores eléctricos Schenck DF601S, 90 kW, 4 polos, 940 rpm, |

3.2. Descripción de los ensayos a realizar

El objetivo general de los ensayos experimentales consiste en evaluar y validar la metodología propuesta para la medición de vibraciones mediante videos capturados con un teléfono inteligente, con el fin de determinar su precisión, alcance y aplicabilidad.

La descripción general de los ensayos experimentales a realizar se muestra en la Tabla 3.2. 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 CTC AC102-1A de sensibilidad 100 mV/g, 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 de las señales de desplazamiento obtenidas mediante el algoritmo propuesto y la integración de las señales capturadas por los acelerómetros de referencia.

Tabla 3.2 Resumen de los ensayos experimentales realizados

| Ensayo | Descripción | Objetivo principal |
|--|--|--|
| Shaker electro-dinámico | Vibración forzada con control de frecuencia; registro simultáneo mediante cámara de smartphone y acelerómetro de referencia. | Validar el correcto funcionamiento del algoritmo y analizar los efectos de aliasing y amplificación de movimiento. |
| Conjunto viga resorte | Estructura metálica excitada con vibraciones controladas; registro de objetivos a distintas distancias. | Determinar la distancia máxima de medición y evaluar la precisión del método según amplitud y tamaño del objetivo. |
| Harnero vibratorio de laboratorio | Estructura montada sobre resortes intercambiables, registrada en distintas condiciones de operación. | Evaluar la capacidad de la técnica para identificar frecuencias naturales y modos de vibrar, y analizar la influencia de rigidez, distorsión óptica y configuración de cámara. |
| Harnero vibratorio minero | Equipo industrial en operación, filmado en condiciones reales. | Validar la aplicabilidad de la técnica en un sistema vibratorio de gran escala. |
| Equipos de Termofluidos | Ensayos en un generador y un compresor en funcionamiento. | Aplicar la metodología a máquinas rotatorias industriales y evaluar su respuesta frente a variaciones de carga y presión. |

3.3. Comprobación del correcto funcionamiento del código

Para la validación del correcto funcionamiento del algoritmo de detección y seguimiento desarrollado, se empleó un video sintético generado en MATLAB a 120 FPS. Dicho video consiste en diez círculos blancos de 100 px de diámetro distribuidos aleatoriamente sobre un fondo negro con dimensiones de 800x800 px. Se optó por un video simulado con el objetivo de aislar el algoritmo de otras variables de la vida real, como la iluminación o la distorsión del lente.

En la Figura 3.2a se muestra el primer fotograma del video antes de su procesamiento, mientras que en la Figura 3.2b se presenta el mismo fotograma tras la etapa inicial de identificación de círculos. Se observa que el algoritmo logra detectar cada círculo presente en la imagen a partir de su diámetro aproximado en píxeles, incluyendo aquellos que se encuentran parcialmente obstruidos por los límites del video, así como también los que aparecen superpuestos entre sí. En consecuencia, en una aplicación práctica, la salida

parcial de un círculo de la escena no debería comprometer su detección, siempre que al menos la mitad de este permanezca visible.

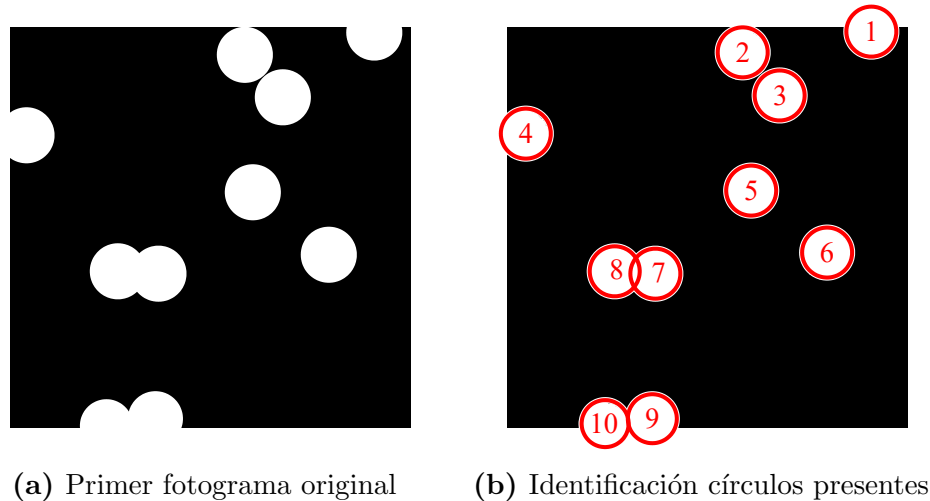


Figura 3.2 Comprobación identificación de objetivos.

Con el propósito de corroborar la capacidad del código para calcular el desplazamiento de los objetivos, los círculos generados fueron configurados con distintas características de movimiento. En la Figura 3.3 se presentan las formas de onda y los espectros en frecuencia correspondientes a cuatro casos: (a) desplazamiento nulo en todo instante de tiempo, (b) movimiento compuesto por tres componentes senoidales de distinta amplitud y frecuencia, (c) movimiento senoidal perturbado por un pulso, y (d) movimiento senoidal con ruido aleatorio agregado.

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes y el movimiento programado del círculo con movimiento (b). Este último estaba compuesto por tres senoidales con amplitudes pico de 10, 20 y 30 px y frecuencias de 10, 20 y 30 Hz, respectivamente. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Comparación de resultados obtenidos mediante video y señal generada

| Componente | Frecuencia (Hz) | | | | Amplitud (px) | | | |
|------------|-----------------|-------|-------|-----------|---------------|-------|-------|-----------|
| | Video | Señal | Error | Error (%) | Video | Señal | Error | Error (%) |
| 1 | 10.00 | 10.00 | 0.00 | 0.00 % | 19.85 | 20.00 | -0.15 | 0.75 % |
| 2 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 % | 39.88 | 40.00 | -0.12 | 0.30 % |
| 3 | 30.00 | 30.00 | 0.00 | 0.00 % | 59.79 | 60.00 | -0.21 | 0.35 % |

En términos de frecuencia, se observa que el algoritmo es capaz de determinar los valores de forma precisa, obteniendo un promedio de error de 0.00 %. No obstante, en las amplitudes pico se registra un error relativo que varía entre 0.12 y 0.21 px, correspondiente a un rango porcentual de 0.30 % a 0.75 %. Este error puede atribuirse principalmente a la frecuencia

de muestreo del video analizado (120 FPS), la cual no siempre coincide con los instantes de máxima amplitud de la señal, generando una ligera subestimación respecto al valor real.

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) de la Figura 3.3, el método utilizado no introduce ruido a las señales por sí solo. Cualquier tipo de ruido presente en las mediciones reales capturadas con la cámara de un teléfono se debe a factores externos, como lo son la iluminación, las limitaciones del sensor de la cámara o los movimientos internos del dispositivo utilizado.

Señales videos generados, 120 FPS

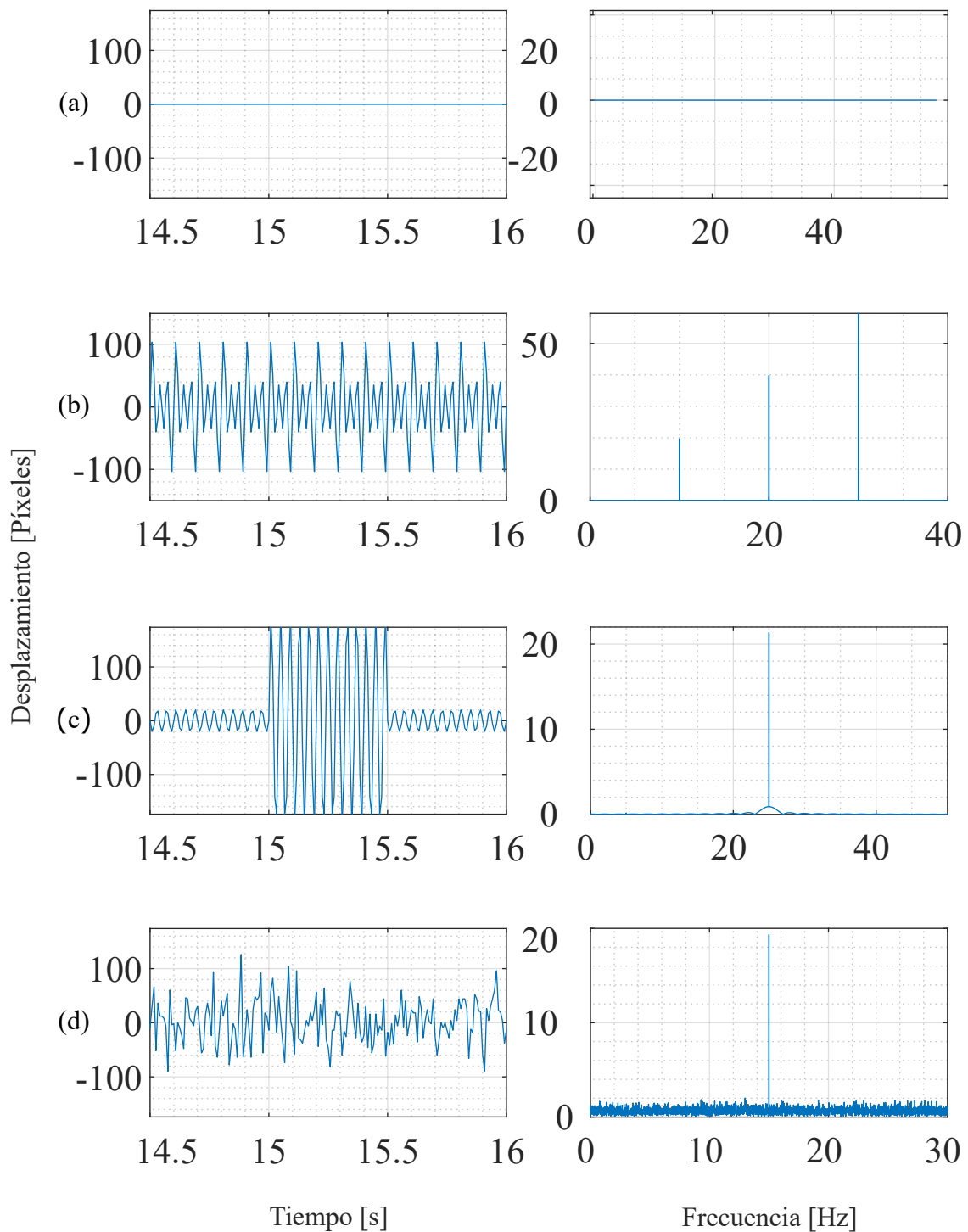


Figura 3.3 Formas de onda (izquierda) y espectros en frecuencia (derecha) ((a): Señal con desplazamiento nulo, (b): Señal movimiento compuesto por tres senoidales, (c): Señal movimiento senoidal perturbada por un pulso, (d): Señal movimiento senoidal con ruido aleatorio).

3.4. Pruebas en harnero vibratorio de laboratorio

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 inicialmente con una fuerza de magnitud de 192 N (20% de la fuerza nominal máxima del motor). Para ello, se instalaron cuatro objetivos del tipo 2 en las cuatro vistas principales del harnero en los puntos indicados en la Figura 3.4, denominando las vistas 1 y 3 a los laterales, vista 2 a la zona de descarga y vista 4 a la zona de entrada. Se instalaron acelerómetros en el apoyo A (3L) y dos en el apoyo B (4L), con H y V indicando las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, los cuales fueron conectados a un sistema PXI de recolección de datos para obtener mediciones simultáneas a los videos capturados.

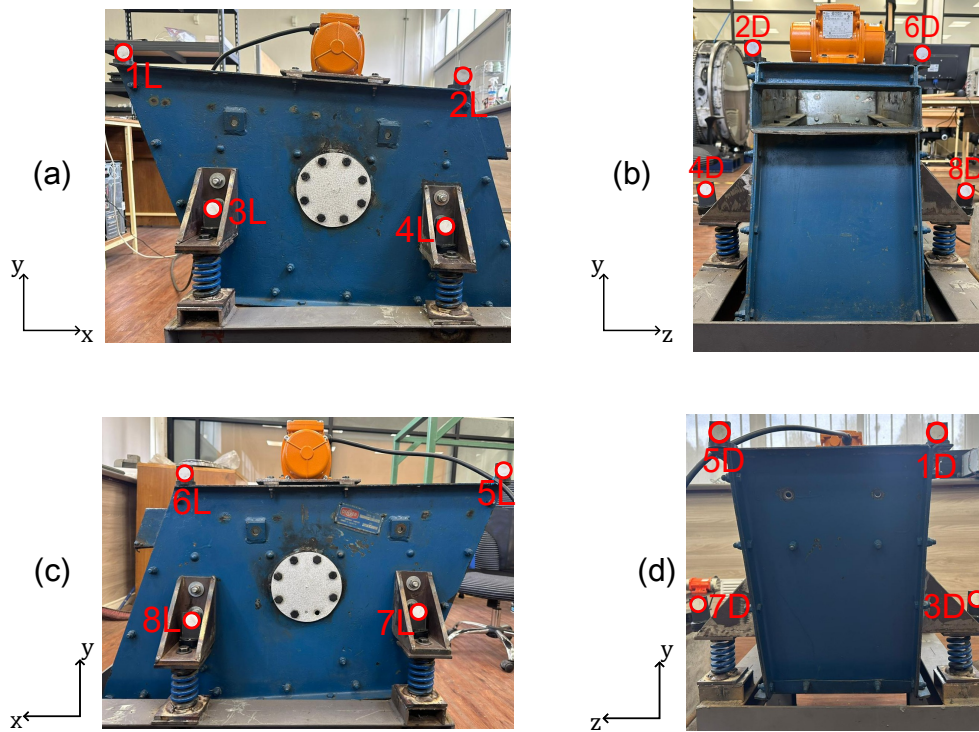


Figura 3.4 Vistas montaje ensayos harnero vibratorio: (a) Vista 1, (b) Vista 2, (c) Vista 3, (d) Vista 4.

3.4.1. Corrección de distorsión óptica

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, especialmente en las vistas laterales, en las cuales los objetivos se encuentran más alejados entre sí.

Se realizó una medición de la vista 1 del harnero vibratorio durante su funcionamiento estacionario a 120 FPS con el motor trabajando a su velocidad nominal de funcionamiento. La Figura 3.5 presenta los espectros en frecuencia del desplazamiento del círculo 1L, obtenidos tanto con corrección óptica como sin ella.

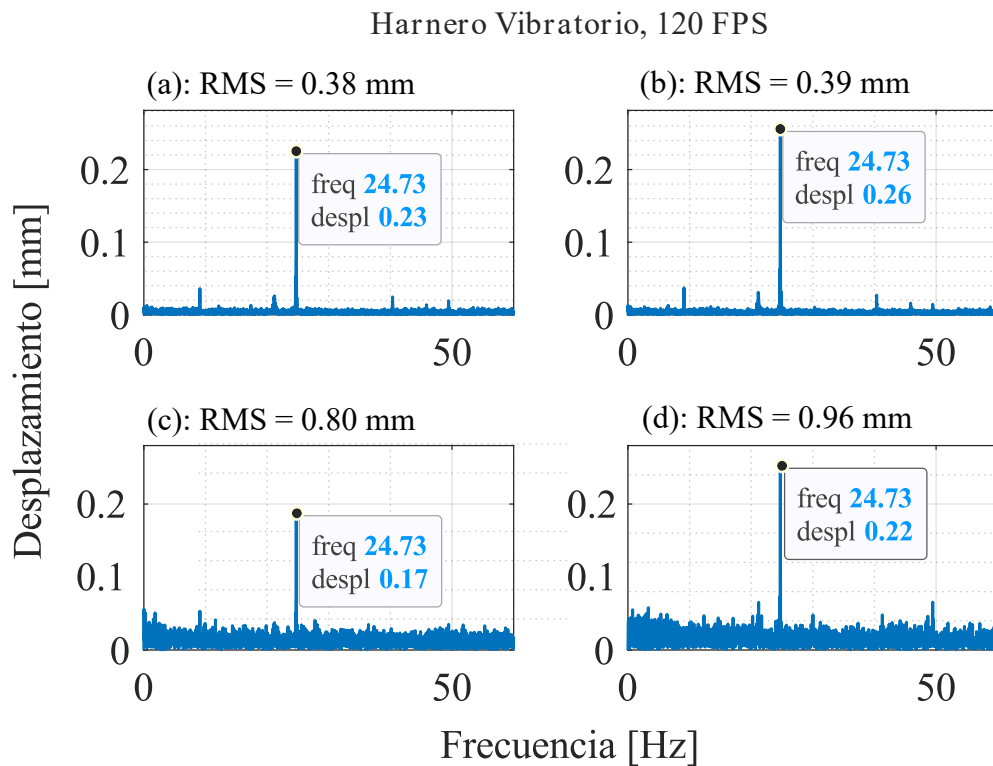


Figura 3.5 Espectros del harnero vibratorio para grabación a 120 FPS, círculo 1L (a) Movimiento horizontal con distorsión corregida, (b) Movimiento horizontal sin corrección, (c) Movimiento vertical con distorsión corregida, (d) Movimiento vertical sin corrección.

Los resultados muestran que la corrección de la distorsión óptica reduce ligeramente el nivel de ruido presente en las mediciones en el círculo 1L, ubicado una mayor distancia del centro geométrico 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.

3.4.2. Uso de estabilizador

Con el objetivo de analizar el uso de un estabilizador electrónico genérico para smartphones como complemento y alternativa al trípode durante la captura de videos, se realizaron mediciones sobre el harnero en funcionamiento estacionario. Con el fin de generar un movimiento de mayor amplitud, se configuró el excitador para operar a una frecuencia de 18.4 Hz, correspondiente a la segunda frecuencia natural del sistema en su estado inicial, lo cual se discutirá más adelante.

En primer lugar, se realizó un conjunto de mediciones simultáneas en la vista 1 del harnero, registrando video a 60 FPS y señales de acelerómetro, con el objetivo de analizar las diferencias entre el uso de un estabilizador y el uso exclusivo de las manos. En la Figura 3.6 se muestran los espectros en frecuencia de velocidad resultantes de este conjunto de mediciones en el punto 1L, tanto para la componente vertical como para la horizontal.

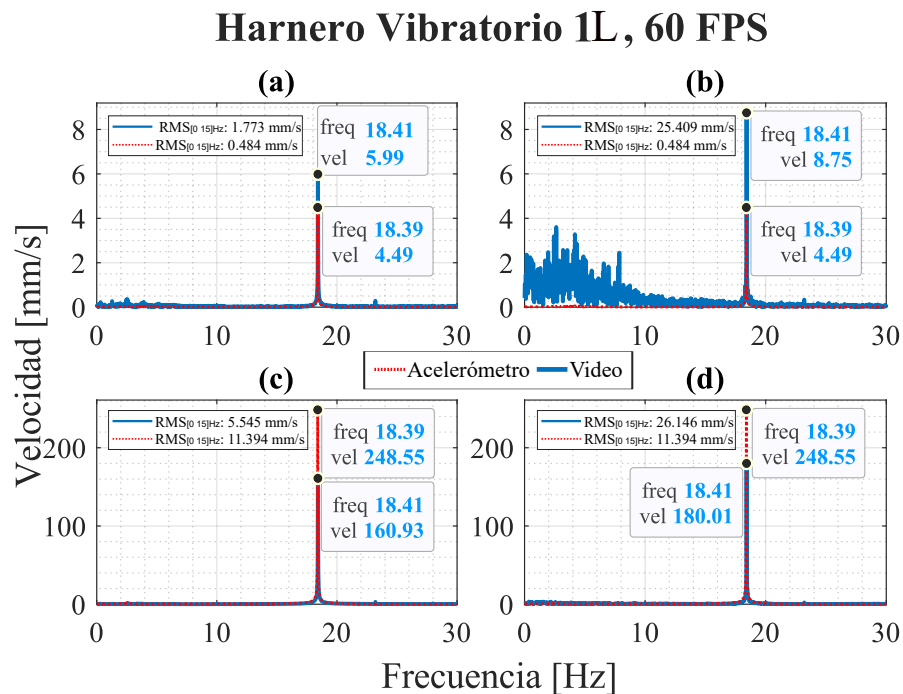


Figura 3.6 Espectros en frecuencia del segundo modo de vibrar del harnero vibratorio, grabación a 60 FPS con objetivo L1 (a) Movimiento horizontal con estabilizador, (b) Movimiento horizontal a mano, (c) Movimiento vertical con estabilizador, (d) Movimiento vertical a mano.

Se buscó comparar simultáneamente casos de grandes y pequeños desplazamientos, por lo que se evaluó un modo de vibrar predominantemente vertical. Para cada señal se calcularon los valores RMS en la banda de frecuencia asociada a la mayor influencia del movimiento de la mano (0-15 Hz). Los resultados permiten observar la influencia del uso del estabilizador tanto en el movimiento horizontal como en el vertical del harnero en la vista analizada, evidenciándose una disminución significativa del valor RMS. Al analizar los espectros, se

aprecia que el efecto del movimiento de la mano es más notorio en condiciones de menor intensidad vibratoria, mientras que en la dirección vertical dicho efecto resulta apenas perceptible de forma visual. En este contexto, el uso del estabilizador adquiere mayor relevancia al emplearse en equipos con bajos niveles vibratorios. Por lo tanto, al evaluar la necesidad de su utilización, es importante considerar las características dinámicas del equipo en el que se desea realizar la medición.

Adicionalmente, se realizó un conjunto de mediciones en la vista 4 a una distancia de 15 cm, utilizando cuatro métodos distintos: estabilizador sostenido a mano, únicamente a mano, únicamente con trípode y una combinación de trípode con estabilizador. Los espectros en frecuencia de velocidad vertical obtenidos a partir de estas mediciones se presentan en la Figura 3.7.

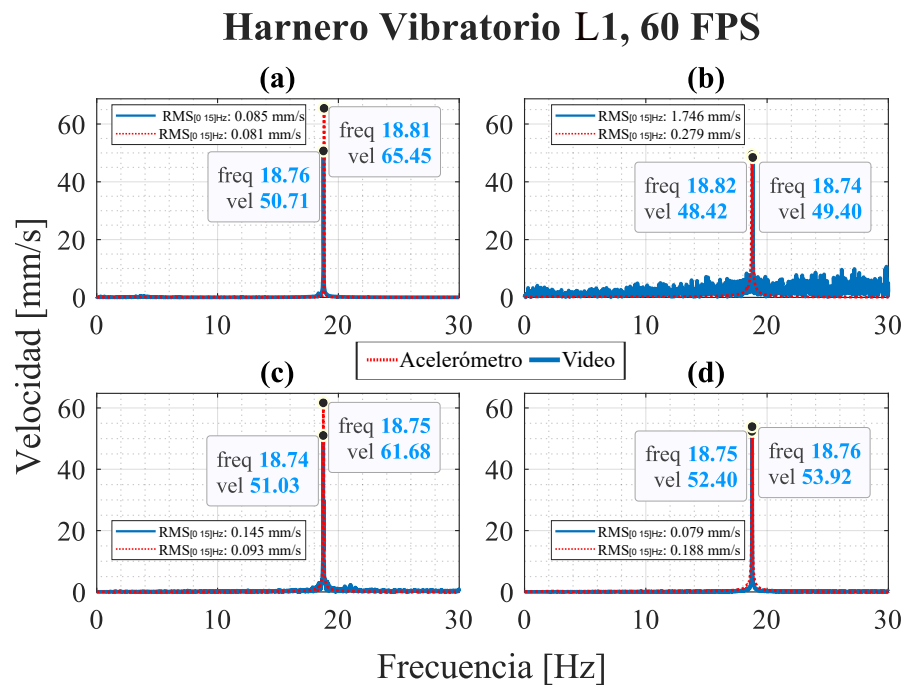


Figura 3.7 Espectros en frecuencia correspondientes al segundo modo de vibrar del harnero vibratorio, grabación a 60 FPS con objetivo L1. ((a) Movimiento vertical a mano, (b) Movimiento vertical con estabilizador, (c) Movimiento vertical con trípode, (d) Movimiento vertical con trípode y estabilizador.

Las mediciones se realizaron a una corta distancia del equipo con el objetivo de analizar el efecto de los distintos métodos propuestos en la mitigación de las vibraciones transmitidas por el harnero al suelo, simulando la influencia que pueden tener las vibraciones de una máquina sobre otra ubicada en su proximidad.

Al analizar los valores RMS obtenidos en el mismo rango de frecuencia considerado en el conjunto de mediciones anteriores, se observa nuevamente la ventaja del uso de un estabilizador frente al uso exclusivo de la mano. Esta diferencia resulta más notoria debido

a la cercanía al equipo y a la mayor influencia de las vibraciones transmitidas a través del suelo.

Por otro lado, al comparar los espectros correspondientes al caso en que se utiliza únicamente un trípode, es posible identificar una pequeña fuente de ruido en el rango de 20 a 22 Hz, atribuida al movimiento inducido por la proximidad al harnero. Este fenómeno no se aprecia en el caso que combina el uso de trípode y estabilizador, ya que, además de la estabilidad que aporta el trípode, el estabilizador eléctrico permite corregir pequeños movimientos residuales. En este contexto, la combinación de trípode y estabilizador se configura como la alternativa más estable para la realización de mediciones mediante teléfonos inteligentes. Dado que los smartphones están diseñados para ser dispositivos compactos y livianos, estos son más susceptibles a movimientos no deseados, por lo tanto, el uso de un trípode robusto complementado con un estabilizador constituye una solución adecuada para mejorar la estabilidad de las mediciones.

3.4.3. Composición 3D del movimiento

Dado el carácter predominantemente senoidal del movimiento del harnero, fue posible aplicar el método descrito en la Sección 2.3.2 para generar una animación tridimensional del harnero vibratorio durante su funcionamiento.

Se realizaron mediciones no simultáneas a 240 FPS en las cuatro vistas del harnero vibratorio operando en régimen estacionario, con el motor configurado para funcionar a una frecuencia de 11.78 Hz, correspondiente a la primera frecuencia natural del sistema, asociada a su comportamiento angular. Para la sincronización de las distintas vistas, se utilizaron como puntos de referencia comunes los objetivos 1, 2, 5 y 6.

En la Figura 3.8 se presentan tres fotogramas de una animación obtenida utilizando la geometría del cuerpo del harnero analizado, considerando un factor de amplificación del movimiento igual a 30. En dicha animación es posible apreciar el comportamiento angular del sistema respecto del eje Z, de acuerdo con la convención de ejes adoptada.

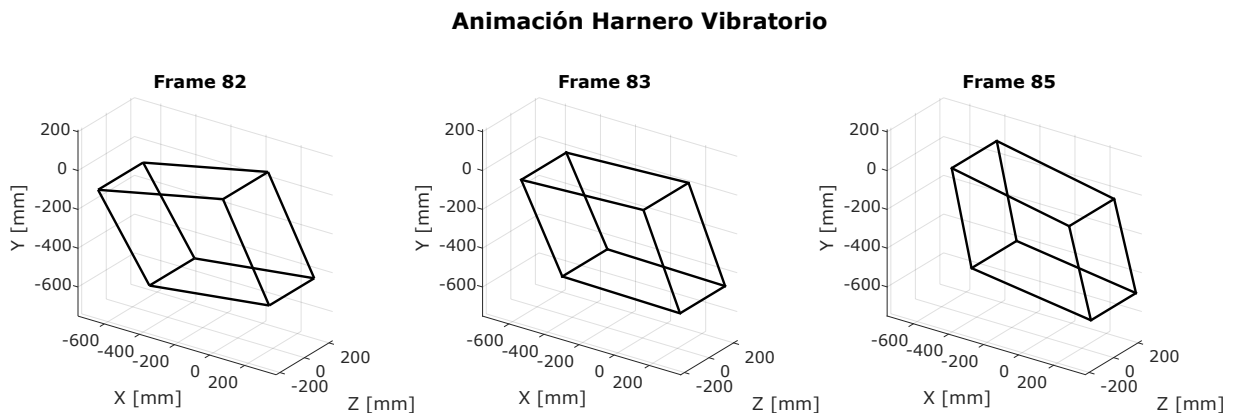


Figura 3.8 Muestra animación tridimensional Harnero vibratorio.

De esta forma, la metodología propuesta permite reconstruir de forma coherente el movi-

miento tridimensional de estructuras simples a partir de registros de video obtenidos con un teléfono inteligente, constituyendo una herramienta complementaria para el análisis de vibraciones.

3.4.4. Set de mediciones experimentales en la configuración original de resortes

Inicialmente, se realizaron cuatro mediciones sobre la vista lateral del harnero (vista 1). Estas consistieron de 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, con el excitador funcionando a su velocidad nominal, a 60 y 120 FPS.

Los videos capturados fueron procesados después de realizar una corrección de la distorsión óptica. Los resultados obtenidos en las mediciones junto con las mediciones simultáneas de referencia con acelerómetros se presentan a continuación. La Figura 3.9 muestra el ensayo de partida del harnero vibratorio hasta la velocidad nominal del motor de 25 Hz. La Figura 3.10 muestra los espectros en frecuencia en velocidad resultantes del ensayo de golpe vertical. Las Figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 muestran los espectros en frecuencia de velocidad en los apoyos del harnero para las mediciones a 60 y 120 FPS. 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 el procesamiento de videos y acelerómetros de forma simultánea, la cual se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 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

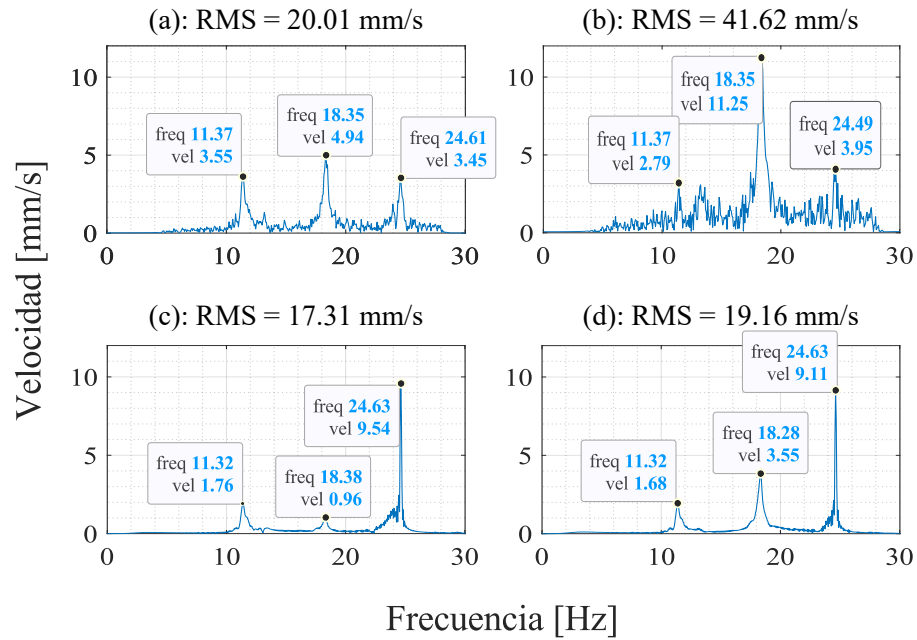


Figura 3.9 Espectros ensayo de partida harnero, grabación a 60 FPS apoyos (a) Movimiento dirección horizontal 3L. (b) Movimiento dirección vertical 3L. (c) Acelerómetro horizontal en 3L. (d) Acelerómetro vertical en 3L.

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].

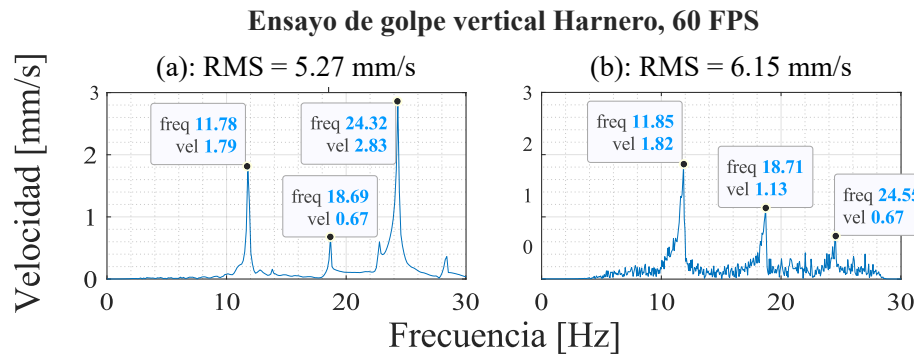


Figura 3.10 Espectros ensayo de golpe vertical harnero, grabación a 60 FPS apoyo A (a) Acelerómetro vertical en 3L. (b): Movimiento dirección vertical círculo 3L.

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.

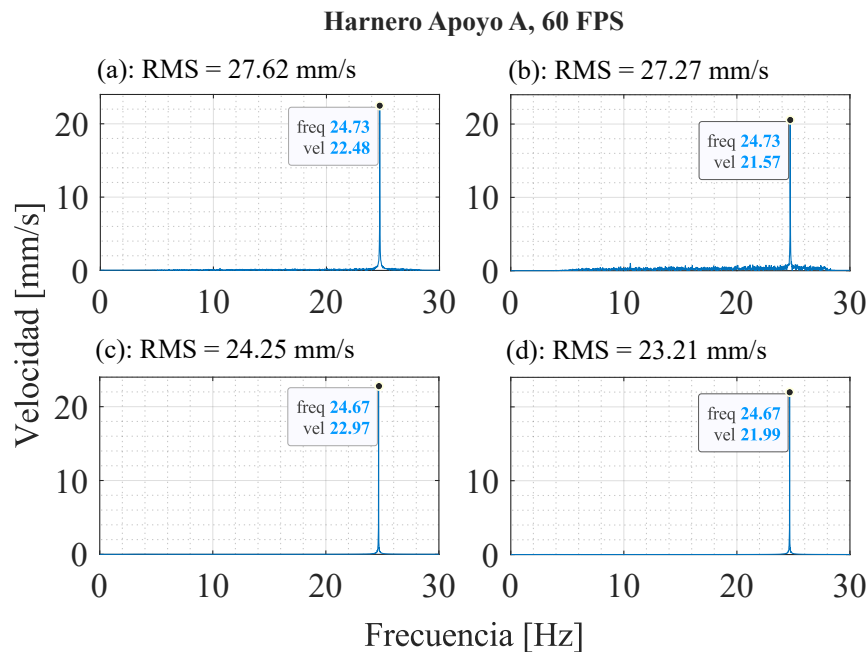


Figura 3.11 Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo A (a) Movimiento dirección horizontal en 3L. (b) Movimiento dirección vertical en 3L. (c) Acelerómetro horizontal en 3L. (d) Acelerómetro vertical en 3L.

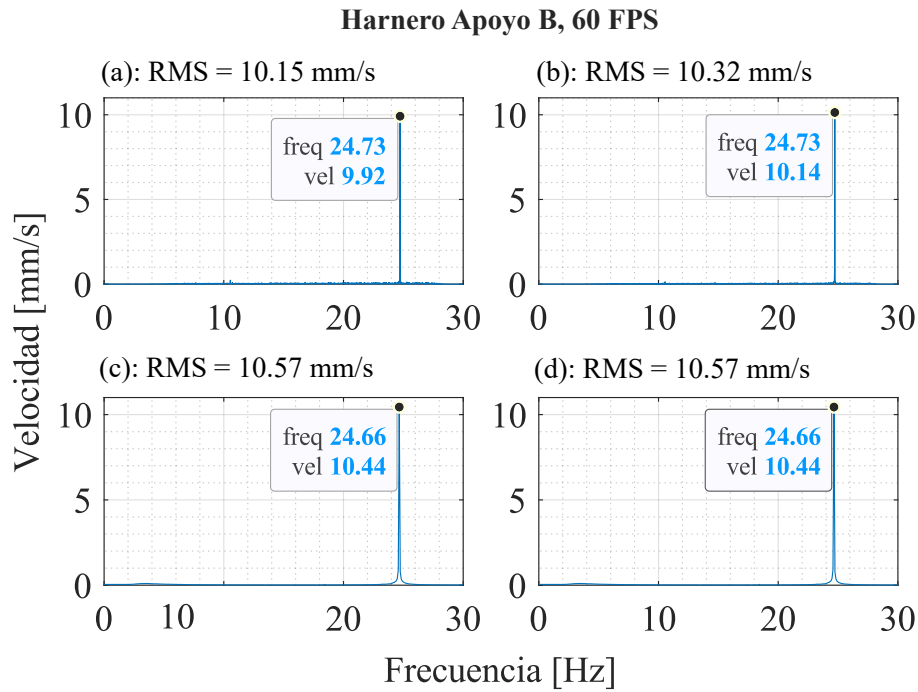


Figura 3.12 Espectros del harnero vibratorio, grabación 60 FPS apoyo B (a) Movimiento dirección horizontal 4L. (b) Movimiento dirección vertical 4L. (c) Acelerómetro horizontal en 4L. (d) Acelerómetro vertical en 4L.

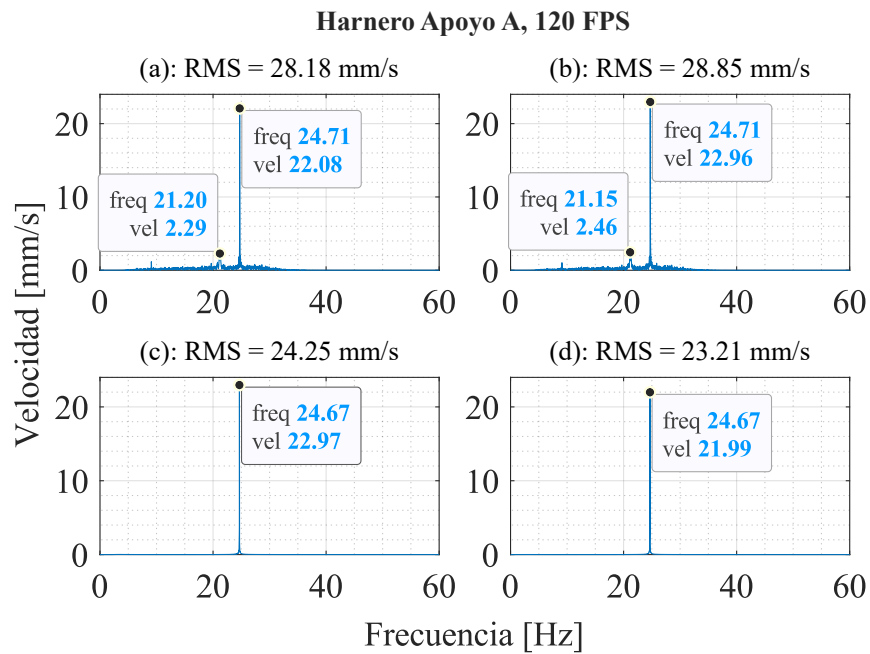


Figura 3.13 Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo A (a) Movimiento dirección horizontal 3L, (b) Movimiento dirección vertical 3L, (c) Acelerómetro horizontal en 3L, (d) Acelerómetro vertical en 3L.

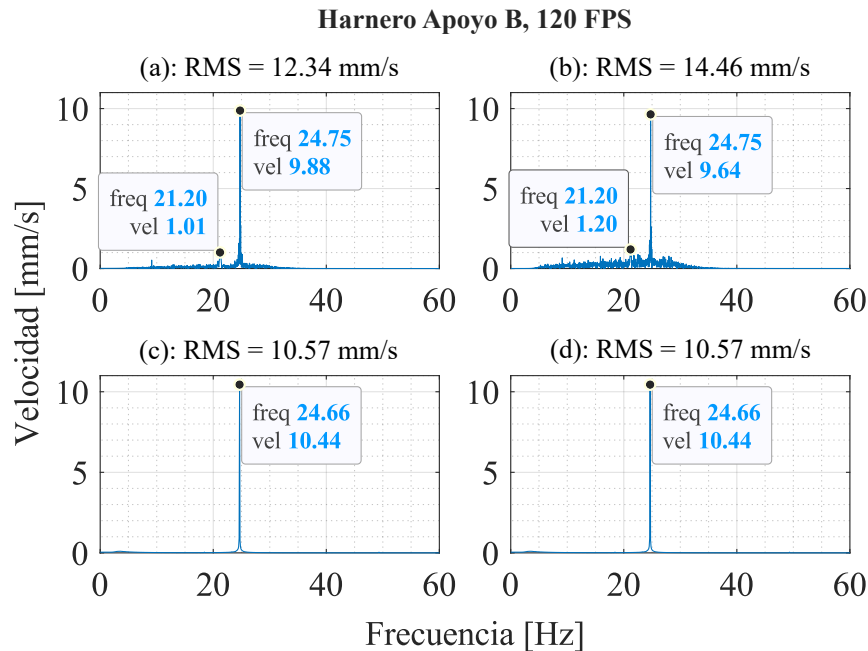


Figura 3.14 Espectros del harnero vibratorio, grabación 120 FPS apoyo B (a) Movimiento dirección horizontal 4L. (b) Movimiento dirección vertical 4L. (c) Acelerómetro horizontal en 4L, (d) Acelerómetro vertical en 4L.

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 (4K) una mayor resolución que a 120 FPS (FullHD), 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, en igualdad de condiciones, 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.

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. A raíz de este resultado se decide cambiar 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. El análisis de esta nueva configuración se presenta en la sección siguiente.

Para analizar a mayor profundidad el primer y segundo modos de vibrar del harnero vibratorio, se realizaron mediciones sobre sus vigas, funcionando de forma estacionaria con su motor configurado para excitar el sistema a 11.4 Hz y 18.27 Hz respectivamente.

En el caso del primer modo de vibración, al analizar la fase entre las distintas señales, se encontró que los puntos 1 y 3 se mueven en fase en todas sus direcciones, al igual que los puntos 2 y 4. Por otro lado, ambos grupos de puntos se mueven en contrafase entre sí en la dirección vertical (z) y en fase en la dirección horizontal (x). Esto produce un movimiento angular respecto al eje (z), tal como se observó en la animación del movimiento 3D del harnero funcionando a esta misma frecuencia (Figura 3.8). En el caso del segundo modo de vibrar, su movimiento es principalmente vertical (y), con todos sus puntos moviéndose en fase en esa dirección. Por lo tanto, se puede concluir que el modo de vibración tiene esa dirección principal de movimiento, como se muestra en la animación creada en la Figura 3.15.

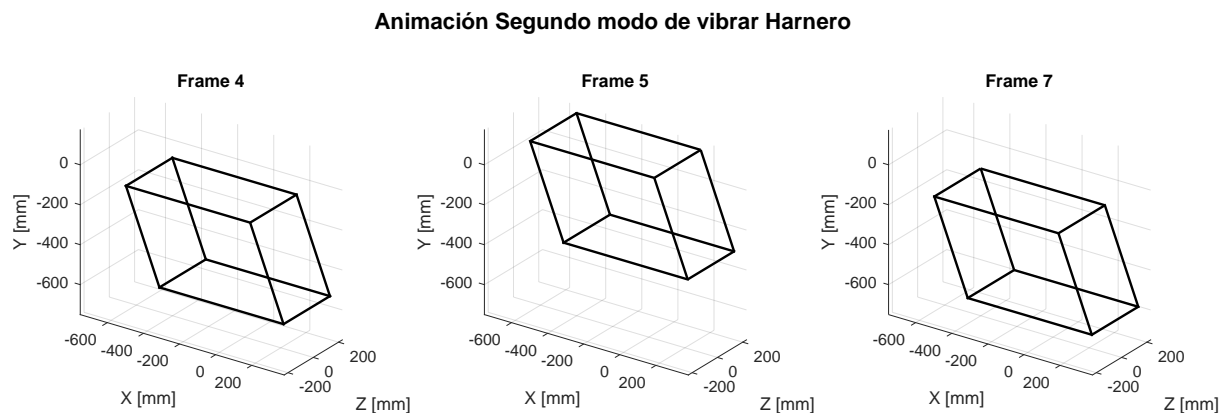


Figura 3.15 Muestra animación tridimensional segundo modo Harnero vibratorio.

3.4.5. Set de mediciones experimentales nueva configuración de resortes

Como se indicó en la sección anterior, se determinó que la velocidad nominal del excitador del harnero vibratorio coincidía con una zona resonante del sistema, correspondiente a la segunda frecuencia natural. Por esta razón, se optó por rediseñar el banco de ensayo, reemplazando los resortes sobre los cuales se instaló el harnero. Originalmente, estos presentaban una rigidez axial de 260 N/mm cada uno y estaban soldados directamente al marco metálico de la base.

Se seleccionaron cuatro resortes de menor rigidez, manteniendo el mismo tipo y material, pero con menor diámetro de cuerpo y de alambre. Con el fin de evitar fallas por fatiga y pandeo, se escogieron resortes con rigidez axial de 130 N/mm, cuyas características se resumen en la Tabla 3.5. Esta nueva configuración permite que el excitador opere a su velocidad nominal sin entrar en resonancia y permite operar con fuerzas de mayor magnitud. Los resortes fueron soldados a placas rectangulares en ambos extremos, permitiendo su unión apernada a la base metálica y al harnero. En la Figura 3.16 se presenta una comparación entre la instalación original y la configuración implementada.

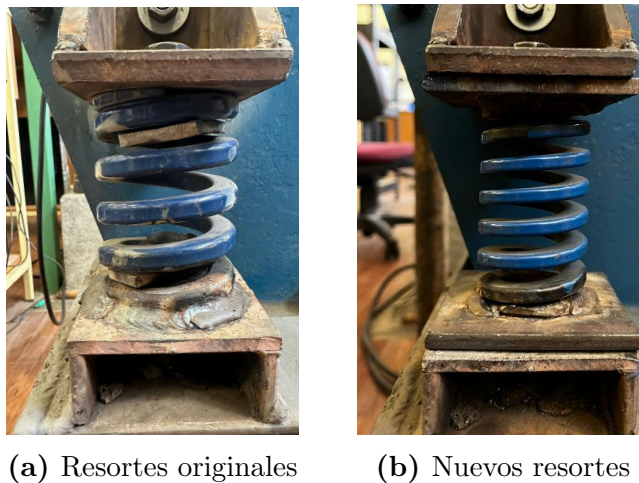


Figura 3.16 Comparación instalación harnero vibratorio.

Tabla 3.5 Comparación características resortes utilizados

| Parámetro | Resortes originales | Resortes nuevos |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------|
| Rigidez (k) | 260 N/mm | 130 N/mm |
| Diámetro exterior (D_H) | 63 mm | 50 mm |
| Diámetro interior (D_d) | 38 mm | 25 mm |
| Área del alambre ($b \times h$) | 11.5 \times 9.1 mm | 11.1 \times 5.8 mm |
| Longitud libre (L_0) | 89 mm | 89 mm |
| Espiras totales (n_t) | 6 | 8 |
| Material | Acero Cr-V (DIN 17223) | |

Se realizaron tres mediciones en total sobre la vista 1 del harnero: un ensayo de parada registrado a 60 FPS y dos mediciones sucesivas durante su funcionamiento en régimen estacionario, con el excitador operando a su velocidad nominal y una fuerza de excitación de 317 N, registradas a 60 y 120 FPS, respectivamente.

Los videos fueron capturados utilizando trípode y estabilizador, y posteriormente procesados tras aplicar la corrección de la distorsión óptica. Los resultados obtenidos se presentan a continuación. En la Figura 3.17 se muestra el ensayo de parada del harnero vibratorio desde la velocidad nominal del motor de 25 Hz hasta su detención. Las Figuras 3.19 y 3.20 presentan los espectros en frecuencia de la velocidad horizontal y vertical, respectivamente, medidos en el punto 3L del harnero. Adicionalmente, como segunda forma de comparación, se realizó una medición simultánea utilizando una cámara profesional Ribcage RX0 II, con capacidad de grabación de hasta 960 FPS en resolución 4K.

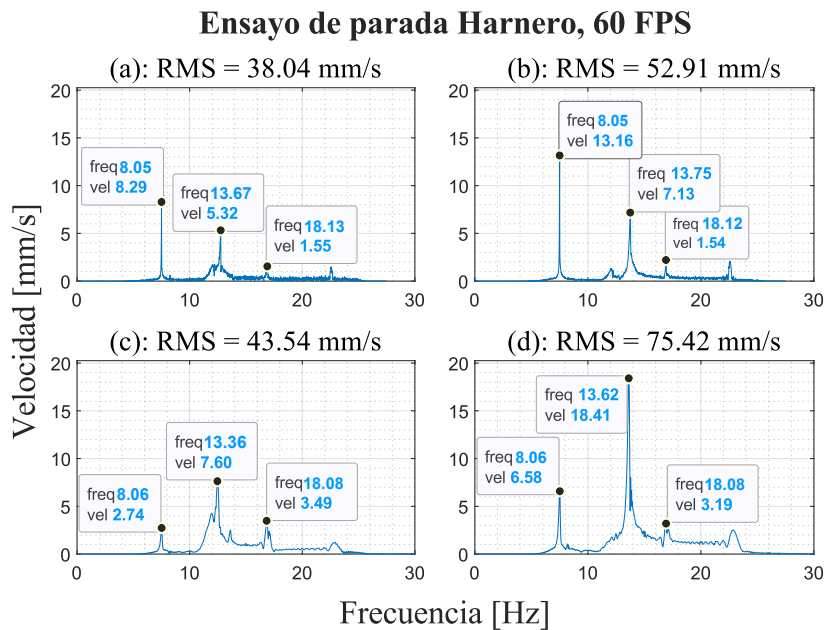


Figura 3.17 Espectros de velocidad harnero vibratorio ensayo de parada, grabación 60 FPS (a): Movimiento dirección horizontal 3L, (b): Movimiento dirección vertical 3L, (c): Acelerómetro horizontal 3L, (d): Acelerómetro vertical 3L.

A partir del ensayo de parada del harnero fue posible identificar las tres primeras frecuencias naturales del sistema bajo la nueva configuración de resortes. Mediante el procesamiento de video se determinó una primera frecuencia natural promedio de 8.06 Hz, con una diferencia de 0.0139 Hz (0.173 %) respecto de la medición obtenida con acelerómetro; una segunda frecuencia natural promedio de 13.71 Hz, con una diferencia de 0.189 Hz (1.396 %); y una tercera frecuencia natural promedio de 18.14 Hz, con una diferencia de 0.004 Hz (0.023 %).

En la Tabla 3.6 se presenta la comparación entre las frecuencias naturales estimadas antes y

después del cambio de resortes. Se observa que la tercera frecuencia natural experimentó la variación más significativa, disminuyendo en 6.55 Hz respecto de la configuración original. Esta modificación desplazó la condición resonante fuera del rango de operación nominal del excitador, permitiendo su funcionamiento sin coincidir con una frecuencia natural del sistema.

Tabla 3.6 Comparación de frecuencias naturales con las distintas configuraciones de resortes.

| Resortes | Frecuencia natural $f_{n,i}$ [Hz] | | | | | |
|----------|-----------------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | $f_{n,1}$ | | $f_{n,2}$ | | $f_{n,3}$ | |
| | Ref. | Vid. | Ref. | Vid. | Ref. | Vid. |
| Antiguos | 11.32 | 11.37 | 18.38 | 13.35 | 24.63 | 24.61 |
| Nuevos | 8.06 | 8.06 | 13.49 | 13.71 | 18.08 | 18.13 |

Posteriormente, se analizó el segundo modo de vibración del sistema mediante una medición en cada vista del harnero, operando en régimen estacionario a 13.71 Hz. Se determinó que el movimiento es predominantemente vertical, con todos los puntos de medición desplazándose en fase en dicha dirección. Siguiendo la metodología descrita en la Sección 3.6.3, se creó una composición tridimensional del movimiento del harnero a partir de las mediciones, de la cual se presentan tres fotogramas en la Figura 3.18, donde se aprecia la naturaleza vertical del movimiento. Este resultado puede corroborarse mediante un modelo del sistema con un grado de libertad, utilizando la masa del harnero y la rigidez equivalente de los cuatro resortes dispuestos en paralelo, lo que permite estimar una frecuencia natural vertical teórica de 13.62 Hz.

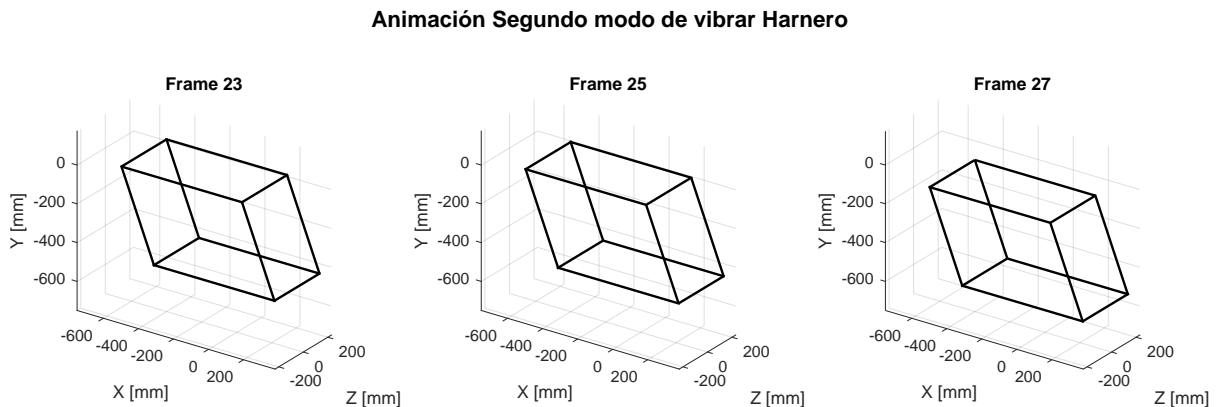


Figura 3.18 Muestra animación tridimensional nuevo segundo modo Harnero vibratorio.

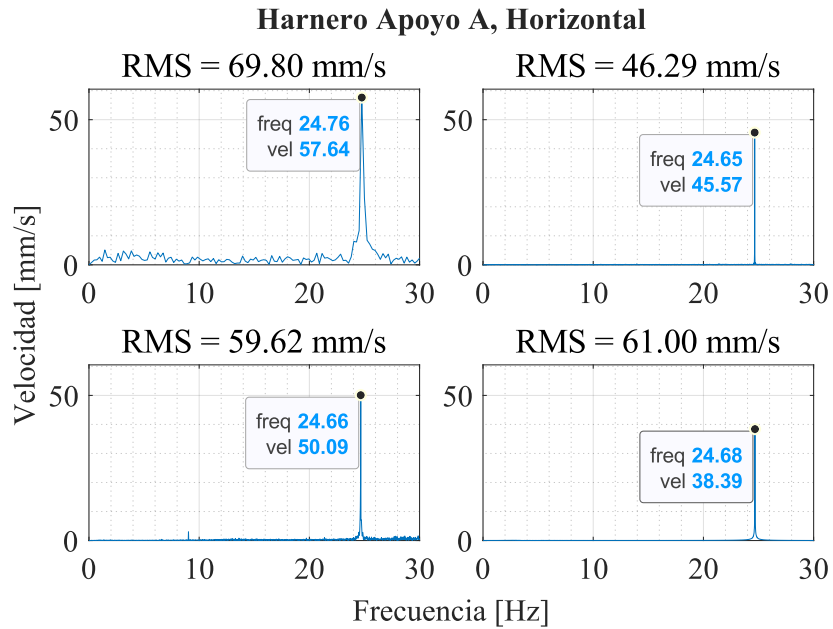


Figura 3.19 Espectros de velocidad harnero vibratorio dirección horizontal 3L (a): Grabación 960 FPS, (b): Grabación 60 FPS, (c): Grabación 120 FPS, (d): Medición acelerómetro.

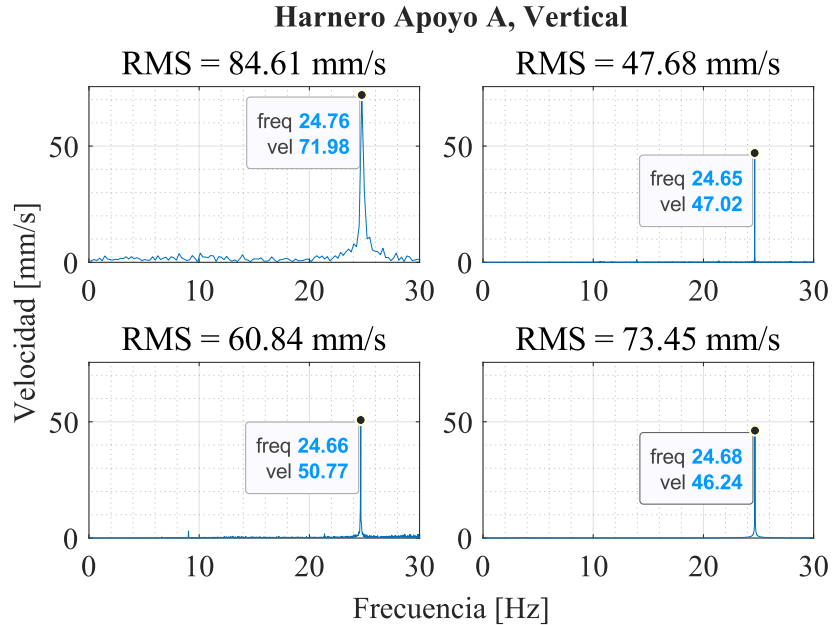


Figura 3.20 Espectros de velocidad harnero vibratorio dirección vertical 3L (a): Grabación 960 FPS, (b): Grabación 60 FPS, (c): Grabación 120 FPS, (d): Medición acelerómetro.

Respecto de las mediciones realizadas durante el funcionamiento en régimen estacionario del harnero, obtenidas mediante smartphone, es posible apreciar un comportamiento mar-

cadamente senoidal, con una única componente predominante asociada a la velocidad de rotación del excitador. De forma consistente con las mediciones realizadas utilizando los resortes antiguos y bajo condiciones equivalentes, y con un tiempo de adquisición suficiente, las mediciones realizadas a 60 FPS en resolución 4K presentan una mayor precisión en amplitud respecto de la medición de referencia obtenida con el acelerómetro. Por otro lado, las mediciones realizadas a 120 FPS en resolución FullHD presentan una mayor precisión en la estimación de la frecuencia. Este comportamiento se resume en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 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 | 24.65 | 24.67 | 0.06 % | 45.57 | 46.63 | 2.26 % |
| | 2 | 120 | 24.66 | 24.67 | 0.02 % | 38.74 | 46.63 | 16.91 % |
| | 3 | 960 | 24.78 | 24.67 | 0.47 % | 57.69 | 46.63 | 23.74 % |
| Vertical | 1 | 60 | 24.65 | 24.67 | 0.06 % | 47.02 | 46.63 | 0.85 % |
| | 2 | 120 | 24.66 | 24.67 | 0.02 % | 50.77 | 46.63 | 8.88 % |
| | 3 | 960 | 24.78 | 24.67 | 0.47 % | 72.05 | 46.63 | 54.53 % |

Al analizar los espectros obtenidos a partir de las mediciones realizadas con la cámara profesional, se observa un mayor error relativo tanto en amplitud como en frecuencia. Si bien los videos adquiridos presentan, en general, mejores características ópticas que aquellos registrados con smartphone, su uso se ve limitado por la capacidad del modelo de cámara de grabar un máximo de 4 segundos continuos, en contraste con cámaras especialmente diseñadas para la medición de movimiento.

Esta restricción en la duración de los registros se traduce en una menor resolución frecuencial en el espectro, lo que explica el aumento del error observado. En consecuencia, las ventajas de este tipo de cámaras dependen fuertemente de la aplicación considerada, siendo más apropiadas para análisis que no requieren una alta resolución frecuencial.

3.5. Pruebas en banco de ensayos Viga-resorte

Con el propósito de evaluar la capacidad del método propuesto, se realizan ensayos sobre un conjunto viga-resorte disponible en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción. Se configura el motor desbalanceado para operar a una frecuencia constante de 2017 rpm y generar un desplazamiento máximo en la viga de aproximadamente 5 mm p-p, simulando el comportamiento dinámico de un harnero vibratorio industrial.

Para el registro del movimiento, se instalan dos objetivos del tipo 2: uno situado en el punto medio entre el motor y el extremo libre de la viga (C2), y el segundo ubicado en la punta, zona de mayor amplitud vibratoria (C1), tal como se observa en la Figura 3.21.

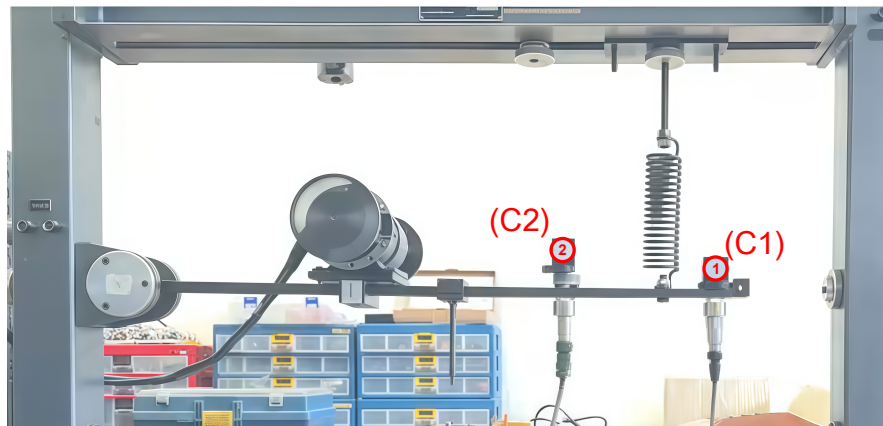


Figura 3.21 Configuración experimental y ubicación de los objetivos sobre la viga.

Se realizan un total de 20 mediciones en video a una frecuencia de adquisición de 120 FPS con resolución Full HD, posicionando la cámara a distintas distancias respecto de la viga, las cuales varían entre 800 y 4600 mm en intervalos constantes de 200 mm. Para evitar la influencia de la distorsión, la cámara se posiciona de manera que los objetivos circulares queden ubicados en el centro de la toma, y se aplica el algoritmo descrito en la Sección 2.2.6 para corregir la distorsión óptica.

A partir del análisis de los resultados, se determina una distancia máxima de medición de aproximadamente 4000 mm para el conjunto viga-resorte, correspondiente a la medición número 17. Para el tamaño específico del objetivo utilizado (26.5 mm de diámetro), se obtiene un diámetro del objetivo de 16.59 px y un desplazamiento de 4.1 px p-p, en contraste con el valor teórico esperado de 5 px, calculado a partir del factor de conversión píxel-milímetro obtenido mediante la medición con acelerómetro.

Por otra parte, en la medición número 18, a una distancia de 4200 mm, el diámetro del objetivo disminuye a 14.2 px. Si bien la amplitud vibratoria alcanza 2.82 px p-p, no es posible determinar correctamente su posición en cada fotograma debido a la baja definición de sus bordes y al reducido contraste con la superficie negra del marcador. El mismo comportamiento se observa en las mediciones 19 y 20, con diámetros de objetivo de 12.6 y 10.3 px, respectivamente.

Estos resultados muestran que la distancia máxima de medición está determinada por la capacidad del algoritmo para detectar los marcadores circulares y sus bordes, lo cual se encuentra directamente condicionado por la resolución espacial con la que estos aparecen en la imagen. Asimismo, la precisión de los resultados se ve afectada por la disminución del tamaño del objetivo en píxeles al aumentar la distancia de medición. Este aspecto debe considerarse al realizar mediciones en maquinaria de gran tamaño en una sola toma, ya que la necesidad de alejar la cámara reduce la amplitud de los objetivos en píxeles. En tales casos, resulta necesario evaluar la opción de dividir la escena para mejorar la resolución o, si la amplitud del movimiento es suficientemente grande, emplear objetivos de mayor tamaño.

A partir de estos resultados, se obtiene una relación mínima entre la distancia máxima de medición D_{max} y el diámetro del objetivo Z_{max} , dada por $D_{max}/Z_{max} = 0.15$.

Bajo el supuesto de mantener constante la configuración óptica del sistema de medición, el tamaño proyectado del objetivo en la imagen presenta una relación inversamente proporcional con la distancia de filmación y directamente proporcional con el diámetro real del marcador. En consecuencia, si la distancia entre la cámara y el objetivo se incrementa al doble, el tamaño del objetivo proyectado en la imagen se reduce aproximadamente a la mitad. A partir de esta relación geométrica, se obtiene una expresión que permite estimar la distancia máxima de medición en función del tamaño del objetivo, la cual puede expresarse como:

$$D_{max} \approx 0.150 \cdot Z_{real} \quad (3.1)$$

Donde D_{max} corresponde a la distancia máxima de filmación en metros y Z_{real} representa el diámetro del objetivo en milímetros. Esta expresión se asocia a la configuración experimental empleada y debe interpretarse como un criterio cuya extrapolación dependerá del teléfono utilizado y la resolución de video.

Siguiendo el trabajo realizado por Galvez et al. [19], al aumentar la distancia de medición también aumenta el error en amplitud esperado en la medición, por lo que debe evaluarse en cada caso la factibilidad de realizar mediciones a grandes distancias.

3.6. Pruebas con shaker electrodinámico

3.6.1. Aliasing en mediciones tomadas con smartphone

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 3.22.

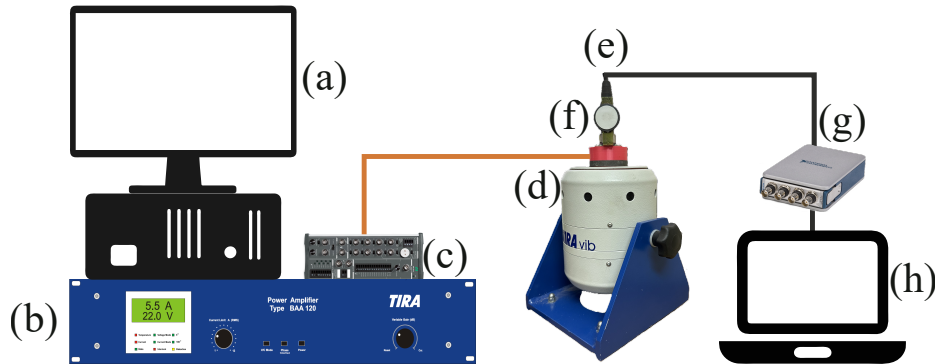


Figura 3.22 Montaje shaker electrodinámico: (a) Computador, (b) Amplificador, (c) Bloque conector BNC 2120, (d) Shaker, (e) Acelerómetro IMI 603C01, (f) Objetivo circular, (g) Módulo de entrada NI 9234, (h) Laptop.

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, al no cumplir con el teorema de Nyquist, la componente de 40 Hz se pliega en el espectro en frecuencia, mostrándose a una frecuencia menor que su valor real.

En la medición realizada a 48 FPS, se observaron 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 20.00 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 máximo de 0.01Hz y un error relativo máximo del 0.025%. Para las mediciones a 48 y 60 FPS se tiene respectivamente:

$$f_{M,1} = (0 + 1) \cdot 48 - 7.99 = 40.01 \text{ Hz} \quad (3.2)$$

$$f_{M,2} = (0 + 1) \cdot 60 - 20.00 = 40.00 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Los espectros de velocidad de las mediciones obtenidas directamente a través del procesamiento de los videos capturados, junto con el espectro de la medición de referencia del acelerómetro, se presentan en la Figura 3.23. Adicionalmente, para visualizar los resultados obtenidos, se incluye el espectro de velocidad generado a partir de la señal de desplazamiento reconstruida con el método propuesto, 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.

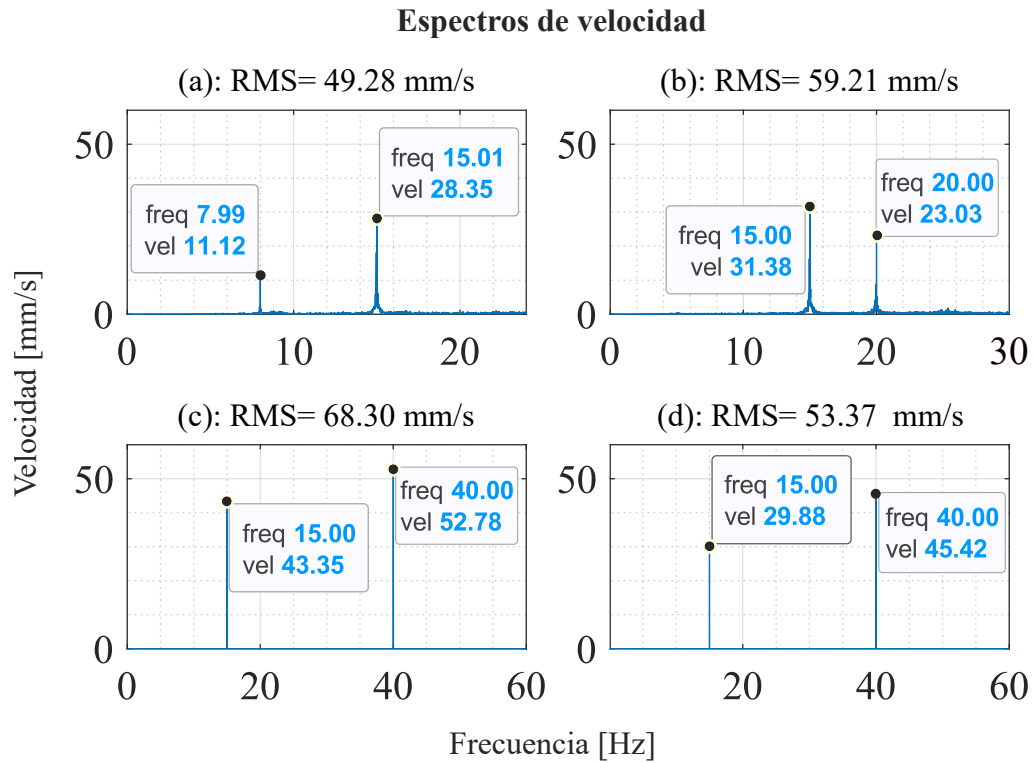


Figura 3.23 Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 1 (a): Medición 48 FPS. (b): Medición 60 FPS. (c): Componentes espectrales identificados. (d): Medición referencia acelerómetro 2048 FPS.

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:

$$f_{M,1} = (0 + 1) \cdot 48 + 2.00 = 50.00 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$$f_{M,2} = (0 + 1) \cdot 55 - 5.00 = 50.00 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

$$f_{M,3} = (0 + 1) \cdot 60 - 9.99 = 49.99 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

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 velocidad obtenidos directamente a partir del procesamiento de los videos capturados se presentan en la Figura 3.24. Por otro lado, la Figura 3.25 muestra los espectros de velocidad correspondientes a la medición de referencia y a la señal reconstruida con el método propuesto, 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 muestra que el método es efectivo como 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

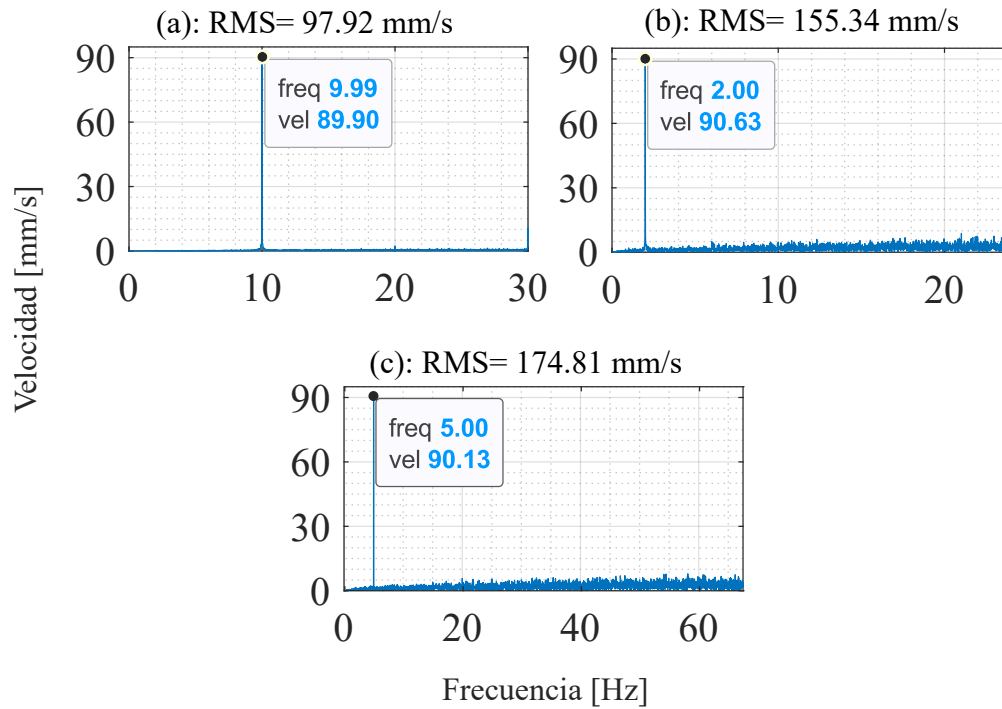


Figura 3.24 Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 (a): Medición a 60 FPS. (b) Medición 48 FPS. (c): Medición 55 FPS.

Espectros de velocidad

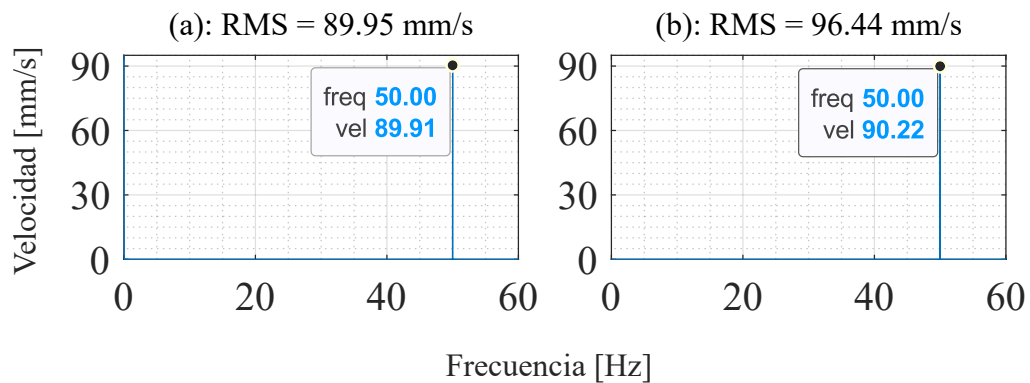


Figura 3.25 Espectros en frecuencia velocidad medición configuración 2 (a): Medición de referencia acelerómetro 2048 FPS. (b) Componente espectral con aliasing corregido.

3.6.2. Amplificación de movimiento

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 3.26 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 px.

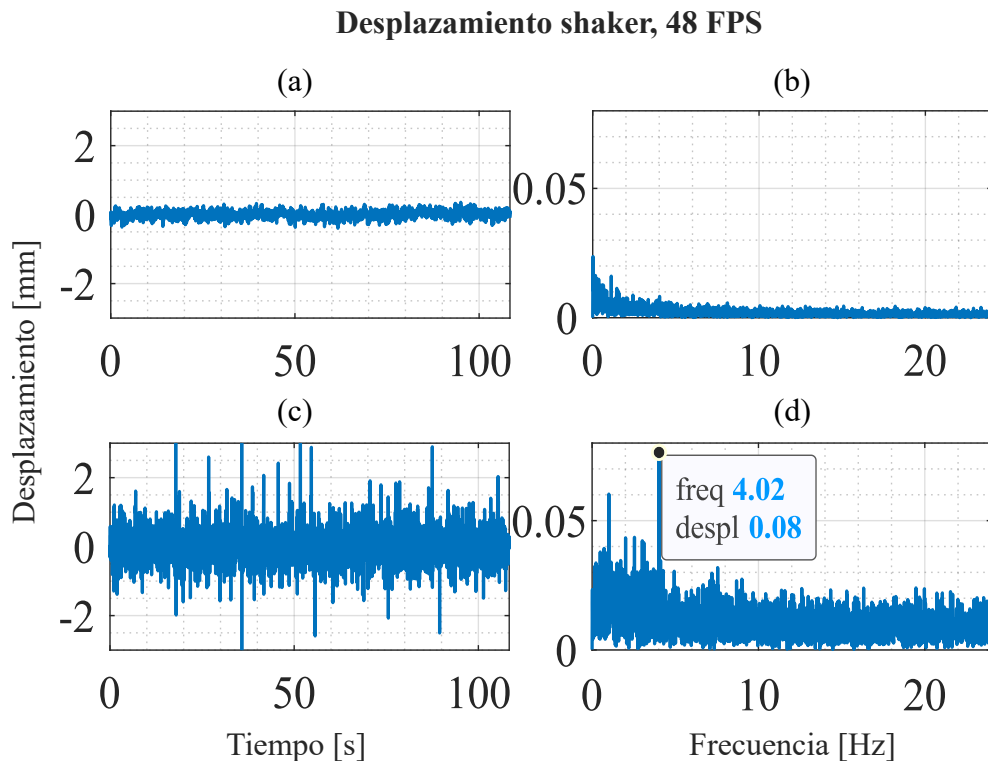


Figura 3.26 Desplazamiento shaker electrodinámico, grabación 48 FPS (a): Forma de onda video original. (b) Espectro en frecuencia video original. (c): Forma de onda video con movimiento amplificado. (d): Espectro en frecuencia video con movimiento amplificado.

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. 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 3.27, que muestra un fotograma correspondiente al mismo instante de tiempo tanto en el video original como en el video con el movimiento amplificado.

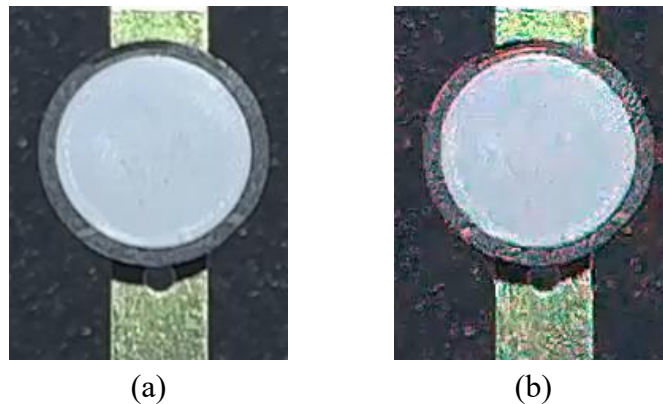


Figura 3.27 Fotograma medición shaker, 48 FPS (a) video original, (b) video con el movimiento amplificado.

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.

3.7. Pruebas en conjunto moto-compresor

Para las mediciones realizadas sobre el conjunto moto-compresor, se instalaron tres objetivos circulares del tipo 2 en el equipo. Uno de ellos se ubicó en la zona central, entre los dos pistones dispuestos en configuración en V, mientras que los dos restantes se instalaron en cada uno de los costados del compresor, tal como se muestra en la Figura 3.28.

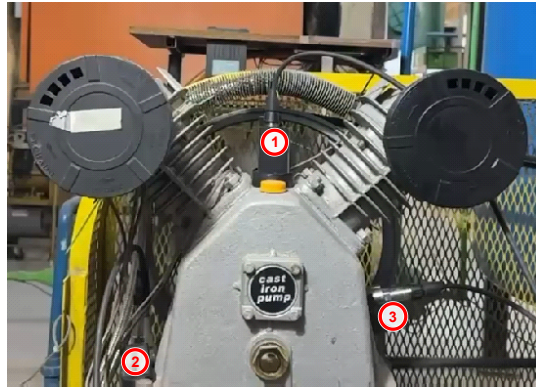


Figura 3.28 Puntos de medición en el conjunto moto-compresor.

Se realizaron cuatro mediciones a 240 FPS en resolución HD, considerando diferentes presiones del estanque que alimenta al compresor, correspondientes a 4, 6, 8 y 10 bar. Los espectros de velocidad obtenidos a partir de las mediciones de desplazamiento, junto con su comparación con las mediciones de referencia realizadas mediante acelerómetros, se presentan en la Figura 3.29 para la componente horizontal del objetivo 3 y en la Figura 3.30 para la componente vertical del objetivo 1.

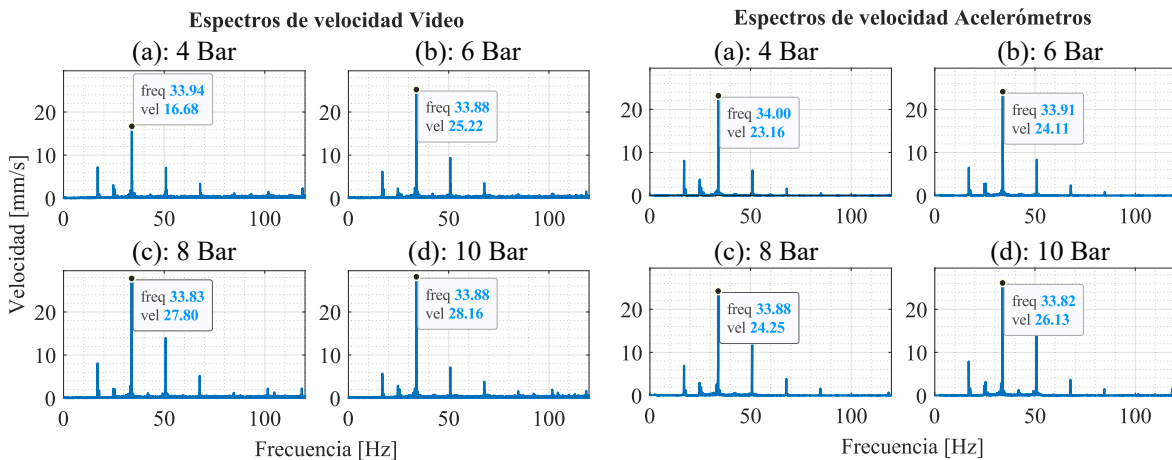


Figura 3.29 Espectros de velocidad en la dirección horizontal objetivo 3 con presión de estanque variable (a) 4 bar. (b) 6 bar. (c) 8 bar. (d) 10 bar.

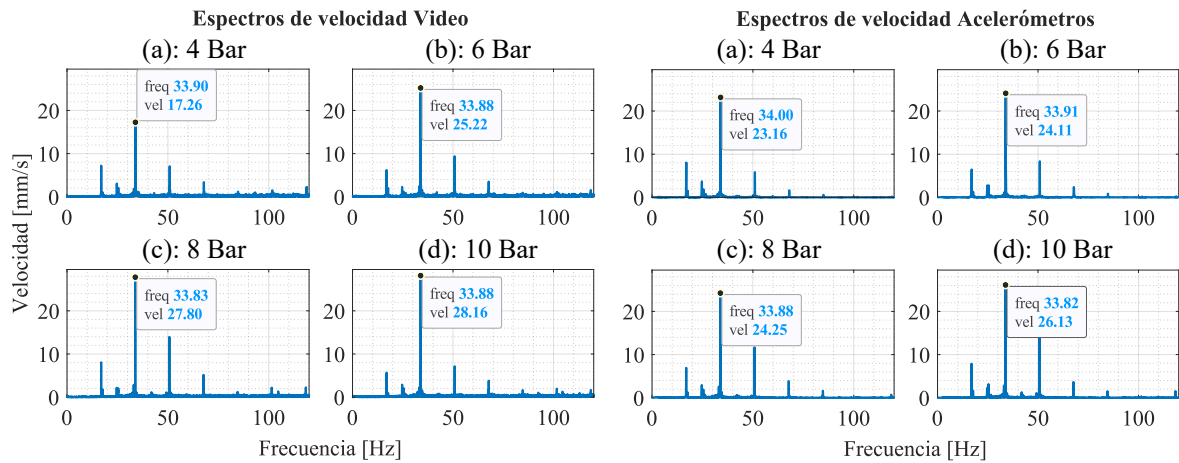


Figura 3.30 Espectros de velocidad en la dirección vertical objetivo 1 con presión de estanque variable (a) 4 bar. (b) 6 bar. (c) 8 bar. (d) 10 bar.

A partir de las mediciones realizadas, se observa que el equipo presenta un contenido espectral claramente identificable en el rango de frecuencias analizado, permitiendo distinguir los primeros armónicos múltiples de la velocidad de rotación sin verse afectados por fenómenos de aliasing. Tanto en los resultados obtenidos mediante procesamiento de video como en aquellos medidos con acelerómetros se aprecia una tendencia consistente de la componente principal, correspondiente al segundo armónico de la velocidad de rotación (2X), a aumentar su amplitud a medida que se incrementa la presión del estanque, tanto en la componente horizontal como en la vertical.

3.8. Pruebas en Generador diésel

Para las mediciones realizadas se instalaron dos objetivos circulares en el costado del motor de combustión del generador diésel, uno correspondiente a cada tipo de objetivo utilizado en esta investigación, tal como se muestra en la Figura 3.31. Se efectuaron tres mediciones a 240 FPS y resolución HD utilizando la combinación de trípode y estabilizador. Se midió bajo distintas condiciones de carga: funcionamiento sin carga conectada, conexión de un calefactor de 2000 W y conexión simultánea de dos ventiladores de igual potencia eléctrica.

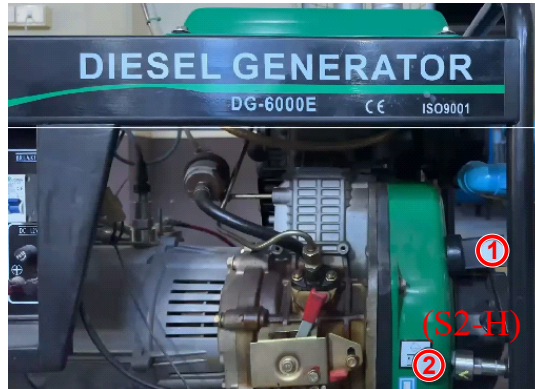


Figura 3.31 Puntos de medición en generador diésel.

Los espectros de velocidad horizontal obtenidos en el objetivo 2 a partir del procesamiento de video se muestran en las Figuras 3.32, mientras que en la Figura 3.33 se muestran las señales obtenidas con el acelerómetro de referencia.

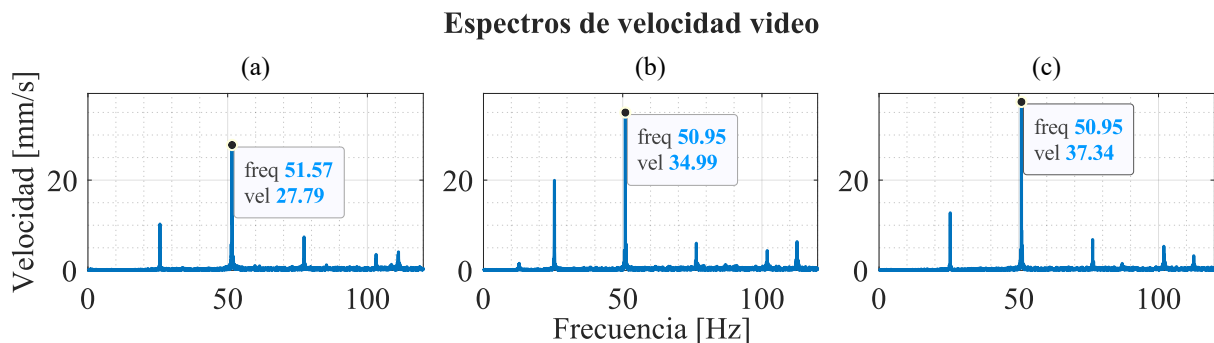


Figura 3.32 Espectros de velocidad video horizontal objetivo 2 (a) Sin carga. (b) Ventilador conectado. (c) Dos ventiladores conectados.

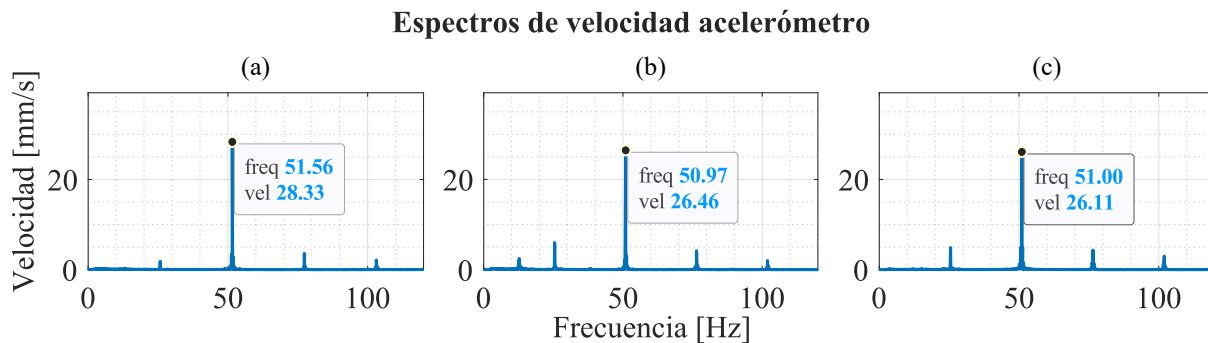


Figura 3.33 Espectros de velocidad acelerómetro horizontal objetivo 2 (a) Sin carga. (b) Ventilador conectado. (c) Dos ventiladores conectados.

Al analizar los resultados es posible identificar claramente la componente asociada a la velocidad de rotación del generador, cercana a 50 Hz, junto con la presencia de algunos subarmónicos, tanto en las mediciones obtenidas mediante procesamiento de video como en aquellas registradas con acelerómetros. En los espectros obtenidos a partir de video se observa adicionalmente una componente de baja amplitud en torno a los 112.5 Hz, la cual se atribuye al fenómeno de aliasing, correspondiente a una componente real de frecuencia aproximada de 127.5 Hz.

Al tratarse de un motor diésel monocilíndrico de cuatro tiempos, la presencia de una componente en torno a 125 Hz es consistente con un armónico de la frecuencia de combustión del motor, definida como $F_{\text{exp}} = 0.5 X \approx 25$ Hz, correspondiendo específicamente a su quinto armónico.

Asimismo, tanto en las mediciones realizadas con video como con acelerómetros se aprecia una ligera disminución de la frecuencia de la componente 1X al conectar el primer ventilador, mientras que la conexión del segundo ventilador no produce una variación significativa adicional en dicha frecuencia.

3.9. Pruebas en harnero vibratorio minero

Con el propósito de poner a prueba el método propuesto en esta investigación, se realizó un conjunto de mediciones sobre un harnero vibratorio industrial de la marca Schenck Process modelo SLK3673W, ubicado en el área de molienda de la planta concentradora de la minera Centinela, propiedad de Antofagasta Minerals. El objetivo principal fue evaluar la viabilidad del método en un caso de aplicación industrial real, caracterizado por un entorno de alta vibración, utilizando exclusivamente la cámara de un teléfono inteligente, sin el empleo de equipamiento adicional.

Las mediciones se realizaron en los mismos cuatro puntos monitoreados habitualmente por el equipo de confiabilidad durante las rutinas de medición de la planta, correspondientes a las zonas de alimentación derecha (AD), alimentación izquierda (AI), descarga derecha (DD) y descarga izquierda (DI), los cuales se muestran en la Figura 3.34.

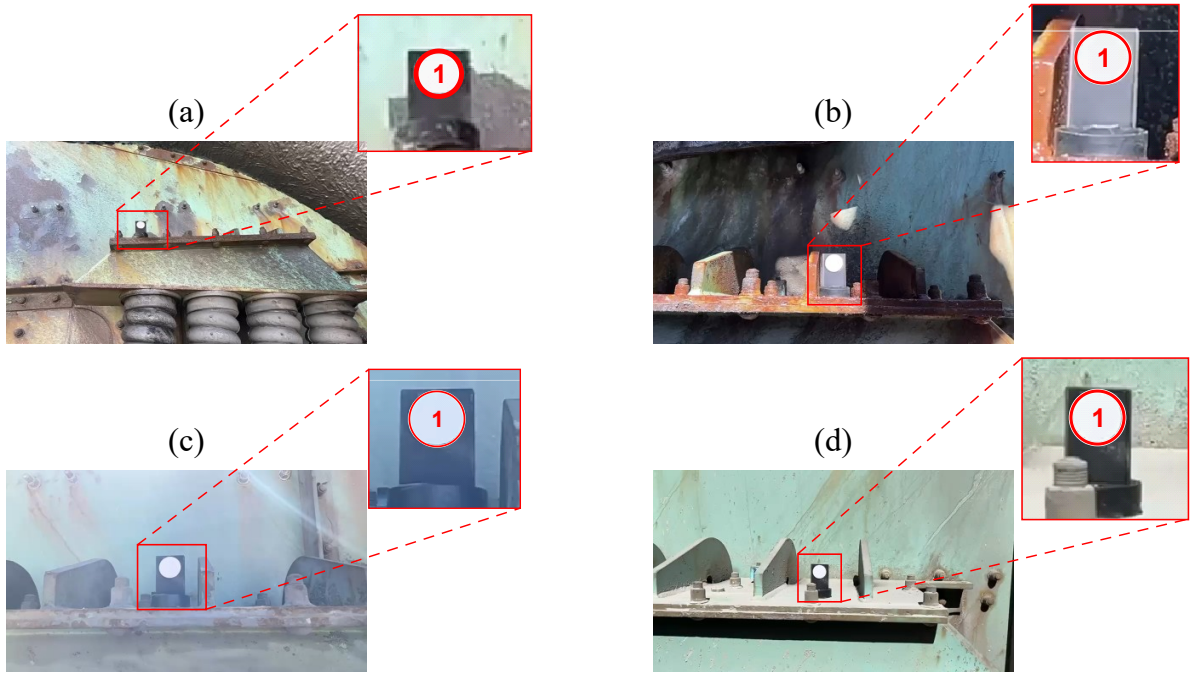


Figura 3.34 Puntos de medición Harnero Minero (a) Alimentación Izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga Izquierda. (d) Descarga Derecha.

Este harnero presenta dimensiones significativas de 8.540 mm (largo) \times 5.971 mm (ancho) \times 3.032 mm (alto); por lo tanto, para obtener mejores resultados, se realizaron cuatro mediciones en resolución HD a 240 FPS con un teléfono iPhone, una en cada apoyo del harnero. Los espectros de desplazamiento obtenidos a partir de las mediciones se muestran en la Figura 3.35 para el componente horizontal y en la Figura 3.36 para el componente vertical.

Adicionalmente, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante procesamiento de imágenes y aquellos correspondientes a las mediciones de rutina efectuadas con acelerómetros piezoeléctricos. En la Figura 3.37 se presenta la comparación de las órbitas en los cuatro puntos de medición, mientras que en la Tabla 3.8 se muestra la comparación de los parámetros comúnmente evaluados por el equipo de mantenimiento, específicamente el ángulo de la órbita y el *stroke*.

Tabla 3.8 Comparación Experimental de Parámetros Operativos

| Ubicación | <i>stroke</i> (mm) | | | | Ángulo (°) | | | |
|-----------------|--------------------|-------|-------|--------|------------|-------|-------|--------|
| | Ref. | Video | Error | | Ref. | Video | Error | |
| Alim. Der. (AD) | 7.8 | 6.6 | 1.2 | 15.4 % | 42.6 | 48.2 | 5.6 | 13.1 % |
| Alim. Izq. (AI) | 8.5 | 7.8 | 0.7 | 8.2 % | 41.0 | 41.5 | 0.5 | 1.2 % |
| Desc. Der. (DD) | 6.5 | 6.6 | 0.1 | 1.5 % | 52.9 | 53.9 | 1.0 | 1.9 % |
| Desc. Izq. (DI) | 6.8 | 7.3 | 0.5 | 7.4 % | 51.6 | 47.8 | 3.8 | 7.4 % |

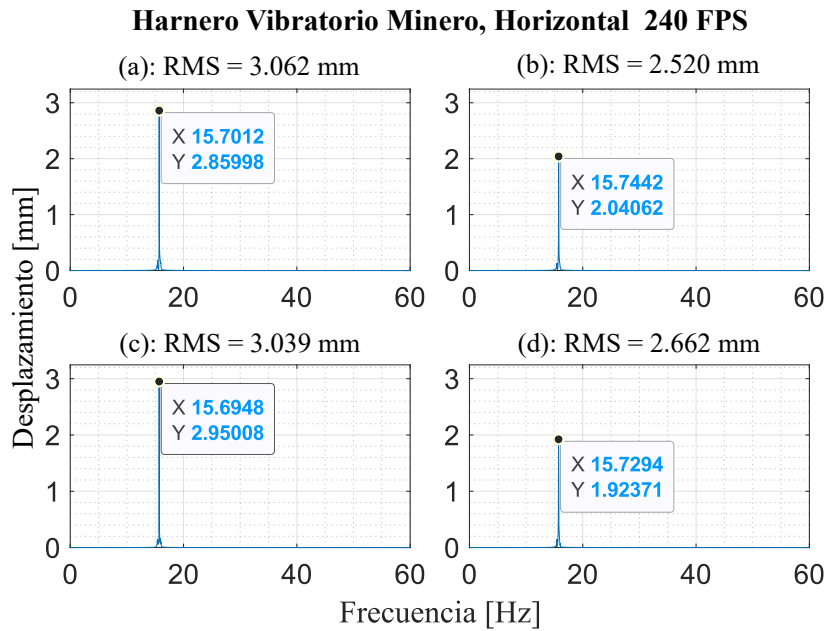


Figura 3.35 Espectros de Desplazamiento harnero industrial dirección horizontal (a) Alimentación izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga izquierda. (d) Descarga derecha.

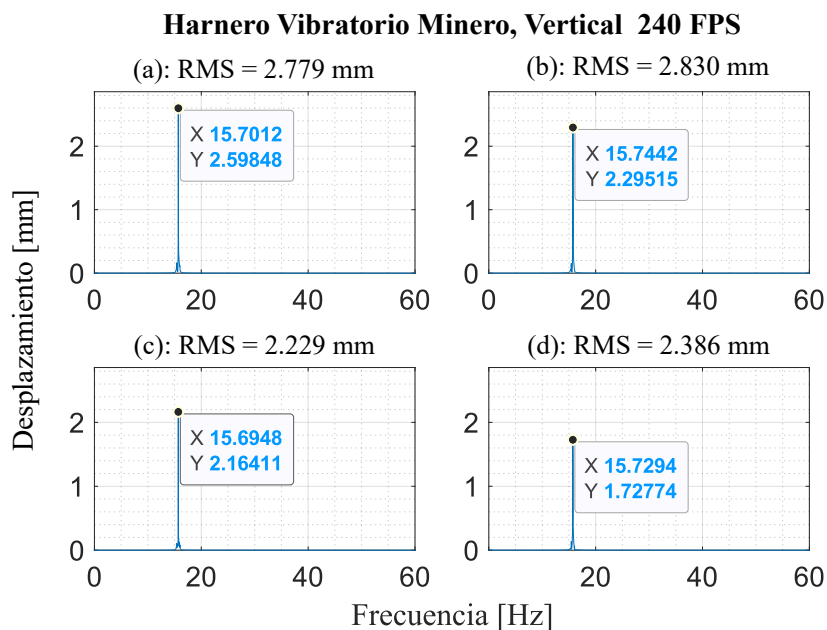


Figura 3.36 Espectros de Desplazamiento harnero industrial dirección vertical (a) Alimentación izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga izquierda. (d) Descarga derecha.

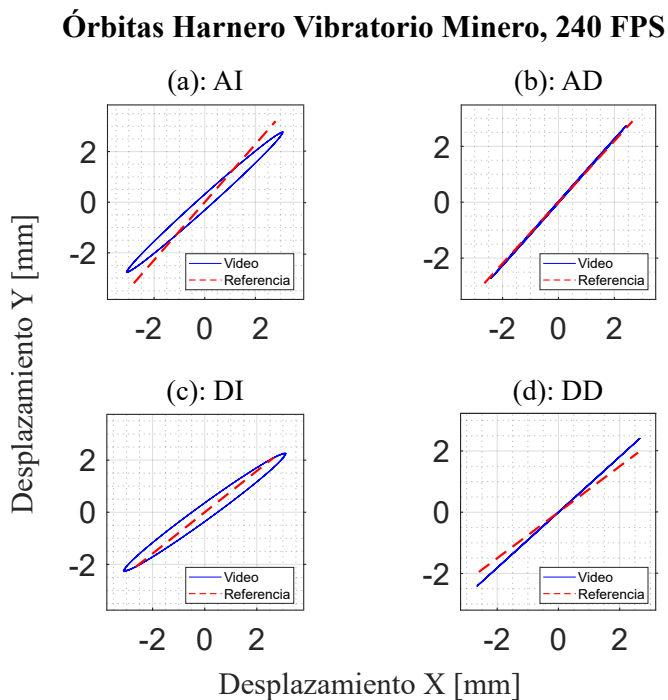


Figura 3.37 Órbitas de Desplazamiento harnero industrial (a) Alimentación izquierda. (b) Alimentación derecha. (c) Descarga izquierda. (d) Descarga derecha.

Debido a que las mediciones fueron realizadas a mano, se aplicó un filtro pasa alto con frecuencia de corte de 12 Hz con el objetivo de reducir el efecto del movimiento de la mano durante la adquisición. En todas las mediciones realizadas se obtuvieron espectros bien definidos, identificándose una única componente senoidal predominante con una frecuencia aproximada de 15.7 Hz.

Al analizar las órbitas obtenidas, se observó un error máximo en el *stroke* de 15.4% en la zona de alimentación derecha, mientras que en los demás puntos los errores fueron inferiores al 10%. En la estimación del ángulo de la órbita se registraron, en general, errores de magnitud porcentual similar, con valores entre 1.2% (0.5°) en la zona de alimentación izquierda y 13.1% (5.6°) en la zona de alimentación derecha. Este comportamiento puede atribuirse principalmente a la inestabilidad inherente a las mediciones realizadas manualmente, la cual, además de inducir movimientos de baja frecuencia, puede generar variaciones en el ángulo de la cámara respecto del equipo medido y en la distancia de medición entre los objetivos circulares y el teléfono. Adicionalmente, no se realizó corrección óptica en los videos obtenidos, sin embargo, debido al centrado de los objetivos en las grabaciones, no se esperan diferencias significativas en los resultados.

Si bien los resultados obtenidos presentan limitaciones, el uso de la cámara de un smartpho-
ne se muestra como una alternativa rápida y de bajo costo para la medición de vibraciones en harneros vibratorios, incluso en entornos industriales caracterizados por altos niveles de vibración.

CAPÍTULO 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 la medición de vibraciones. Su uso ofrece una herramienta de bajo costo para el análisis vibratorio de objetos y estructuras, permitiendo medir vibraciones de alta amplitud a distancias de hasta 4 m, utilizando objetivos circulares de 26.5 mm de diámetro.

Si bien los resultados no coinciden exactamente con los obtenidos mediante acelerómetros, la técnica se presenta como una primera aproximación efectiva para la evaluación del estado vibratorio de harneros industriales utilizados en minería. En particular, en la validación realizada sobre un harnero vibratorio industrial, se obtuvieron errores máximos de 15.4 % en *stroke* y de 13.1 % en el ángulo orbital, con un error angular absoluto máximo de 5.6°. Estos resultados muestran que la metodología es capaz de identificar parámetros operacionales relevantes y de apoyar decisiones de diagnóstico en terreno, aun bajo condiciones de adquisición manual y en un entorno de alta vibración.

El uso de un estabilizador para teléfonos inteligentes se presenta como un complemento adecuado para la medición de vibraciones mediante video, al aportar una mayor estabilidad durante la captura. Su utilización resulta especialmente útil en ambientes de alta vibración y en situaciones donde no se dispone del espacio o de las condiciones necesarias para el uso de un trípode.

El seguimiento de objetivos circulares demostró ser un método preciso para la determinación del movimiento. En la práctica, dicha precisión se ve influenciada tanto por la resolución espacial del video como por su frecuencia de adquisición. En equipos de gama media y alta, el aumento de la tasa de fotogramas suele implicar una disminución de la resolución de imagen, lo que introduce un compromiso entre resolución temporal y espacial que debe ser evaluado cuidadosamente para cada aplicación. A pesar de estas limitaciones, el método mostró un desempeño satisfactorio tanto en ensayos de laboratorio como en un entorno industrial de alta vibración. Si bien los resultados no coinciden exactamente con los obtenidos mediante acelerómetros, la técnica se presenta como una primera aproximación efectiva para la evaluación del estado vibratorio de harneros industriales utilizados en minería, permitiendo identificar características relevantes como frecuencias naturales y apoyar decisiones de rediseño estructural o de montaje.

La corrección de la distorsión resulta especialmente relevante para reducir el nivel de ruido en puntos de medición ubicados cerca de los bordes del campo visual, los cuales suelen verse más afectados por efectos ópticos, perdiendo relevancia cuando los objetivos se encuentran en el centro geométrico del video.

La amplificación del movimiento, si bien puede resultar ventajosa en determinadas aplica-

ciones, incrementa la sensibilidad del procesamiento al ruido presente en la señal original, amplificando tanto las componentes dinámicas de interés como aquellas asociadas a incertidumbres de medición. En consecuencia, su implementación debe evaluarse en función de las condiciones específicas de medición y su objetivo. Cuando se conoce previamente el rango de frecuencias de interés y se aplica un filtrado adecuado, esta técnica puede emplearse como una herramienta complementaria de visualización, aportando apoyo a la medición tradicional de vibraciones sin reemplazarla como método principal.

Finalmente, el empleo de técnicas complementarias como la animación tridimensional de estructuras constituye una herramienta de apoyo visual para el análisis de vibraciones, facilitando la interpretación de los resultados y la comprensión del comportamiento dinámico de los sistemas estudiados.

4.2. Perspectivas

Como trabajo futuro, se proponen las siguientes líneas de desarrollo:

- El diseño de una aplicación móvil que permita realizar el proceso completo de medición directamente en el teléfono utilizado para la grabación del video.
- El diseño de un dispositivo que permita utilizar el teléfono inteligente como sistema de adquisición de datos en paralelo a la grabación de video.
- La realización de ensayos en distintos equipos industriales en condiciones reales de operación.

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. Pals-son, “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://fotografiaprincipiantes.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 Ascacibar, 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 A: 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 C_px = zeros(n_frames, app.n_ptos, 2);
7 d_i = zeros(n_frames, app.n_ptos);
8 d_px_aprox = app.Diametroenpxaprox.Value;
9 min_radius = round(d_px_aprox / 2 - ((d_px_aprox / 2) * 0.1))
   ;
10 max_radius = round(d_px_aprox / 2 + ((d_px_aprox / 2) * 0.1))
   ;
11 first_frame = read(app.video, 1);
12 [centres, radii] = imfindcircles(first_frame, [min_radius,
   max_radius], 'Sensitivity', 0.96, 'Method', 'TwoStage');
13 factor_conversion = (app.d_mm / mean(selected_radii * 2));
14 d_px1 = mean(selected_radii * 2);
15 for i = 1:n_frames
16     if ~isempty(centres)
17         for p = 1:app.n_ptos
18             distances = sqrt((centres(:, 1) -
   selected_circles(p, 1)).^2 + (centres(:, 2) -
   selected_circles(p, 2)).^2);
19             [~, idx] = min(distances);
20             c_i = centres(idx, :);
21             d_j = radii(idx) * 2;
22             d_i(i, p) = d_j;
23             C_px(i, p, :) = c_i;
24         end
25     end
26 end
27 app.r = app.d_mm / d_px1;
28 app.D = ((C_ref * app.r) * -1);
```

Anexo B: Código MATLAB para Calibración y Corrección Óptica

Listing 2 Código MATLAB para calibración de cámara y corrección de distorsión

```
1
2 [calibrationVideoFile, calibrationVideoPath] = ...
3     uigetfile({'*.mp4;*.avi;*.mov','Videos'}, ...
4         'Seleccione el video de calibracion');
5 calibrationVideo = fullfile(calibrationVideoPath,
6     calibrationVideoFile);
7 vCal = VideoReader(calibrationVideo);
8 nFrames = 480;
9 idx = round(linspace(1, vCal.NumFrames, nFrames));
10
11 tmpFolder = tempname;
12 mkdir(tmpFolder);
13 for k = 1:nFrames
14     frame = read(vCal, idx(k));
15     imwrite(frame, fullfile(tmpFolder, sprintf('f%03d.jpg',k)
16         ));
17 end
18 images = dir(fullfile(tmpFolder, '*.jpg'));
19 imageFileNames = fullfile(tmpFolder, {images.name});
20 [imagePoints, boardSize] = detectCheckerboardPoints(
21     imageFileNames);
22 squareSize = 30;
23 worldPoints = generateCheckerboardPoints(boardSize,
24     squareSize);
25 cameraParams = estimateCameraParameters(imagePoints,
26     worldPoints, ...
27     'EstimateSkew', false, ...
28     'EstimateTangentialDistortion', true, ...
29     'NumRadialDistortionCoefficients', 3, ...
30     'WorldUnits', 'millimeters');
31 %% Correccion de video
32 [inputVideoFile, inputVideoPath] = ...
33     uigetfile({'*.mp4;*.avi;*.mov','Videos'}, ...
34         'Seleccione el video a corregir');
35 inputVideo = fullfile(inputVideoPath, inputVideoFile);
36 [outputVideoFile, outputVideoPath] = ...
37     uigetfile({'*.mp4','MP4 (*.mp4)'}, ...
38         'Guardar video corregido como');
39 outputVideo = fullfile(outputVideoPath, outputVideoFile);
```

```
35 vIn = VideoReader(inputVideo);
36 vOut = VideoWriter(outputVideo, 'MPEG-4');
37 open(vOut);
38 while hasFrame(vIn)
39     frame = readFrame(vIn);
40     frameUnd = undistortImage(frame, cameraParams, ...
41         'OutputView', 'same');
42     writeVideo(vOut, frameUnd);
43 end
44 close(vOut);
```

(a)



(b)

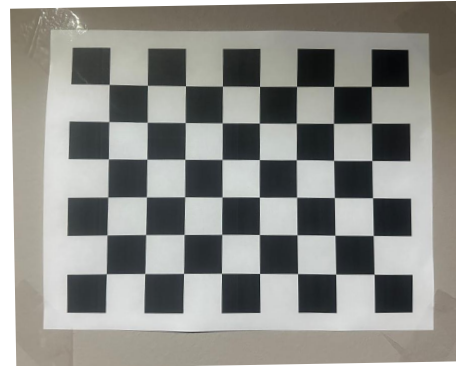


Figura .1 Demostración algoritmo corrección distorsión (a) Imagen original. (b) Imagen corregida.