

Quantification system of mechanical vibrations using a CCD transducer

Sistema para la cuantificación de vibraciones mecánicas empleando un transductor CCD

Luis Barbosa-Santillán¹, Antonio Castillo-Cervantes^{*1}, Abdías Calvario-González¹, Mirna Juárez-Varela¹, and Micheline Castuera-Chávez¹

¹Universidad Tecnológica de Puebla (UTP),
Sistemas Automotrices,

Antiguo Camino a la Resurrección 1002-A, Zona Industrial, Puebla, Pue., México, 72300.
{luis.barbosa,juan.castillo,abdias.calvario,mirna.juarez,micheline.castuera}@utpuebla.edu.mx

Abstract

In this article, a methodology is presented to obtain the temporal displacement and the frequency spectrum corresponding to a mechanical vibration. The main work contribution consists in the implementation of an optical transducer, as part of the machinery failure prediction system. The proposed methodology consists of the following steps: video acquisition, image extraction, gray conversion, thresholding, filtering, labeling, pattern extraction, storage, frequency domain conversion, and graphical presentation of the results. As results, the temporal displacement and the characteristic frequency spectrum of a mechanical failure due to imbalance are obtained through image analysis.

Keywords— Mechanical vibrations, transducer, image analysis.

Resumen

En este artículo, se presenta una metodología para obtener el desplazamiento temporal y el espectro de frecuencia correspondientes a una vibración mecánica. La aportación principal del trabajo consiste en la implementación de un transductor óptico, como parte del sistema de predicción de fallas en maquinarias. La metodología propuesta consiste en los siguientes pasos: adquisición del video, extracción de imagen, conversión a grises, umbralado, filtrado, etiquetado, extracción de patrones, almacenamiento, conversión al dominio de frecuencia y

la presentación gráfica de los resultados. Como resultados se obtienen el desplazamiento temporal y el espectro de frecuencia característicos de una falla mecánica por desbalance, a través del análisis de imágenes.

Palabras clave— Vibraciones mecánicas, transductor, análisis de imágenes.

I. Introducción

El análisis de vibraciones mecánicas para el diagnóstico en el contexto del mantenimiento predictivo en maquinarias rotativas, ha tenido un gran auge en las últimas décadas en múltiples industrias [1]. Las máquinas en funcionamiento generan vibraciones que contienen información sobre su estado físico. Típicamente se utiliza un palpador para medir esta vibración, el sensor debe montarse en un punto apropiado de la máquina (por ejemplo, el soporte del rodamiento). El instrumento mide la señal de vibración recogiendo la amplitud y frecuencia de las vibraciones, para procesarlas y predecir posibles fallos de la máquina rotatoria. Los fallos más frecuentes son defectos en rodamientos, desequilibrio, desalineación y holguras. En este trabajo se pretende capturar la vibración a través de un medio óptico y generar un vector característico que pueda ser asociado a alguna de estas fallas.

Para lograr este objetivo se construyó un equipo rotatorio para simular la falla mecánica de desbalance, mediante un disco perforado capaz de generar vibraciones proporcionales a la magnitud y posición de un peso insertado estratégicamente en su periferia. El desbalance ocurre cuando el eje principal de inercia del rotor no

* Autor de correspondencia

coincide con el eje geométrico del sistema, lo que provoca vibraciones que generan fuerzas indeseables que se transmiten directamente a los elementos de la máquina, como soportes y cojinetes del rotor. Los instrumentos de medición tradicionales captan el patrón de vibración temporal (espectro de vibración) empleando palpadores, registrando la amplitud y frecuencia de la vibración mediante velocímetros y acelerómetros; estos espectros pueden ser clasificados con diversas técnicas de Inteligencia Artificial (IA) como: el *k* vecino más cercano (*k*-NN), máquinas de soporte vectorial (SVM), redes neuronales (NN) y *deep learning*, para el diagnóstico de fallas de maquinaria rotativa [2].

Recientemente han sido publicados trabajos que ocupan cámaras para conseguir patrones vibratorios, por ejemplo [3] emplea una cámara aérea esférica ubicada en una aeronave de transporte para obtener la vibración a diferentes frecuencias.

Por otro lado [4] presenta un estudio experimental sobre la medición con múltiples cámaras síncronas de la flexión de una viga excitada por una fuerza transversal. El estudio muestra que la precisión de las mediciones aumenta significativamente a medida que la configuración está equipada con un número mayor de cámaras.

Para obtener la información de la vibración inducida por desbalance, en este trabajo experimental se diseñaron unas marcas circulares, adheribles y reflejantes, las cuales se fijaron a la máquina para registrar su evolución vibratoria espacial. Estas marcas fueron captadas empleando un sensor digital tipo CCD y procesadas, empleando técnicas de análisis de imágenes para generar un vector de desplazamiento temporal asociado a su vibración y, por ende, a la vibración de la máquina.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se describen los elementos empleados para la construcción del sistema de adquisición de patrones vibratorios basados en un sensor tipo CCD, así mismo, se establecen los niveles y ajustes configurados sobre la cámara. En la sección III se detalla la metodología propuesta para conseguir la información vibratoria de una máquina sujeta a desbalance. Finalmente, en las secciones IV y V se muestran los resultados obtenidos y las conclusiones de las pruebas realizadas.

II. Prototipo para la adquisición de datos

Se muestran los elementos del equipo utilizado en el presente estudio en la Figura 1. El sensor CCD usado para el prototipo pertenece a un smartphone Samsung modelo SM-G531H, con una resolución de $2,048 \times 1,152$ píxeles y una profundidad de 24 bits. El sistema cámara-objeto no fue aislado del ambiente externo y de la luz natural, sin embargo, la iluminación fue complementada con una lámpara fluorescente circular (32 W, 1900 lm), tempe-

ratura de color de 6500 K y diámetro de bombilla de (11-9-64) pulgadas. Los parámetros de la cámara se configuraron de la siguiente manera: apertura del diafragma – $f/2.2$, tiempo de exposición – $1/120$ s, sensibilidad del sensor – ISO-50, distancia focal – 3 mm.

En la parte superior de la Figura 1 se muestra el diseño mecánico de las partes que componen la máquina rotatoria, capaz de generar una vibración causada por desbalance en uno de sus cuatro discos perforados, mientras que en la parte inferior podemos observar la máquina ensamblada dentro del sistema óptico para la captura de la información vibratoria.

III. Método

El método consta de diez pasos para extraer información de los datos contenidos en las imágenes capturadas en video. Los cuales se enlistan a continuación:

1. Adquisición del video.
2. Extracción de una imagen.
3. Conversión de RGB a tonos de grises.
4. Umbralado de la imagen.
5. Relleno de objetos de interés y eliminación de objetos pequeños.
6. Etiquetado de componentes conectados.
7. Extracción de patrones.
8. Almacenamiento.
9. Conversión del dominio del tiempo al de frecuencia sobre los datos almacenados.
10. Presentación del espectro de vibración en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Adicionalmente se muestran estos pasos en forma gráfica en la Figura 8.

III.1. Adquisición del video

Para la adquisición del video se cuidó que las vibraciones registradas se debieran exclusivamente a la vibración de la máquina evitando la adición de vibraciones ajenas como por ejemplo, las causadas por una incorrecta sujeción del sensor que captura la información. Además, se fijó la distancia a 40 cm entre la cámara y la máquina para evitar distorsiones de tamaño debidas a la cercanía o lejanía del objeto en estudio. Se colocó una pesa de 20 gramos en el disco externo derecho sobre el orificio más alejado al eje de rotación para desbalancear artificialmente la máquina. Se arrancó el motor de corriente directa ocasionando una velocidad de giro aproximada del disco perforado de 180 rpm. Finalmente, la adquisición del video se configuró a treinta cuadros por segundo (30 fps) velocidad suficiente para registrar las vibraciones originadas por desbalance.

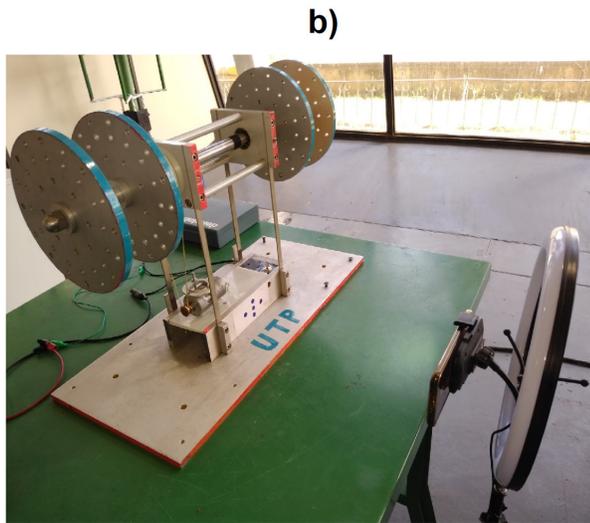
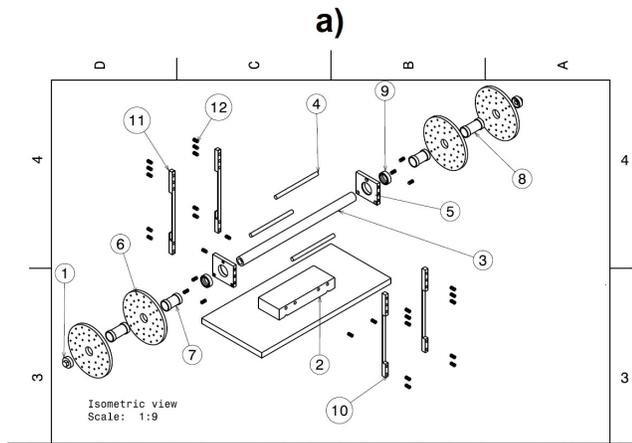


Figura 1: Prototipo de Máquina vibratoria
 a) Plano en explosión de las partes para el ensamble.
 b) Sistema empleado para generar y capturar la vibración

III.2. Extracción de una imagen

Para procesar el video se extrajeron cuadro por cuadro cada una de sus imágenes empleando el software de procesamiento de datos *MATLAB*, por ejemplo en la Figura 2 se aprecia el cuadro número 471 de un video de 16 segundos de duración (480 frames). Se concentró la filmación del video en las marcas circulares fabricadas con material reflejante, logrando así que se destaquen de la escena.

III.3. Conversión de RGB a tonos de grises

Con el objetivo de facilitar el segmentado de las marcas circulares, se transforman las capas de color verde, roja y azul que componen la imagen original a su equivalente en tonos de grises, logrando así que los píxeles pertenecientes a las marcas adquieran el tono blanco máximo

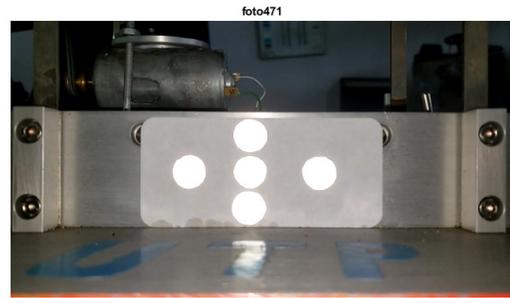


Figura 2: Cuadro que muestra las marcas circulares adheridas a una sección del prototipo

(255) y no así los demás píxeles que corresponden al fondo de la imagen, ver Figura 3.

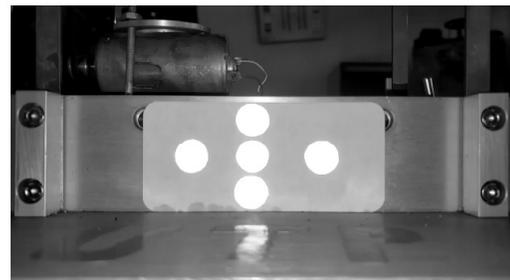


Figura 3: Imagen resultante después de la conversión a tonos de grises

III.4. Umbralado de la imagen

Uno de los procedimientos más complicados durante el procesamiento de las imágenes es la segmentación [5], ya que al separar objetos de interés del resto de la imagen no existe un algoritmo satisfactorio para todos los casos; sin embargo, gracias a que se emplea un material reflejante de luz en la construcción de las marcas objetivo, esta tarea fue simplificada dado que los objetos de interés adquirieron una tonalidad de blanco máxima en el sistema RGB. Logrando así la segmentación mediante la técnica de umbralado para discriminar casi la totalidad de los píxeles que no corresponden a los objetos de estudio. En la Figura 4 se puede apreciar las cinco marcas completas y casi segmentadas del resto de la imagen, no obstante, nótese la presencia de una línea encima del círculo superior, esta línea se considera ruido, es decir información no útil que obstaculiza la extracción de información, en el siguiente paso se muestra como eliminarlo.

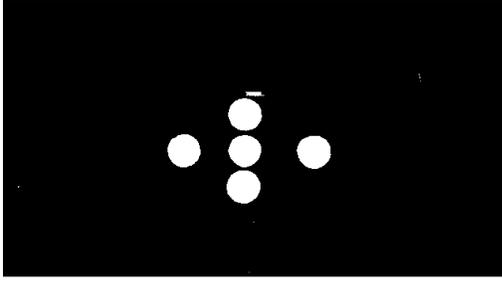


Figura 4: Imagen binaria resultante después de la aplicación del umbralado

III.5. Relleno de objetos de interés y eliminación de objetos pequeños

Como parte del pre-procesamiento se aplicaron dos operadores para eliminar el ruido, el primero consiste en rellenar con píxeles blancos los objetos presentes en la imagen.

El algoritmo para el relleno de la región ocupa la operación de dilatación morfológica, el complemento y la intersección.

La operación morfológica de dilatación se define como el proceso de convolucionar un elemento de estructura B sobre una imagen A , mediante los siguientes pasos:

1. Supongamos que X es el conjunto de coordenadas euclidianas correspondientes a la imagen binaria de entrada y K es el conjunto de coordenadas del elemento estructurante.
2. Permita que K_x represente la traslación de K , para que su origen esté en x .
3. Entonces la dilatación de X por K es simplemente el conjunto de todos los puntos x tales que la intersección de K_x con X es no vacía.

Se dice que A se dilata por B , escrito como $A \otimes B$, y se define formalmente como Ecuación (1).

$$A \otimes B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (1)$$

donde:

- A es un elemento de imagen
- B es un elemento de estructura simétrico
- \otimes es el operador de dilatación
- \hat{B} es la reflexión de B
- \cap es el operador de intersección
- \emptyset es para el conjunto vacío

Finalmente, según [6], el procedimiento para rellenar una región comenzando desde un punto p que se encuentre dentro del borde, se establece como Ecuación (2):

$$X_k = (X_{k-1} \otimes B) \cap A^c \quad k = 1, 2, 3, \quad (2)$$

donde:

- $X_0 = p$
- B es un elemento de estructura simétrico
- \cap es el operador de intersección
- A^c es el complemento de conjunto A

Por otro lado, el segundo operador dedicado a la tarea de eliminar los objetos pequeños evalúa el tamaño de cada uno de los objetos presentes en la imagen, si este es menor a 50 píxeles, se elimina. El criterio se basa en que el ruido se presenta generalmente en áreas pequeñas. La imagen resultante después de aplicar estos filtros se muestran en la Figura 5.

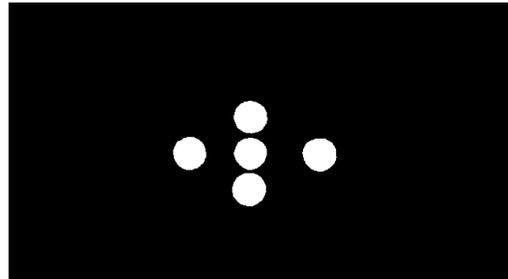


Figura 5: Imagen filtrada

III.6. Etiquetado de componentes conectados

Los algoritmos de etiquetado de componentes conectados (CCL por sus siglas en inglés) realizan la asignación de un identificador único a cada conjunto conexo de píxeles con unas mismas propiedades dentro de la imagen, ver Figura 6. Utiliza algoritmos que, partiendo de una imagen binaria, van analizando conectividades entre píxeles situados en un entorno formado por cuatro ($N4$) u ocho vecinos ($N8$), de forma que, al final, dos píxeles, p y q , pertenecerán a un mismo componente cuando ambos se consideren parte del primer plano o del fondo y exista un camino de píxeles del mismo tipo entre ellos, es decir, cuando se verifique la Ecuación (3), donde S es un subconjunto de píxeles de la imagen binaria [7].

$$p \text{ conectado a } q \iff \exists \{s_i \in S \mid s_1 = p, s_{n+1} = q, s_{i+1} \in N(s_i), i = 1, \dots, n\} \quad (3)$$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	2	0	0	3	3	0	2	0
0	2	2	2	2	2	2	0	0	3	0	0	2	0
0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	2	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
0	7	7	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6: Representación matricial de tres objetos conectados

III.7. Extracción de patrones

Se eligió como característica principal el centroide de cada una de las marcas debido a que su posición refleja fielmente la vibración de la máquina en conjunto, adicionalmente se tomó la estrategia de colocar las marcas en forma de plano cartesiano para contar con información redundante en caso de que algunas de ellas presente alguna anomalía. Ver Figura 7.

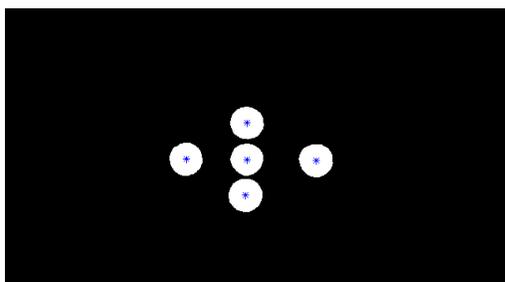


Figura 7: Imagen que muestra el patrón obtenido de centroide sobre cada marca

La Ecuación (4) sirve para calcular el centroide en el punto (x,y) de un área de interés f.

$$\bar{x} = m_{10}/m_{00} \quad , \quad \bar{y} = m_{01}/m_{00} \quad (4)$$

donde f(x,y) representa el valor de la imagen en las coordenadas (x, y). Las sumatorias se toman sobre toda el área del objeto. En esta ecuación, i y j son enteros positivos e i + j es llamado el orden del momento respectivo. En particular, m₀₂ y m₂₀ son los momentos de inercia de f respecto a los ejes x e y, respectivamente [8]. Finalmente, los momentos (m) están definidos por la Ecuación (5).

$$m_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j f(x, y) \quad (5)$$

III.8. Almacenamiento

Una vez calculado el centroide de la i-ésima imagen, este valor es almacenado en dos vectores de características, uno para las coordenadas verticales y y otro para las coordenadas horizontales x. Acto seguido, se procede a repetir el procedimiento para almacenar el siguiente patrón vibratorio, como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 8, deteniéndose el algoritmo iterativo hasta procesar la última imagen del video.

Finalmente, se describen los bloques nueve y diez de la metodología en la sección de resultados, dado que es la parte del algoritmo en donde se transforma y presenta la información extraída del video.

Tabla 1: Muestra de Patrones de vibración

Cuadro número	\bar{x}	\bar{y}
1	230.045288	191.883856
2	230.047169	192.407111
3	230.051711	192.658412
4	229.862244	192.824344
5	229.850800	192.773653
6	229.739696	192.399132
7	229.792357	191.896899
8	229.788937	191.558224
9	229.875726	191.581395
10	229.912191	191.751088
11	229.851636	192.346909
12	229.822286	192.640932
13	229.732752	192.775599
14	229.647529	192.795784
15	229.547687	192.519508
16	229.586580	191.955988
17	229.503976	191.573391
18	229.609898	191.454876
19	229.604803	191.710334
20	229.629067	192.304410
21	229.545322	192.694706
22	229.482608	192.766666
23	229.216314	192.865258
24	229.176855	192.545851
25	229.131884	192.011594
26	229.095065	191.563860
27	229.120727	191.469818
28	229.191101	191.733770
29	229.238372	192.223110
30	229.152838	192.548034

IV. Resultados

En esta sección, mostramos los principales resultados al aplicar la metodología propuesta sobre el sistema desarro-

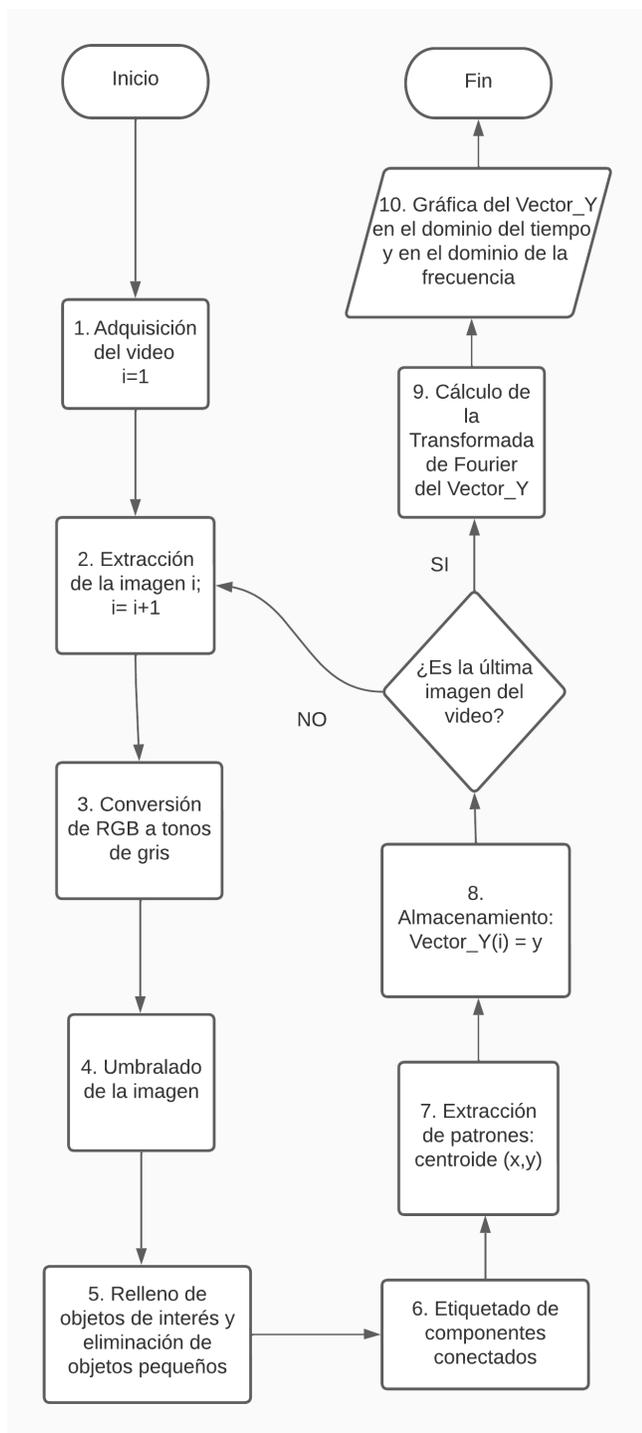


Figura 8: Diagrama de flujo del método propuesto para la cuantificación de vibraciones mecánicas empleando un transductor CCD

llado. Primeramente, se relaciona la vibración temporal contra el desbalance mecánico y, posteriormente, exponemos su correspondiente representación en el dominio de la frecuencia.

IV.1. Espectro de vibración en el dominio del tiempo

El vector de salida del paso 8, llamado *Almacenamiento*, contiene información del desplazamiento horizontal y vertical del centroide de nuestra marca. Este vector contiene información del arranque y de la estabilidad del movimiento rotacional; de esta información se elige el desplazamiento vertical, el cual se puede identificar en la Figura 9 donde se verifican distintos movimientos oscilatorios.

Para evidenciar las características dinámicas de interés, el inicio de la señal que corresponde al transitorio se divide y se ocupa la sección estable. Se observa que alrededor de la muestra 200 se localiza la amplitud máxima y mínima del desplazamiento; y después de ellos se alcanza una cierta estabilidad en las oscilaciones. La oscilación de rango máximo, junto con un par de oscilaciones periódicas estables, se muestran en la Tabla 1, las cuales se corresponden con un espectro típico de desbalance. [9]. El segmento de patrón vibratorio seleccionado considera un lapso de tiempo de un segundo, cuya frecuencia aproximada es de 3 Hz, es decir, el período de un ciclo es de un tercio de segundo.

En la Tabla 1 identificamos el rango máximo de desplazamiento de 1.410382, que es la diferencia entre el desplazamiento máximo localizado en la posición 23 y el mínimo, localizado en la posición 18 de la Tabla 1, e indica la severidad del desbalance.

IV.2. Espectro de vibración en el dominio de la frecuencia

Con el vector de desplazamiento y del centroide almacenado en el paso 8 de la Figura 8, se elige una muestra para calcular Y , que es la Transformada Discreta de Fourier, o por sus siglas en inglés DFT. Este cálculo permite conocer las características del desplazamiento en el dominio de la frecuencia.

La frecuencia de muestreo F_s y la longitud de la muestra N , determinan la resolución del espectro de frecuencia, es decir el número de *bins*, como se indica en la Ecuación (6).

$$Nbins = F_s/N \tag{6}$$

El vector de salida del paso 9 es el espectro de frecuencia, cuyo cálculo se realiza con la Ecuación (7). En la DFT, la entrada y se encuentra en el dominio del tiempo, y se mapea o transforma a su representación en el dominio de la frecuencia como se muestra en la Ecuación (7). Donde $y[k]$ es el desplazamiento en alguno de los ejes y $W[k_n^j, k]$ es el factor complejo de transformación del algoritmo de la FFT para frecuencias positivas y negativas [10].

La longitud del espectro de frecuencia es N ; no obstante, debido a que el vector obtenido por la DFT es compleja

y simétrica para las frecuencias positivas y negativas, se procede a recuperar el valor absoluto de la mitad del vector que contiene la parte positiva de las frecuencias. Esta salida es llamada *single-sided*. Obteniendo el número de *bins* efectivo en unidades de Hz, que en este caso con un desbalance inducido de 20 gramos es 3 Hz. Finalmente, para tener una representación sin la componente de DC se iguala a cero la magnitud del primer bin del vector.

$$Y[i] = \sum_{k=0}^{N-1} y[k] W_N^{jk} \quad (7)$$

Además, la longitud N debe ser múltiplo de 2^n , de forma que se compute adecuadamente en el algoritmo de DFT. En caso contrario, cualquier software de cómputo para análisis numérico agrega p ceros en el vector de entrada (zero-padding) de forma automática, incrementando así el costo computacional de $N \log_2 N$ a $pN \log_2 pN$ [11]. La diferencia en el tiempo de cómputo entre ambas posibilidades es de un par de segundos en computadores actuales, pudiendo ser despreciable; sin embargo, se realiza esta consideración en el método para futuras implementaciones en sistemas portables.

En la Figura 10 se puede ver la frecuencia fundamental y su primer armónico, se puede notar que no es exactamente el doble de la frecuencia fundamental, esto se atribuye al derrame espectral del algoritmo DFT, sin embargo conserva suficiente similitud con el espectro de vibración típico para una falla tipo desbalance [9].

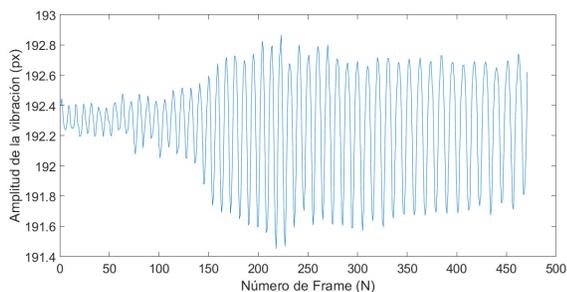


Figura 9: Gráfica de la vibración vertical obtenida

V. Conclusiones

Como resultados obtenidos, se presenta un método para obtener el espectro frecuencial correspondiente a una vibración mecánica, como parte del sistema de predicción de fallas en maquinaria. El método propuesto consiste en los siguientes pasos: adquisición del video, extracción de imagen, conversión a grises, umbralado, filtrado, etiquetado, extracción de patrones, almacenamiento, conversión del dominio de frecuencia y presentación gráfica de los

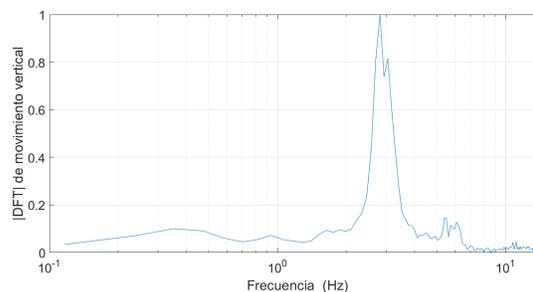


Figura 10: Espectro frecuencial de la vibración vertical obtenida

resultados. Se obtienen también los espectros frecuencial y temporal característicos de una falla mecánica por desbalance que son los que presentan la menor frecuencia de vibración a través del análisis de imágenes, y se logró la implementación de un transductor óptico para detectar vibraciones mecánicas.

Una ventaja del método empleado consiste en que utiliza etiquetas reflejantes adheribles en lugar de costosos sensores como lo son los palpadores o acelerómetros, además de no ser invasivo evitando así, errores de medición debidos a problemas de sujeción. Por otro lado la principal limitante que presenta el método, es que depende de la velocidad del sensor CCD en la captura de cuadros por segundo, debido a esto, el presente trabajo se enfoca solo en fallas que presentan bajas frecuencias de vibración.

Como trabajo a futuro se propone analizar fallas mecánicas que presenten frecuencias de vibración mayores, como son fallas en rodamientos, además de verificar si el método es aplicable en dichos casos. También se puede hacer clasificación automática de los espectros obtenidos empleando algoritmos de Inteligencia Artificial.

Agradecimientos

Gracias a la Universidad Tecnológica de Puebla en el proyecto denominado “Sistema de Visión para la Detección de Desbalance sobre Neumáticos Automotrices”, aprobado el 25 de febrero del 2022, por facilitar los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] GENARO Mosquera, M De la Victoria y R Armas. «Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo». En: *Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID. Caracas* (2001).
- [2] Liu Ruonan. *Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327018300748?via%3Dihub>.

- [3] Lin Jieqiong. *Modeling and experimental analysis on the effect of carrier aircraft vibration on the imaging quality of an aspherical aerial camera*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402621002953?via%3Dihub>.
- [4] Roberto Del-Sal. *Structural vibration measurement with multiple synchronous cameras*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327021001370>.
- [5] Muthukrishnan R. «Edge Detection Techniques For Image Segmentation». En: *International journal of computer science and information technology* 3 (dic. de 2011), págs. 259-267. DOI: 10.5121/ijcsit.
- [6] A.M Raid y col. «Image Restoration Based on Morphological Operations». En: *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology* 4 (jul. de 2014), págs. 9-21. DOI: 10.5121/ijcseit.2014.4302.
- [7] Sánchez Solano Calvo Gallego Brox P. «Un algoritmo en tiempo real para etiquetado de componentes conectados en imágenes». En: *En XVIII International IBERCHIP Workshop Playa del Carmen, México*, (2012).
- [8] Renato Salinas Silva. «Orientación y centroide de un objeto digitalizado». En: (2018).
- [9] G. Betta y col. «A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis». En: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 51.6 (2002), págs. 1316-1322. DOI: 10.1109/TIM.2002.807987.
- [10] AJAA Bekele. «Cooley-tukey fft algorithms». En: *Advanced algorithms* (2016).
- [11] Khalid Aamir, Mohammad Maud y Asim Loan. «On Cooley-Tukey FFT method for zero padded signals». En: vol. 2005. Oct. de 2005, págs. 41-45. ISBN: 0-7803-9247-7. DOI: 10.1109/ICET.2005.1558852.