

DETECCIÓN DE ANOMALÍAS VIBRATORIAS EN MAQUINARIA MEDIANTE SENSORES MEMS DE BAJO COSTO

VIBRATION ANOMALY DETECTION IN MACHINERY USING LOW-COST MEMS SENSORS

Ronquillo Salas Carlos Alberto

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0009-0000-4671-5966>
carlos.rs@cdjuarez.tecnm.mx

Silva Leyva Laura Elizabeth

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0000-0002-8403-7286>
laura.sl@cdjuarez.tecnm.mx

López Santos Irving Bruno

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0009-0003-9947-3288>
irving.ls@cdjuarez.tecnm.mx

Holguín López Jesús Armando

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0009-0000-6221-8951>
jesus.hl@cdjuarez.tecnm.mx

Esquivel Mancha Ismael

TecNM/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez
<https://orcid.org/0009-0007-4149-3816>
L19111604@cdjuarez.tecnm.mx



Resumen-- En este trabajo se evaluó la viabilidad del sensor inercial de bajo costo MPU6050 para la medición de vibraciones en contextos académicos e industriales. Se implementó un sistema de adquisición de datos utilizando el sensor MPU6050 conectado a una placa Arduino UNO a través del bus I²C para monitorear la vibración en una máquina bajo prueba—en este caso una impresora 3D. Los datos de aceleración se recolectaron a una frecuencia de 20 Hz y se analizaron utilizando el valor cuadrático medio (RMS) y el factor de cresta (cf) para identificar diferencias entre condiciones normales y anormales de operación.

Los resultados mostraron que las mediciones obtenidas con el sensor permiten identificar estados anormales de operación derivados de la detección de anomalías vibratorias. Se concluyó que el sensor MPU6050 es una alternativa viable y económica en aplicaciones de monitoreo preventivo y de investigación experimental en condiciones controladas. Sin embargo, deben considerarse las limitaciones inherentes del sensor en términos de resolución, rango dinámico y calibración.

Palabras Clave-- MPU6050, acelerómetro, sensores de bajo costo, medición de vibración, monitoreo de condiciones.

Abstract-- This work evaluated the feasibility of the low-cost MPU6050 inertial sensor for vibration measurement in academic and industrial settings. A data acquisition system was implemented using the MPU6050 sensor connected to an Arduino UNO board via the I²C bus to monitor vibration in a machine under test—in this case, a 3D printer. Acceleration data were collected at a frequency of 20 Hz and analyzed using the root mean square (RMS) and the crest factor (cf) to identify differences between normal and abnormal operating conditions.

The results demonstrated that the measurements acquired with the sensor allow to identify abnormal operating conditions derived from the detection of vibration anomalies. It was concluded that the MPU6050 sensor is a viable and cost-effective alternative for preventive monitoring and experimental research applications under controlled conditions. However, the sensor's inherent limitations in terms of resolution, dynamic range, and calibration must be considered.

Keywords-- MPU6050, accelerometer, low-cost sensors, vibration measurement, condition monitoring.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la investigación académica y el desarrollo de prototipos, la medición precisa de vibraciones es crucial para el análisis y la optimización de diversos sistemas mecánicos. Tradicionalmente, los sensores de alta gama han sido la opción preferida debido a su precisión y fiabilidad; sin embargo, su elevado costo limita su accesibilidad, especialmente en entornos académicos y pequeñas empresas con presupuestos restringidos.

De acuerdo con Flovik (2018), en el monitoreo de maquinaria y estructuras utilizando mediciones de vibración, una de las principales áreas es la detección de anomalías mediante la identificación de valores atípicos, esto es, identificar eventos u observaciones que difieren significativamente de la mayoría de los datos. Estos datos atípicos de vibración están generalmente relacionados con algún tipo de problema, por ejemplo, defectos estructurales, mal funcionamiento del equipo, etc.

Diversos estudios recientes han explorado el uso de sensores de bajo costo para el análisis vibracional en contextos de monitoreo estructural e industrial. Komarizadehasl et al. (2021) desarrollaron un sistema económico basado en acelerómetros MEMS y Arduino, demostrando que, mediante estrategias de promediado y sincronización, es posible alcanzar una precisión comparable a equipos comerciales en la medición de vibraciones estructurales. En el ámbito de la manufactura, Iqbal et al. (2022) evaluaron el desempeño de sensores de bajo costo en aplicaciones de IoT Industrial, identificando limitaciones en la linealidad y el ruido de los dispositivos, pero también confirmando su viabilidad para tareas de supervisión en condiciones controladas. Soto-Ocampo et al. (2020) implementaron un sistema de adquisición de datos de alta frecuencia basado en plataformas de bajo costo como Raspberry Pi, orientado al análisis de vibraciones en maquinaria rotativa, lo que evidencia la aplicabilidad de soluciones económicas en escenarios industriales reales.

Actualmente, sensores como el MPU6050 han ganado popularidad para la medición de vibración debido a su bajo costo y su capacidad para integrarse con plataformas de desarrollo como Arduino y Python, lo que permite a los investigadores realizar análisis detallados y en tiempo real, ofreciendo una alternativa viable a los sensores de alta gama. Además, la flexibilidad y escalabilidad de las plataformas de desarrollo para su integración en sistemas de medición los hacen ideales para entornos de desarrollo rápido y prototipado.

Por lo anterior, el problema central de esta investigación es determinar si el sensor MPU6050, es capaz de proporcionar mediciones de aceleración suficientemente precisas y fiables para detectar condiciones

de operación anormales en equipos mecánicos, lo cual sería de gran beneficio ya que existen amplias necesidades de soluciones accesibles y eficaces de monitoreo de vibraciones en el ámbito de la investigación académica y en el desarrollo de prototipos en pequeñas empresas.

En relación con la evaluación de las mediciones, se utiliza el valor cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés *Root Mean Square*) y el factor de cresta. El valor RMS es una medida matemática descriptiva que permite cuantificar la magnitud promedio de la señal, la cual en el análisis de vibraciones se utiliza ampliamente como indicador de la energía global contenida en la respuesta temporal de aceleración, velocidad o desplazamiento. Su uso resulta particularmente relevante en el monitoreo de condición de maquinaria, ya que proporciona un valor estable y representativo de la severidad vibratoria, reduciendo la influencia de picos aislados y facilitando la comparación con umbrales normativos establecidos. En relación con el factor de cresta, este constituye un indicador ampliamente utilizado en el monitoreo de condición de maquinaria debido a su sensibilidad a la presencia de fenómenos impulsivos en la señal de vibración. Bajo condiciones normales de operación, la relación entre el valor pico y el valor RMS de la señal se mantiene relativamente baja, reflejando un comportamiento estable y sin irregularidades significativas. Sin embargo, cuando aparecen fallas incipientes en la maquinaria relacionadas a componentes mecánicos, la señal comienza a exhibir picos de alta amplitud superpuestos a la vibración continua, lo que provoca un incremento notable en el factor de cresta. En consecuencia, el aumento del factor de cresta suele asociarse a estados anormales de operación, convirtiéndolo en una herramienta útil para la detección temprana de fallas (Ghazali et al., 2021).

DESARROLLO

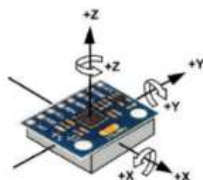
En esta sección se presenta una descripción general del sensor MPU6050, así como de la instrumentación de los sensores por medio del bus I²C para la colecta de datos de vibración en la máquina de prueba—en este caso una impresora 3D de fusión de filamento.

Unidad de medición inercial MPU6050

En la Figura 1 se muestra el sensor MPU6050, el cual es una unidad de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés). Es un sistema microelectromecánico (MEMS) que puede ser utilizado para medir aceleraciones lineales y velocidades angulares. El uso combinado del acelerómetro de 3 ejes y giroscopio de 3 ejes integrado permite determinar el movimiento de un cuerpo en un espacio tridimensional. Posee adicionalmente una interfaz mediante bus I²C para la escritura y lectura de los registros del dispositivo, operando hasta una frecuencia de 400 kHz (Fedorov et al., 2025).

El sensor MPU6050 ofrece varias ventajas en comparación con otros sensores inerciales; por ejemplo, destaca por su costo significativamente más bajo en comparación con muchos sensores de alta gama, lo que lo hace accesible para proyectos de bajo presupuesto. Este sensor combina un acelerómetro y un giroscopio en un solo chip, simplificando el diseño del sistema y reduciendo la cantidad de componentes necesarios. Además, su facilidad de uso se ve potenciada por la existencia de numerosas bibliotecas y ejemplos de código disponibles, facilitando su implementación en proyectos con microcontroladores como Arduino, ESP32 y Raspberry Pi. Su tamaño compacto y ligero lo hace ideal para aplicaciones donde el espacio y el peso son limitados, mientras que su bajo consumo de energía es beneficioso para aplicaciones portátiles o alimentadas por batería. Utiliza una interfaz I²C, que es fácil de implementar y permite la conexión de múltiples dispositivos en el mismo bus. Ofrece un rango de medición adecuado para muchas aplicaciones de análisis de vibraciones, con configuraciones ajustables tanto para el acelerómetro como para el giroscopio. Además, es un sensor ampliamente disponible y fácil de adquirir en el mercado. La abundante documentación, tutoriales y comunidades en línea proporcionan un soporte valioso para resolver problemas y optimizar el uso del sensor.

Figura 1. Unidad de medición inercial MPU6050.

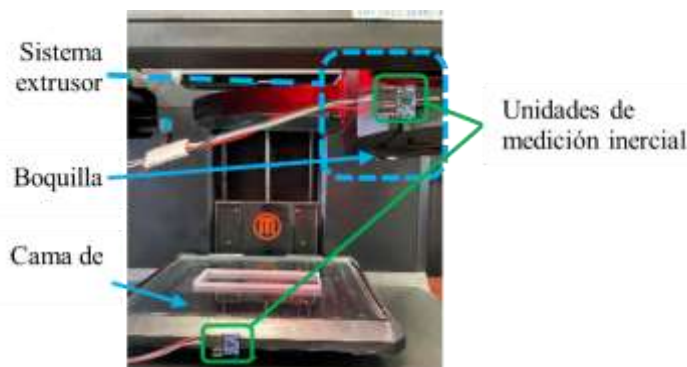


Fuente: *Internet.*

Instrumentación de la impresora 3D

En la Figura 2 se muestra la instrumentación de la impresora 3D (Makerbot Replicator 5^a generación) con dos sensores MPU6050, uno en el extrusor y otro en la cama de impresión. Los sensores se conectaron a una placa Arduino UNO por medio del bus I²C y una vez instalados en la impresora se calibraron antes de proceder con la adquisición de datos.

Figura 2. Instrumentación de la impresora 3D.

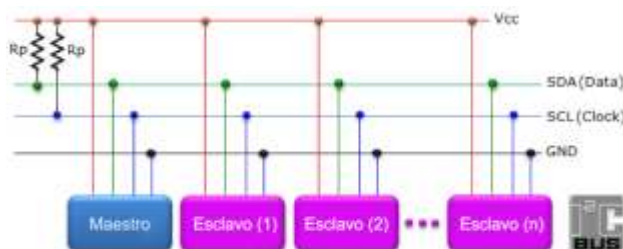


Fuente: *Elaboración propia.*

Bus serial I²C

El bus serial I²C (por sus siglas en inglés: Inter Integrated Circuit), es un bus maestro/esclavo con un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos tales como sensores capaces de recolectar datos del mundo real. En la Figura 3 se muestra la estructura del bus I²C, el cual maneja 3 conexiones: SCL (del inglés System Clock), es la línea de los pulsos de reloj que sincronizan el sistema; SDA (del inglés System Data), es la línea por la que se transfieren los datos entre los dispositivos; GND (del inglés Ground), común de la interconexión entre todos los dispositivos conectados al bus. Las líneas SDA y SCL son del tipo drenaje abierto por lo que se deben polarizar en estado alto por medio de resistencias “pull-up”. Adicionalmente, debe tomarse en cuenta que entre más datos se envíen por el bus mayor será la saturación de éste y por lo tanto es necesario calcular el valor adecuado de las resistencias y así garantizar una comunicación sin interrupciones (*Descripción y Funcionamiento del Bus I2C, s.f.*).

Figura 3. Estructura del bus I²C.

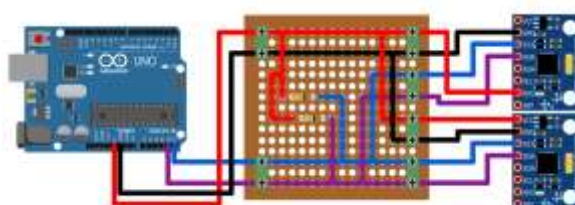


Fuente: *Internet.*

Los sensores MPU6050 actúan como esclavos y están conectadas al módulo I²C del microcontrolador Arduino UNO que actúa como maestro, como se muestra en la Figura 4.

Es importante mencionar que el sensor MPU6050 cuenta con resistencias pull-up integradas para la conexión de un solo sensor al bus serial; sin embargo, al añadir otro sensor al bus, ambas resistencias son insuficientes y se requiere añadir resistencias externas. En este caso, para la conexión de dos dispositivos MPU6050 con el Arduino UNO se utilizaron resistencias de 10 k Ω tanto para la línea SCL como para la línea SDA. No obstante, esto no implica una generalización para cualquier circuito ya que en otros circuitos se puede presentar una mayor o menor saturación del bus I²C según la cantidad de datos que se estén compartiendo a través del bus.

Figura 4. Esquema de conexión del bus I²C.



Fuente: *Imágenes-Internet. Circuito-Esquivel, I.*

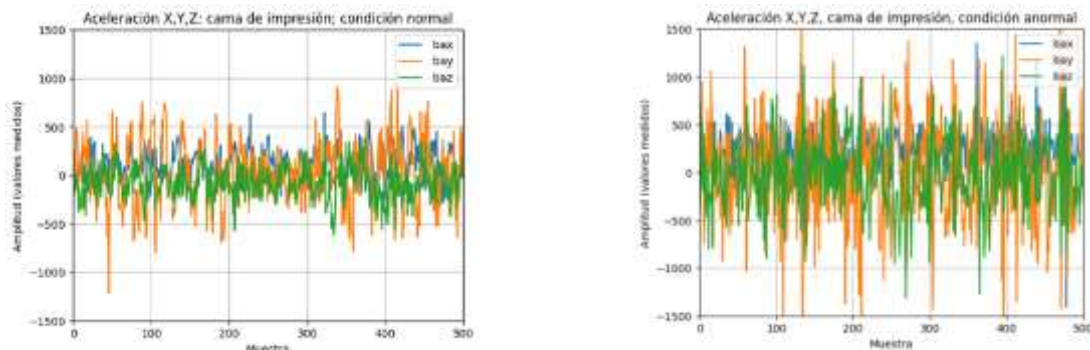
Colecta de los datos

Se recolectaron los datos en formato csv de las aceleraciones X, Y y Z, tanto de la cama de impresión como del sistema extrusor a una frecuencia de 20 Hz. En el caso particular de la evaluación del sensor en la impresora 3D, con una velocidad de avance del extrusor de 4 mm/s, significa que las lecturas se obtuvieron cada 0.2 mm de recorrido del extrusor, lo cual para esta aplicación, los autores lo consideraron adecuado para la detección de anomalías vibratorias durante la operación de la máquina.

En las Figura 5 y Figura 6 se muestran 500 mediciones de la amplitud de las señales en el dominio temporal de las aceleraciones X, Y y Z de la cama de impresión (identificadas como *bax*, *bay* y *baz* respectivamente) y del sistema extrusor (identificadas como *eax*, *ey*, y *eaz* respectivamente). En ambas figuras, las gráficas en la izquierda muestran la condición normal de operación y en la derecha la condición anormal de operación.

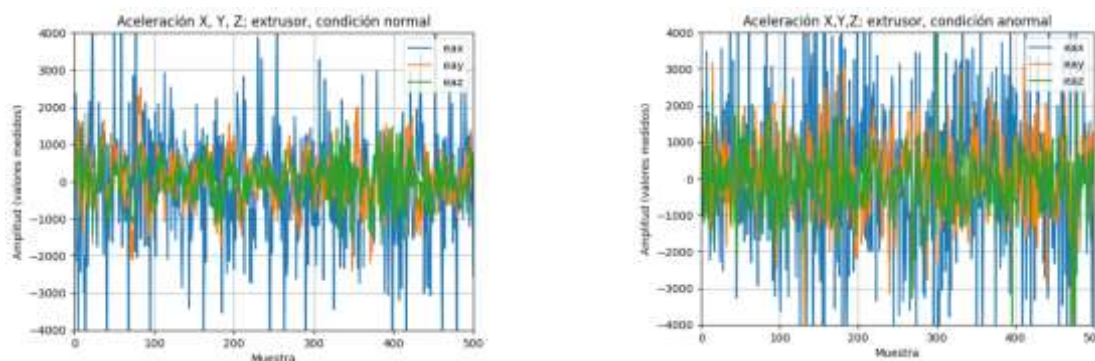
En el caso de las mediciones en el dominio temporal, en la de la cama de impresión (Figura 5), puede observarse con relativa facilidad que existe una diferencia en la amplitud de las señales medidas. Sin embargo, en el sistema extrusor (Figura 6), la diferencia en amplitud es menos apreciable.

Figura 5. Aceleración en el dominio temporal de la cama de impresión.



Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 6. Aceleración en el dominio temporal del sistema extrusor.



Fuente: *Elaboración propia.*

DISCUSIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

Análisis con valor cuadrático medio.

Para efectos de apreciar mejor la diferencia entre las lecturas de estado normal y estado anormal de operación, se aplicó el valor cuadrático medio (RMS) de la Figura 7 un tamaño de ventana $n=5$.

Figura 7. Fórmula RMS.

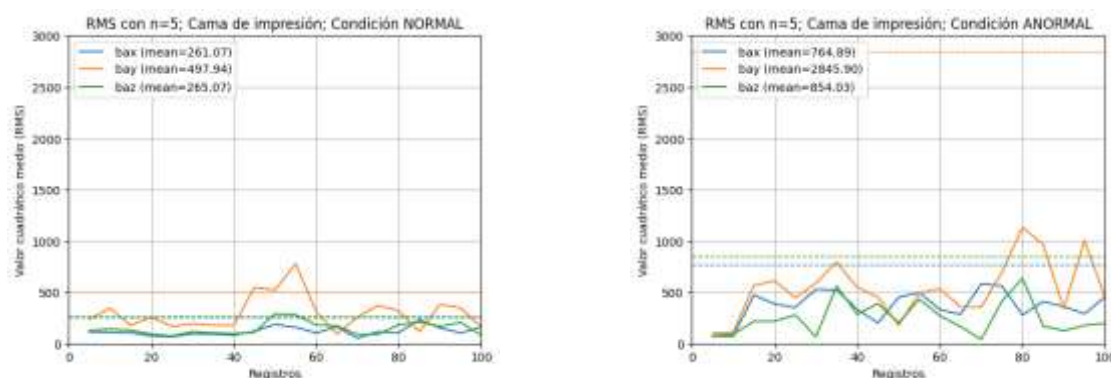
$$RMS(x_{in}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Fuente: *Ghazali et al. (2021).*

Los valores RMS se muestran en la Figura 8 para la cama de impresión y en la Figura 9 para el sistema extrusor. En cada gráfica se dibuja el valor promedio para cada uno de los ejes (ax , ay , az) con el

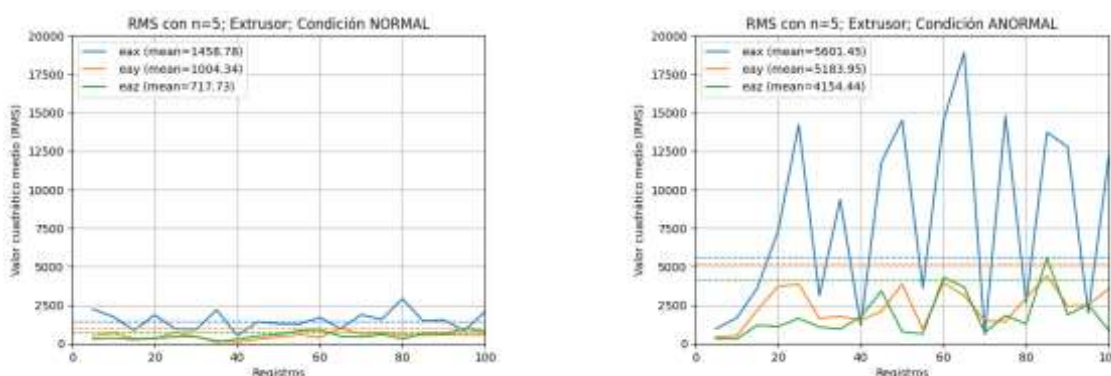
propósito de mostrar que existe una diferencia apreciable que permite definir un límite superior—para cada eje o un promedio de los 3 ejes—basado en la condición de operación normal; de tal manera que si un registro excede ese límite sería un indicativo de que la máquina presenta una anomalía vibratoria.

Figura 8. Valores RMS; Cama de impresión; Condición Normal vs. Anormal.



Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 9. Valores RMS; Extrusor; Condición Normal vs. Anormal.



Fuente: *Elaboración propia.*

Análisis con factor de cresta.

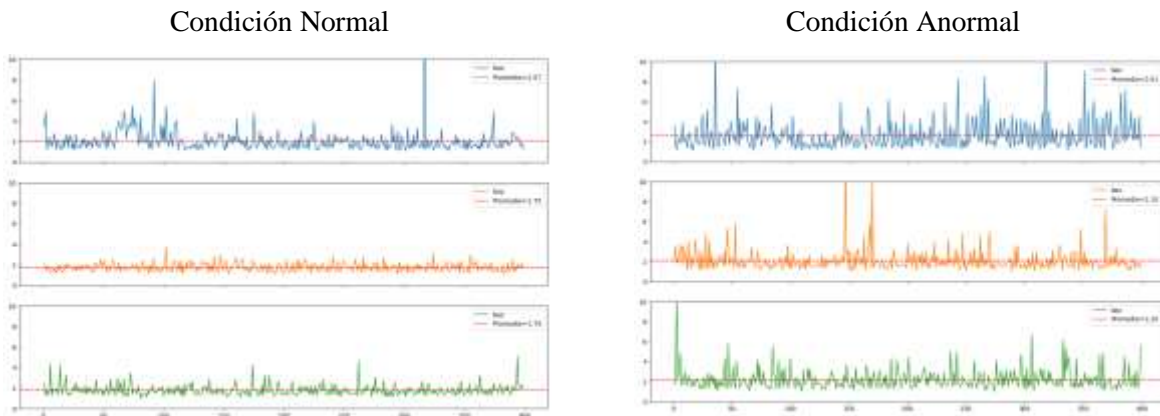
Se aplicó el factor de cresta (cf) de la Figura 10 como medida de la severidad vibratoria con un tamaño de ventana $n=5$. El factor de cresta obtenido para la cama de impresión en condición normal y anormal de operación se muestra en la Figura 11. Se puede observar que para la condición anormal existe un incremento del valor promedio del cf para las 3 variables de aceleración. Por ejemplo, *bax* en condición normal se incrementa de 2.07 a 2.61 en condición anormal; *bay* de 1.75 a 2.10 y; *baz* de 1.79 a 2.20, en condición normal a anormal respectivamente.

Figura 10. Fórmula factor de cresta.

$$\text{factor de cresta} = \frac{\text{valor pico}}{\text{valor RMS}}$$

Fuente: Ghazali et al. (2021).

Figura 11. Factor de cresta; Cama de impresión.

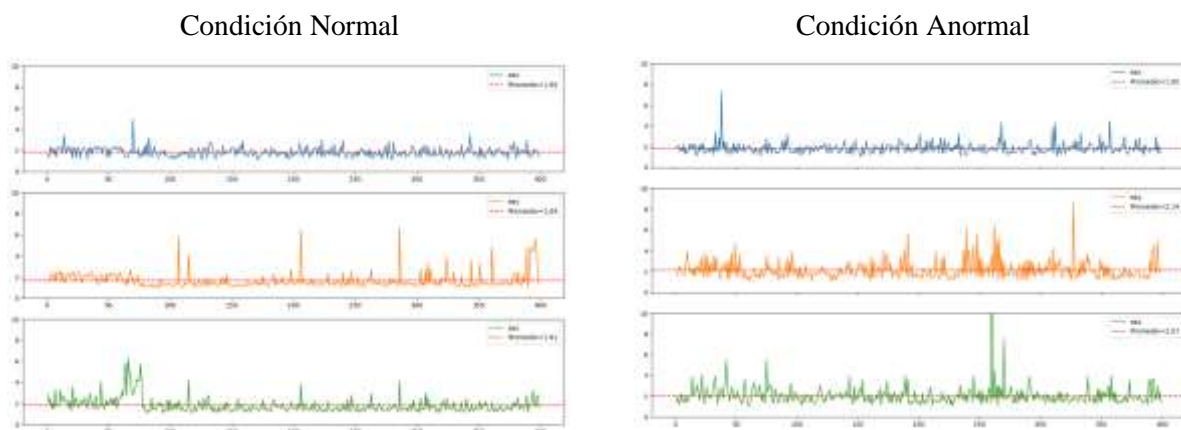


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12 se muestra el cf para las aceleraciones de la cama de impresión, donde se puede observar que para e_{ax} , e_{ay} y e_{az} hay un incremento del valor promedio del cf.

especialmente en aplicaciones de monitoreo preventivo y de investigación experimental, siempre que se consideren las limitaciones inherentes de resolución, rango dinámico y calibración.

Figura 12. Factor de cresta; Extrusor.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con algunos aspectos relevantes a lo reportado por Komarizadehasl et al. (2021), Li et al. (2019) y Ghazali et al. (2021) en relación con el uso de sensores de bajo costo para la detección de anomalías vibratorias.

En primer lugar, cabe destacar que aun y cuando las diferencias en el dominio temporal no son muy evidentes—particularmente en el sistema extrusor—, el análisis con el valor RMS permite discriminar claramente entre condiciones de operación normal y anormal; lo cual concuerda con lo reportado por Komarizadehasl et al. (2021), quien menciona que los sensores de bajo costo ofrecen un desempeño comparable al de sistemas comerciales siempre y cuando se apliquen procesos adecuados de procesamiento y calibración.

En segundo lugar, el factor de cresta mostró incrementos de manera consistente en los tres ejes bajo condiciones anormales de operación, lo que confirma que el MPU6050 posee la capacidad de registrar picos de vibración de manera representativa que permitan hacer diagnósticos tempranos de fallas mecánicas incipientes; esto concuerda con lo reportado por Li et al. (2019) y Ghazali et al. (2021) al afirmar que el factor de cresta es un indicador sensible que permite detectar vibraciones anormales derivadas de fenómenos impulsivos asociados a un malfuncionamiento mecánico de equipo y maquinaria. Como tercer punto cabe destacar que el sensor no presentó saturación en ninguno de los canales, lo que prueba que la frecuencia de muestreo empleada (20 Hz) resultó idónea en este caso para la medición en el equipo bajo análisis. No obstante en el caso de maquinaria que pudiera exhibir vibraciones de alta frecuencia, este sería un punto para considerar antes de su aplicación.

Desde la perspectiva de los autores y en base a los resultados obtenidos, se considera que el sensor MPU6050 es apropiado para la medición de vibración tanto en la investigación académica como en la industria en escenarios controlados, lo que representa una alternativa viable al equipamiento convencional de alta gama y alto costo.

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se demostró que los sensores de bajo costo basados en MEMS tales como el sensor inercial MPU6050, son una solución viable, económica y escalable para el análisis de vibraciones en diversas áreas de investigación tanto en entornos académicos como en la industria.

Los resultados evidencian la capacidad de registro y muestreo del sensor MPU-6050, demostrando que la frecuencia de adquisición utilizada es suficiente para representar con fidelidad las vibraciones en el rango de interés. Asimismo se verificó que el rango de operación del sensor es adecuado para las condiciones evaluadas, ya que no se presentaron fenómenos de saturación en la señal, lo que garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos.

Sin embargo, a pesar de su potencial, se reconocen limitaciones asociadas al ruido, la deriva térmica y la frecuencia de muestreo máxima, por lo que se recomienda la implementación de procedimientos de calibración y técnicas de procesamiento de señal.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Se sugiere la aplicación de técnicas de análisis en el dominio frecuencial—Transformada Rápida de Fourier (FFT)—para realizar análisis comparativos más exhaustivos que permitan comparar el desempeño del sensor MPU6050 con acelerómetros industriales bajo las mismas condiciones.

Se sugiere asimismo la aplicación de técnicas de machine learning (ML) para la generación de modelos predictivos evaluando el desempeño del sensor MPU6050 en sistemas de monitoreo en tiempo real en entornos industriales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adafruit Learning System. (s.f.). *MPU-6050 6-DoF accelerometer and gyroscope*.
<https://learn.adafruit.com/mpu6050-6-dof-accelerometer-and-gyroscope>
- Arduino Playground. (s.f.). *MPU-6050*. <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050/>
- Descripción y funcionamiento del bus I2C. (s.f.). <https://robots-argentina.com.ar/didactica/descripcion-y-funcionamiento-del-bus-i2c/>
- Fedorov, D., Ivoylov, A., Zhmud, V., & Trubin, V. (2015). Using of measuring system MPU6050 for the determination of the angular velocities and linear accelerations. *Automatics & Software Engineering*, 1(11), 76–81.
- Flovik, V. (2018). *How to use machine learning for anomaly detection and condition monitoring*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/how-to-use-machine-learning-for-anomaly-detection-and-condition-monitoring-9c0f1314de9d>
- Ghazali, M., Abdalla, A. N., Oumer, A. N., & Mohamed, A. A. (2021). Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*, 2021, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
- InvenSense. (s.f.). *MPU-6000 and MPU-6050 product specification* (Rev. 3.4). <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- Iqbal, A., Mian, N. S., Longstaff, A., & Fletcher, S. (2022). Performance evaluation of low-cost vibration sensors in industrial IoT applications. *International Journal of Automation Technology*, 16(3), 329–339. <https://doi.org/10.20965/ijat.2022.p0329>

- Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Ma, H., Lozano-Galant, J.-A., & Turmo, J. (2021). Development of a low-cost system for the accurate measurement of structural vibrations. *Sensors*, 21(18), 6191. <https://doi.org/10.3390/s21186191>
- Li, Y., Zhao, W., Li, Q., Wang, T., & Wang, G. (2019). In-situ monitoring and diagnosing for fused filament fabrication process based on vibration sensors. *Sensors*, 19(11). <https://doi.org/10.3390/s19112589>
- Ronquillo, C. (2023). *Predicción del estado de operación de una impresora 3D mediante redes de sensores y algoritmos de aprendizaje profundo* (Tesis de maestría). Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/7856>
- Soto-Ocampo, C. R., Mera, J. M., Cano-Moreno, J. D., & García-Bernardo, J. L. (2020). Low-cost, high-frequency data acquisition system for condition monitoring of rotating machinery through vibration analysis: Case study. *Sensors*, 20(12), 3493. <https://doi.org/10.3390/s20123493>
- SparkFun. (s.f.). *MPU-6050 6-DoF IMU breakout*. <https://www.sparkfun.com/products/11028>
- Vos, K., Peng, Z., Jenkins, C., Shahriar, M. R., Borghesani, P., & Wang, W. (2022). Vibration-based anomaly detection using LSTM/SVM approaches. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169, 108752. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108752>

TABLA TRABAJO COLABORATIVO

| Rol | Autor (es) |
|---|---|
| Conceptualización | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Irving Bruno López Santos (30) |
| Metodología | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Laura Elizabeth Silva Leyva (30) |
| Software | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Ismael Esquivel Mancha (30) |
| Validación | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Ismael Esquivel Mancha (30) |
| Análisis Formal | Carlos Alberto Ronquillo Salas (50), Irving Bruno López Santos (25), Jesús Armando Holguín López (25) |
| Investigación | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Ismael Esquivel Mancha (30) |
| Recursos | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Jesús Armando Holguín López (30) |
| Curación de datos | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Ismael Esquivel Mancha (30) |
| Escritura - Preparación del borrador original | Carlos Alberto Ronquillo Salas (70), Ismael Esquivel Mancha (30) |
| Escritura - Revisión y edición | Carlos Alberto Ronquillo Salas (60), Laura Elizabeth Silva Leyva (20), Irving Bruno López Santos (20) |