ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.848

Precision Analysis and Calibration of the MPU6050 Sensor for Tremor Measurement in Parkinson's Disease

Yessica Sáez, PhD[1,2], Lissette Peña Batista[1], Cristian Ureña[1], and Edwin Collado, PhD[1,2,*]
[1]Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá *{yessica.saez, lissette.pena1, cristian.urena, edwin.collado}@utp.ac.pa*
[2]Centro de Estudios Multidiciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá
**Corresponding author: edwin.collado@utp.ac.pa*

Abstract–Parkinson's disease (PD) is a neurodegenerative disorder characterized by motor symptoms such as resting tremors, which can significantly impact patients' quality of life. The ELENA Project aims to develop an Internet of Things (IoT)-based system for monitoring motor symptoms in individuals with PD. To achieve this, it is essential to use precise and calibrated measurement sensors. This study analyzes the accuracy of the MPU6050 sensor, a low-cost accelerometer and gyroscope, through a process of calibration, experimental testing, and validation. A six-position calibration was implemented to correct the sensor offset and improve measurement reliability. Subsequently, tests were conducted using a uniaxial vibration table, where the sensor's response to controlled frequencies and amplitudes was evaluated. Additionally, the results obtained were compared with those of an Apple Watch, a commercially available device, to assess the accuracy of the MPU6050 in tremor detection. The results showed that the MPU6050, after calibration, was capable of accurately recording simulated tremors in the laboratory, with an average error of less than 1% in most measurements. This confirms the importance of an appropriate calibration process to ensure reliable measurements in tremor monitoring systems for PD patients. Finally, the experimental validation suggests that the MPU6050 can be used as a low-cost alternative within the ELENA Project, facilitating the detection and remote monitoring of motor symptoms in individuals with Parkinson's disease.

Keywords-- Sensor calibration, Parkinson's disease, Internet of Things (IoT), Tremor monitoring, MPU6050 sensor.

Análisis de Precisión y Calibración del Sensor MPU6050 para la Medición de Temblores en la Enfermedad de Parkinson

Yessica Sáez, PhD[1,2], Lissette Peña Batista[1], Cristian Ureña[1], and Edwin Collado, PhD[1,2,*]
[1]Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá *{yessica.saez, lissette.pena1, cristian.urena, edwin.collado}@utp.ac.pa*
[2]Centro de Estudios Multidiciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá
**Corresponding author: edwin.collado@utp.ac.pa*

Resumen–La enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno neurodegenerativo caracterizado por síntomas motores como temblores en reposo, los cuales pueden afectar significativamente la calidad de vida de los pacientes. El Proyecto ELENA tiene como objetivo desarrollar un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de síntomas motores en personas con EP. Para ello, es fundamental contar con sensores de medición precisos y calibrados. En este estudio, se analiza la precisión del sensor MPU6050, un acelerómetro y giroscopio de bajo costo, a través de un proceso de calibración, pruebas experimentales y validación. Se implementó una calibración de seis posiciones para corregir el offset del sensor y mejorar la fiabilidad de las mediciones. Posteriormente, se realizaron pruebas en una mesa vibratoria uniaxial, donde se evaluó la respuesta del sensor ante frecuencias y amplitudes controladas. Además, se compararon los resultados obtenidos con los de un Apple Watch, un dispositivo comercialmente disponible, para evaluar la precisión del MPU6050 en la detección de temblores. Los resultados mostraron que el MPU6050, tras su calibración, es capaz de registrar con precisión los temblores simulados en el laboratorio, con un error promedio inferior al 1% en la mayoría de las mediciones. Esto confirma la importancia de un adecuado proceso de calibración para garantizar mediciones confiables en sistemas de monitoreo de temblores en pacientes con EP. Finalmente, la validación experimental sugiere que el MPU6050 puede ser utilizado como una alternativa de bajo costo dentro del Proyecto ELENA, facilitando la detección y el seguimiento remoto de los síntomas motores en personas con Parkinson.

Palabras clave-- Calibración de sensores, Enfermedad de Parkinson, Internet de las Cosas (IoT), Monitorización de temblores, Sensor MPU6050.

I. Introducción

La enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno neurodegenerativo caracterizado por síntomas motores como temblores en reposo, rigidez y bradicinesia. Dentro de estos, el temblor en reposo es uno de los más prevalentes y utilizados como criterio diagnóstico [1]. La cuantificación precisa de estos temblores es esencial para evaluar la progresión de la enfermedad y la eficacia de los tratamientos. En este contexto, el Proyecto ELENA se dedica al desarrollo de tecnologías de asistencia basadas en el Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo continuo de los síntomas motores en personas con EP [2], [3], [4].

El monitoreo de temblores en la EP se ha abordado mediante diferentes tecnologías, incluyendo acelerómetros, giroscopios y sistemas de sensores inerciales. Los dispositivos comerciales, como el Apple Watch y otros dispositivos portátiles, han demostrado ser herramientas útiles para la detección de temblores, aunque su precisión puede verse afectada por el ruido y la falta de calibración específica para aplicaciones clínicas [5]. Investigaciones recientes han explorado el uso de sensores basados en tecnología microelectromecánica (MEMS), de bajo costo, como el MPU6050, para la medición de temblores en pacientes con Parkinson debido a su accesibilidad y capacidad para registrar datos en tiempo real. El estudio presentado por Yang et al. en [6], propone un dispositivo portátil para la detección temprana del Parkinson mediante el análisis de temblores en los dedos. Utiliza el sensor MPU6050 para medir la aceleración y velocidad angular. Con Bluetooth Low Energy (BLE), los datos se transmiten en tiempo real con bajo consumo de energía. Los resultados muestran que el dispositivo permite una detección precisa y prolongada, facilitando el diagnóstico y tratamiento temprano. El trabajo presentado por Ali et al. en [7] propone un dispositivo que busca detectar el Parkinson en sus etapas iniciales mediante un acelerómetro económico y un microcontrolador de código abierto para análisis en tiempo real. El dispositivo utiliza los sensores ADXL335 y MPU6050, siendo este último más preciso para predecir la progresión de la enfermedad. Los resultados se simularon en MATLAB, demostrando que la amplitud del temblor y el procesamiento de la señal permiten evaluar la intensidad del Parkinson. El trabajo de Baby, Cyril Joe, et al. en [8] propone una cuchara inteligente para personas con Parkinson que estabiliza el movimiento de la mano para evitar derrames. Este dispositivo usa el sensor MPU6050 para monitorear variaciones en yaw, pitch y roll, enviando datos a un microcontrolador que acciona servos para contrarrestar los temblores. Un controlador PID mantiene la cuchara nivelada, mientras que IoT permite monitoreo remoto y Machine Learning detecta anomalías, enviando alertas a cuidadores.

Uno de los principales desafíos en el uso de sensores MEMS para aplicaciones biomédicas es la precisión en la medición de los temblores [9]. La falta de calibración puede introducir errores sistemáticos en las mediciones, afectando la

interpretación de los datos y la fiabilidad del diagnóstico. Estudios han demostrado que la calibración del MPU6050 utilizando el método de seis posiciones permite corregir desviaciones y mejorar la exactitud de las mediciones, asegurando que los valores obtenidos reflejen con mayor precisión el movimiento real del paciente [10], [11]. Este enfoque consiste en colocar el acelerómetro en seis orientaciones específicas para analizar sus características estáticas. Mejoras a este método incluyen el uso de filtros de Kalman [10] para refinar las mediciones, la corrección iterativa de parámetros para mayor precisión sin necesidad de una plataforma giratoria y técnicas de calibración de bajo costo con movimientos manuales y algoritmos de mínimos cuadrados. Estos métodos reducen significativamente los errores de estimación y mejoran la precisión, haciendo que los acelerómetros MEMS sean más fiables para aplicaciones en ingeniería.

En el ámbito clínico, la aplicación de técnicas de calibración y análisis espectral ha permitido mejorar la fiabilidad de los sistemas de monitoreo de temblores. El método de Welch, por ejemplo, ha sido ampliamente utilizado para la estimación espectral de señales biomédicas, ya que reduce la varianza en la estimación de la densidad espectral de potencia (PSD), proporcionando una mejor representación de la señal [12], [13]. Adicionalmente, dispositivos diseñados específicamente para la medición de temblores han implementado técnicas avanzadas de procesamiento de señal, logrando niveles de precisión comparables a sistemas clínicos más costosos.

En este estudio, se realizó un análisis de precisión del sensor MPU6050 mediante un proceso de calibración y pruebas experimentales. Se implementó una calibración de seis posiciones para corregir el offset del acelerómetro, asegurando que las mediciones reflejen correctamente la aceleración debida a la gravedad. Posteriormente, el sensor fue sometido a pruebas en una mesa vibratoria uniaxial, donde se evaluó su respuesta ante frecuencias y amplitudes controladas. Finalmente, se realizó una validación experimental comparando los datos obtenidos con los de un Apple Watch, un dispositivo comercialmente disponible con un acelerómetro integrado, con el objetivo de determinar la fiabilidad del MPU6050 en la medición de temblores de Parkinson.

Los resultados de este estudio proporcionan conocimientos clave sobre la precisión del MPU6050 en este tipo de aplicaciones y resaltan la importancia de una calibración adecuada para garantizar mediciones confiables en sistemas de monitoreo basados en IoT. La validación experimental permitirá determinar si este sensor puede ser utilizado dentro del Proyecto ELENA para la detección remota de síntomas motores en pacientes con EP, ofreciendo una alternativa de bajo costo y accesible para el seguimiento de la enfermedad.

II. Materiales y Métodos

A. *Calibración del Sensor MPU6050*

El sensor MPU6050, basado en tecnología microelectromecánica (MEMS), requiere calibración para compensar posibles errores de fabricación, instalación y perturbaciones externas. Para ello, se utilizó el método de calibración de seis posiciones, un procedimiento ampliamente empleado por su simplicidad y bajo costo [11], [14]. La calibración se llevó a cabo en un entorno de laboratorio utilizando un cubo de madera como soporte. El sensor fue fijado con cinta adhesiva y se etiquetaron sus ejes para facilitar la orientación. Durante el procedimiento, el sensor fue colocado en seis posiciones distintas (Ver Fig. 1), esperando que en cada una de ellas se registrara un valor aproximado de 1 g cuando el eje estuviera alineado con la fuerza de gravedad.

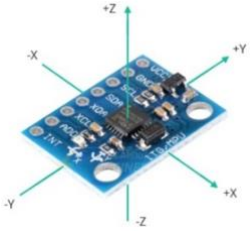


Fig. 1 Diagrama de orientación del MPU6050.

Para obtener los datos de calibración, se programó un código en Arduino IDE que permitió capturar lecturas del sensor MPU6050 y calcular los valores de corrección a partir de 1,000 muestras (Ver Fig. 2). Se establecieron los rangos del sensor en ±2 g para el acelerómetro y ±250 °/s para el giroscopio, con sensibilidades de 16,384 LSB/g y 131 LSB/(°/s), respectivamente. Tras realizar la calibración, se implementó el filtro digital de pasa bajo (DLPF) incorporado en el MPU6050 para mejorar la estabilidad de las mediciones. La configuración del filtro se realizó siguiendo las recomendaciones del fabricante, asegurando así la fiabilidad de los datos en las pruebas posteriores [15].

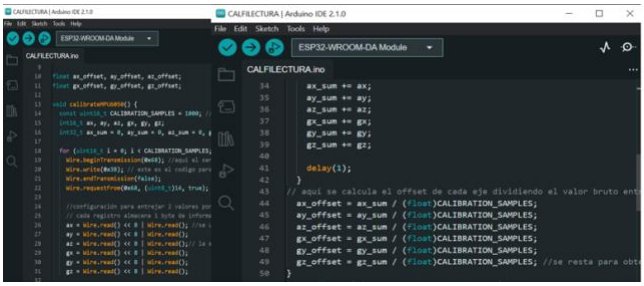


Fig. 2 Programación realizada para la calibración del MPU6050.

TABLA I. Configuración del filtro digital de pasa bajo del MPU6050. Fuente: [15].

DLPF_CFG	Accelerometer (F_s = 1kHz)		Gyroscope		
	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Fs (kHz)
0	260	0	256	0.98	8
1	184	2.0	188	1.9	1
2	94	3.0	98	2.8	1
3	44	4.9	42	4.8	1
4	21	8.5	20	8.3	1
5	10	13.8	10	13.4	1
6	5	19.0	5	18.6	1
7	RESERVED		RESERVED		8

B. *Pruebas con mesa vibratoria*

Para evaluar la precisión del sensor MPU6050 en la medición de vibraciones similares a los temblores de Parkinson, se llevó a cabo una prueba utilizando una mesa vibratoria uniaxial MTS, comúnmente utilizada en simulaciones de sismos. La mesa permitió programar distintas frecuencias y amplitudes, replicando condiciones similares a los temblores en pacientes con enfermedad de Parkinson. La prueba se realizó en el laboratorio de pruebas y ensayos del departamento de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, como se muestra en la Fig. 4.

El sensor fue fijado a la mesa vibratoria con cinta adhesiva para evitar desplazamientos no deseados. Se orientó el eje X del acelerómetro paralelamente al movimiento de la mesa, asegurando una correcta medición de los desplazamientos (Ver Fig. 3). La adquisición de datos se realizó mediante un microcontrolador programado en Arduino IDE, utilizando el software PLX-DAQ para transferir la información en tiempo real a Microsoft Excel (Ver Fig. 4). Posteriormente, los datos fueron analizados en MATLAB R2023.

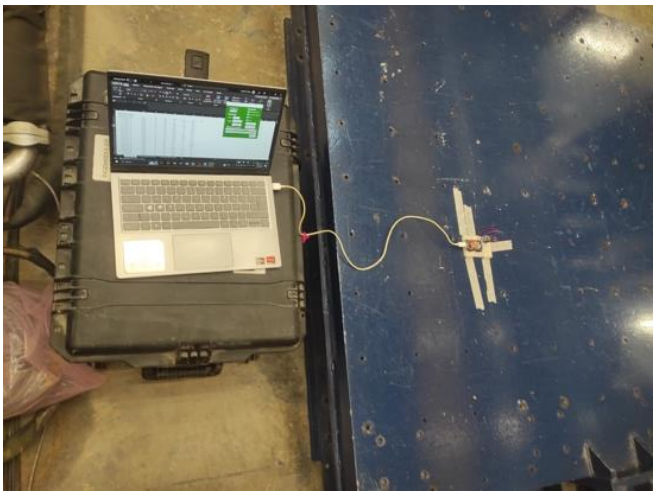


Fig. 3 Ubicación del MPU6050 en la mesa vibratoria MTS. Fuente: [16].

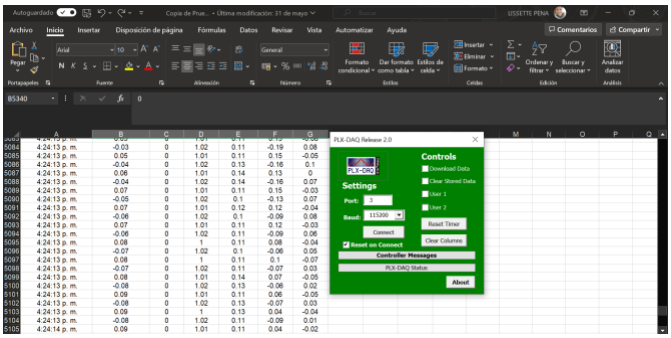
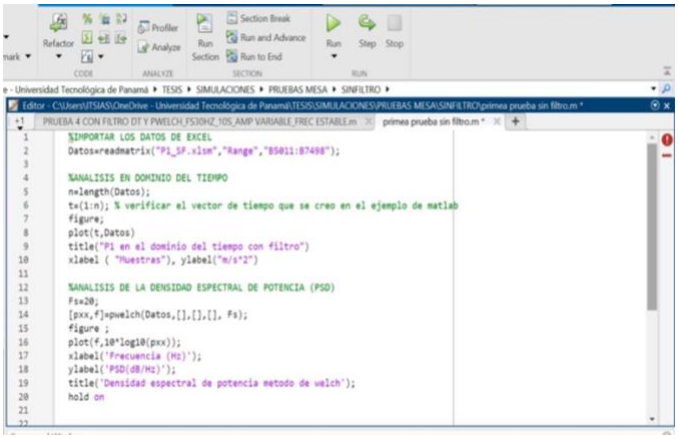


Fig. 4 Configuración del software PLX-DAQ.

Durante la prueba se ejecutaron cinco experimentos distintos. En la primera prueba, se activó el filtro digital de paso bajo del MPU6050 y se programó un barrido de frecuencias de 0.5 a 12 Hz, con incrementos de 0.5 Hz cada 30 segundos, manteniendo una amplitud fija de 5 mm. En la segunda prueba, la frecuencia de muestreo del sensor se incrementó a 30 Hz y el barrido de frecuencias se realizó entre 1 y 12 Hz con incrementos de 1 Hz cada 15 segundos. La tercera prueba extendió el rango del barrido de frecuencias hasta 15 Hz, manteniendo una frecuencia de muestreo de 30 Hz. En la cuarta prueba, en lugar de modificar la frecuencia, se estableció un valor fijo de 2.5 Hz y se variaron las amplitudes de 0.5 a 6.5 cm en incrementos de 0.5 cm cada 10 segundos. Finalmente, en la quinta prueba, se evaluó el sensor sin el filtro de paso bajo, manteniendo una amplitud fija de 2 mm y variando la frecuencia de 1 a 12 Hz con incrementos de 1 Hz cada 15 segundos.

Los datos obtenidos fueron almacenados en Excel y posteriormente procesados en MATLAB R2023 utilizando la función *readmatrix*. Para analizar las señales en el dominio de la frecuencia, se aplicó el método de Welch (*pwelch*), mostrado en la Fig. 5, el cual permite reducir la varianza de la estimación espectral y mejorar la interpretación de las señales. Se compararon los espectros obtenidos en cada prueba para evaluar la respuesta del sensor bajo diferentes condiciones.



```
%IMPORTAR LOS DATOS DE EXCEL
Datos=readmatrix("P1_SF.xlsm","Range","B5011:B7498");

%ANALISIS EN DOMINIO DEL TIEMPO
n=length(Datos);
t=(1:n); % verificar el vector de tiempo que se creo en el ejemplo de matlab
figure;
plot(t,Datos)
title("P1 en el dominio del tiempo con filtro")
xlabel ( "Muestras"), ylabel("m/s^2")

%ANALISIS DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA (PSD)
Fs=20;
[pxx,f]=pwelch(Datos,[],[],[], Fs);
figure ;
plot(f,10*log10(pxx));
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('PSD(dB/Hz)');
title('Densidad espectral de potencia metodo de welch');
hold on
```

Fig. 5 Parte del script para calcular la PSD por medio del método de Welch en MATLAB.

C. *Validación experimental del sensor en laboratorio*

Como parte del proceso de validación del sensor MPU6050, se realizaron pruebas de laboratorio y una demostración de su funcionamiento. Para estas pruebas, se conectó un generador de frecuencia a un generador de vibraciones y se colocó el sensor sobre este último, asegurando su correcta alineación (Ver Fig. 6). Se configuró el generador de frecuencia para producir vibraciones controladas con características específicas, lo que permitió evaluar el desempeño del sensor en condiciones controladas.

Fig. 6 Preparación del equipo en el generador de vibraciones para recolección y análisis de datos en MATLAB.

Durante la prueba, el sensor MPU6050 capturó los datos de vibración generados, los cuales fueron posteriormente procesados mediante un código desarrollado en MATLAB (Fig. 8). Como parte del análisis, los datos obtenidos por el sensor fueron comparados con los de un Apple Watch que tenía instalada la aplicación Tremor Analysis para medir la frecuencia fundamental del movimiento utilizando su acelerómetro interno (Fig. 7). La comparación de los resultados permitió verificar la precisión del sensor de bajo costo frente a un dispositivo comercialmente disponible.

Fig. 7 Datos obtenidos por el Apple Watch.

III. Resultados y Discusión

A. *Resultados de la Calibración del Sensor MPU6050*

La calibración del sensor MPU6050 utilizando el método de seis posiciones permitió obtener valores cercanos a 1 g en el eje alineado con la gravedad. Se observó que los valores de aceleración medidos en cada una de las seis orientaciones fueron consistentes con los esperados, lo que confirma la adecuada corrección de offset en el acelerómetro. Tras implementar el filtro digital de pasa bajo (DLPF), se logró una reducción del ruido en las lecturas, mejorando la estabilidad de los datos adquiridos (Ver Fig. 8).

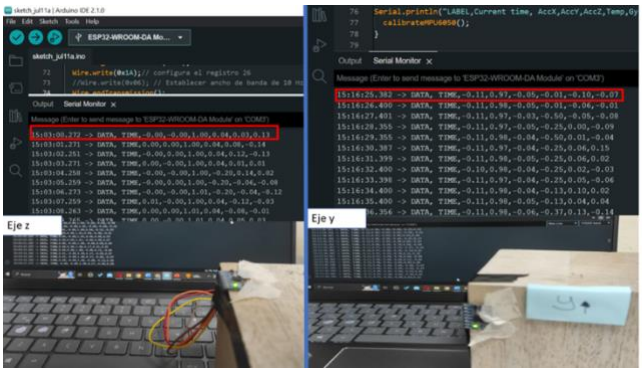


Fig. 8 Calibración de los ejes "z, y" del acelerómetro. Fuente: [16]

B. *Resultados de pruebas con mesa vibratoria*

Las pruebas con la mesa vibratoria permitieron evaluar el comportamiento del sensor MPU6050 bajo diferentes condiciones de frecuencia y amplitud. En la primera prueba, donde se utilizó el filtro de paso bajo y una frecuencia de muestreo de 20 Hz, el sensor detectó con precisión variaciones de frecuencia entre 0.5 y 12 Hz, con incrementos de 0.5 Hz cada 30 segundos. En la segunda prueba, al aumentar la frecuencia de muestreo a 30 Hz, la estabilidad de la señal mejoró notablemente. La Fig. 9 muestra cómo el sensor responde a las frecuencias programadas con el filtro activado, proporcionando una visión clara de la estabilidad de la señal en el dominio del tiempo.

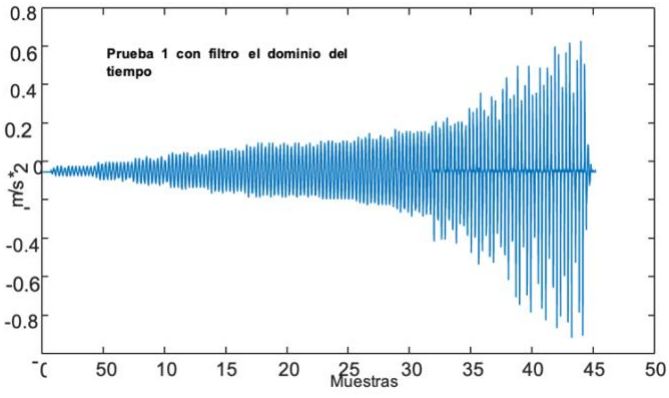


Fig. 9 Primera prueba realizada con el filtro de paso bajo en el dominio del tiempo.

La tercera prueba amplió el rango del barrido de frecuencia hasta 15 Hz, manteniendo una respuesta estable del sensor en todo el espectro analizado. En la cuarta prueba, al variar la amplitud en un rango de 0.5 a 6.5 cm, se observó que el sensor fue capaz de capturar con precisión los cambios en la amplitud de la vibración, manteniendo una respuesta coherente con los valores programados en la mesa vibratoria

Finalmente, en la quinta prueba, donde se desactivó el filtro de paso bajo, se observó un incremento en el ruido de la señal, lo que afectó la precisión de la detección de frecuencias (Fig. 10). Esto confirma la importancia del uso de filtros para mejorar la calidad de las mediciones del MPU6050.

B. Resultados de las pruebas de validación experimental del sensor en laboratorio

Para validar el desempeño del sensor MPU6050, se realizaron pruebas en laboratorio utilizando un generador de vibraciones y comparando sus mediciones con las obtenidas por un Apple Watch. Es importante señalar que la aplicación Tremor Analysis en el Apple Watch está diseñada para detectar y mostrar temblores con frecuencias superiores a 3 Hz.

En la primera prueba, se configuró el generador de vibraciones en distintas frecuencias y se analizaron las respuestas del Apple Watch y el sensor MPU6050. Se observó una alta correspondencia entre ambos dispositivos, con un margen de error menor al 1% en la mayoría de las frecuencias evaluadas (Ver TABLA II).

TABLA II
COMPARACIÓN DE ANÁLISIS ENTRE APPLE WATCH Y PROTOTIPO ELENA.

Frecuencia del generador Hz	Apple watch Hz	Prototipo ELENA Hz
1	0	0,968
2	0	2,025
3	0	3,066
4	4	4,032
5	5	5,04
6	6	5,97
7	7	7,031
8	8	8,012
9	9	9,032
10	10	9,885
11	11	10,993
12	11,9	12,048

En la segunda prueba, donde se variaron las frecuencias del generador en diferentes rangos, se verificó que el sensor MPU6050 fue capaz de detectar correctamente las variaciones impuestas, mostrando una respuesta estable y precisa en comparación con el Apple Watch (Ver TABLA III, Fig. 11, Fig. 12).

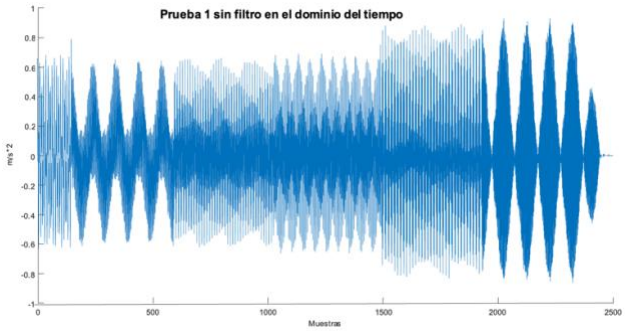


Fig. 10 Prueba cinco sin filtro en el dominio del tiempo

TABLA III.
COMPARACIÓN DE ANÁLISIS ENTRE APPLE WATCH Y SENSOR MPU6050 CON VARIACIÓN DE FRECUENCIA.

Frecuencia del generador de señales en Hz	Frecuencia del Apple watch en Hz	Freucneica del Sensor MPU6050 en Hz
1--3	0	1,011 -- 3,035
3--5	4,9	3,065 -- 5,043
5--7	5--7	5,176 -- 7,059
7--9	7--9	7,021 -- 9,098
9--12	9--12	8,955 -- 12,033
4--6--8	0--6--8	4,084 -- 5,984 -- 8,073

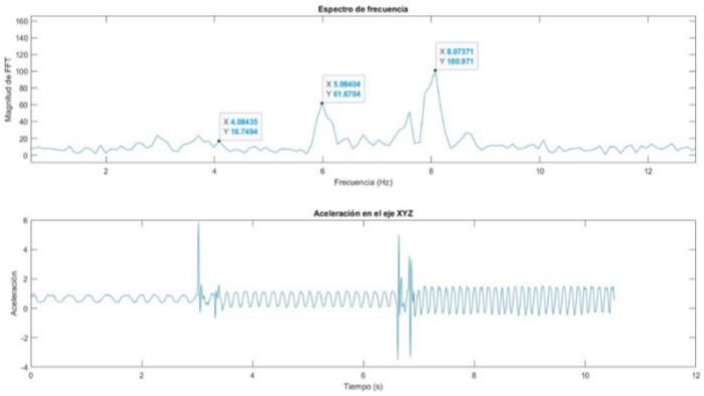


Fig. 11 Análisis de datos en MATLAB variando la frecuencia del generador.

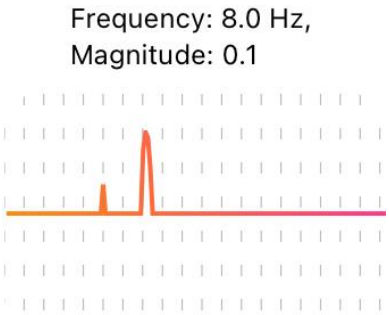


Fig. 12 Análisis de datos en Apple Watch variando la frecuencia del

Finalmente, en la tercera prueba, se calculó el porcentaje de error del sensor MPU6050 en frecuencias específicas, realizando diez mediciones para cada frecuencia. Se obtuvo un error global promedio de -0.38%, confirmando la confiabilidad del sensor en la detección de vibraciones (Ver TABLA IV).

TABLA IV.
COMPARACIÓN DE ANÁLISIS ENTRE APPLE WATCH Y SENSOR MPU6050 CON VARIACIÓN DE FRECUENCIA.

Frecuencia del generador (Hz)	Frecuencia Promedio de Sensor MPU6050 (Hz)	Error Promedio (%)
4	3.990	-0.12
5	4.973	-0.55
6	5.953	-0.52
7	6.969	-0.49
8	7.970	-0.24

II. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó la precisión del sensor MPU6050 en la medición de temblores en la Enfermedad de Parkinson (EP) dentro del Proyecto ELENA, implementando un proceso de calibración de seis posiciones, seguido de pruebas experimentales en una mesa vibratoria uniaxial y una validación comparativa con un Apple Watch. Los resultados obtenidos muestran que, tras la calibración, el MPU6050 es capaz de registrar con precisión las vibraciones simuladas, con un error promedio inferior al 1% en la mayoría de las mediciones. Estos hallazgos resaltan la importancia de la calibración para asegurar mediciones confiables en sistemas de monitoreo de temblores.

Uno de los aspectos más relevantes identificados en este estudio es la importancia del proceso de calibración en sensores MEMS. La calibración de seis posiciones permitió corregir errores sistemáticos y mejorar la estabilidad de las mediciones, asegurando que los valores obtenidos fueran representativos del movimiento real. Esto concuerda con estudios previos que destacan la necesidad de aplicar métodos de calibración en sensores inerciales utilizados en aplicaciones biomédicas. Sin embargo, se observó que factores como el ruido en la señal y las variaciones en la temperatura pueden afectar la precisión del sensor, lo que sugiere la necesidad de implementar técnicas adicionales de procesamiento de señal para mejorar la calidad de las mediciones.

En la validación experimental, se compararon los datos obtenidos del MPU6050 con los registrados por un Apple Watch, un dispositivo comercialmente disponible con acelerómetro integrado. Se observó una alta correlación entre ambas mediciones, lo que sugiere que el MPU6050 puede ser una alternativa viable para la detección de temblores en la EP. No obstante, el Apple Watch mostró una mayor estabilidad en la medición de frecuencias más altas, lo que podría atribuirse a la implementación de algoritmos avanzados de procesamiento de señal dentro del dispositivo. A pesar de estas diferencias, el MPU6050 representa una opción de bajo costo y fácil implementación, lo que facilitaría su integración dentro del Proyecto ELENA y permitiría extender la monitorización de temblores a un mayor número de pacientes, especialmente en entornos donde el acceso a dispositivos comerciales es limitado.

A pesar de los resultados prometedores, este estudio presenta algunas limitaciones. En primer lugar, las pruebas fueron realizadas en un entorno controlado, lo que no necesariamente representa las condiciones reales de un paciente con Parkinson. Además, aunque se utilizó un método de calibración adecuado, podrían explorarse otros enfoques más avanzados, como la calibración dinámica mediante algoritmos de optimización basados en aprendizaje automático. Otro aspecto que considerar es que el sensor fue validado en una mesa vibratoria uniaxial, lo que no refleja completamente la complejidad del movimiento en pacientes con EP, quienes pueden experimentar temblores en múltiples direcciones y con variabilidad en su intensidad.

Este estudio establece una base sólida para futuras investigaciones en la monitorización de temblores mediante sensores de bajo costo. Como líneas de trabajo futuras, se propone implementar algoritmos avanzados de procesamiento de señal que permitan mejorar la detección de temblores y reducir el impacto del ruido en la señal capturada por el MPU6050. Además, es fundamental realizar validaciones en entornos reales, con pacientes diagnosticados con EP, para evaluar el desempeño del sensor en situaciones cotidianas y analizar cómo factores como el movimiento involuntario de la extremidad pueden influir en la calidad de las mediciones.

Otra dirección importante es el desarrollo de modelos predictivos basados en inteligencia artificial (IA), los cuales podrían analizar patrones en los datos de temblores y generar alertas tempranas sobre la progresión de la enfermedad. Asimismo, la optimización en la transmisión de datos en tiempo real dentro del sistema del Proyecto ELENA permitiría que los médicos accedan a la información de los pacientes de manera remota, mejorando así la capacidad de diagnóstico y seguimiento de la enfermedad.

Finalmente, este estudio demuestra que el MPU6050, tras su calibración, es una herramienta viable para la medición de temblores en pacientes con Enfermedad de Parkinson, ofreciendo una alternativa de bajo costo para la monitorización remota de síntomas motores. Sin embargo, aún existen desafíos que deben ser abordados para mejorar su precisión y aplicabilidad en entornos clínicos. El desarrollo de soluciones basadas en IoT e inteligencia artificial representa una oportunidad para ampliar el alcance de este tipo de tecnologías, brindando herramientas innovadoras para el monitoreo y tratamiento de la EP.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de la República de Panamá por el financiamiento otorgado al Proyecto FID22-040 (Proyecto ELENA). Los autores Edwin Collado y Yessica Sáez también agradecen al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por brindar financiamiento parcial para este trabajo.

Lissette Peña agradece el apoyo de la Dra. Catalina Alvarado Rojas del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, por brindar orientación y supervisión durante la pasantía de investigación.

REFERENCIAS

[1] L. V. Kalia and A. E. Lang, "Parkinson's Disease," The Lancet, vol. 386, no. 9996, pp. 896-912, 2015.

[2] L. Peña, C. Ureña, E. Collado and Y. Sáez, "Initial validation of ELENA: a low-cost device for tremor monitoring in Parkinson's patients," in 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0, San José, Costa Rica, 2023.

[3] L. Pena, E. Collado and Y. Saez, "Explorando los avances y desafios en la monitorizacion continua de temblores para la enfermedad de Parkinson: una revision sistematica," I+D Tecnologico, vol. 20, no. 2, pp. 115-128, 2024.

[4] L. Pena, C. Urena, E. Collado and Y. Saez, "Initial Validation of ELENA: an affordable device for monitoring tremors in Parkinson's patients," in 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0, San Jose, Costa Rica, 2024.

[5] l. y. t. Dispositivos comerciales para la monitorización de síntomas en la enfermedad de Parkinson: beneficios, "Rodríguez-Martín, Daniel; Pérez-López , Carlos," Revista de Neurología, vol. 79, no. 8, pp. 229-237, 2024.

[6] H. Yang, Y. Shen, W. Zhuang, C. Gao, D. Dai and W. Zang, "A smart wearable ring device for sensing hand tremos of Parkinson's Patientes," Computer Modeling in Engineering & Sciences, vol. 126, no. 3, pp. 1217-1238, 2021.

[7] S. Ali, A. Akhtar, M. Khan and M. Bilal, "Detection of Parkinson's tremor in real time using accelerometers," in 2021 IEEE 7th International conference on smartinstrumentation, measurement and apllication (ICSIMA), Bandung, Indonesia, 2021.

[8] C. Baby, A. Mazumdar, H. Sood, Y. Gupta, A. Panda and R. Poonkuzhali, "Parkinson's Disease Assiist Device Using Machine Learning and Internet of Things," in 2018 International conference on communication and signal processing (ICCSP), Chennai, India, 2018.

[9] P. Pattanaik and M. Ojha, "Review on challenges in MEMS technology," Materials today: proceedings, vol. 81, pp. 224-226, 2023.

[10] Y. Liu, G. Xiang, Y. Lu, Y. Cao, Y. Li and L. Lv, "Calibration of MEMS Accelerometer Based on Kalman Filter and the Improved SIx Position Method," Journal of Communications, vol. 11, no. 5, pp. 516-522, 2016.

[11] T. Xu, X. Xu, D. Xu and H. Zhao, "A novel calibration method using six position for MEMS triaxial accelerometer," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-11, 2020.

[12] R. P. Gomis, "Estimación espectral de señales biomédicas. Métodos clásicos (FFT) y paramétricos: aplicaciones prácticas con Matlab.," 2013. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/330688/tutorial_estimacion_espectral-5308.pdf. [Accessed 16 1 2025].

[13] S. Tong and N. V. Thankor, Quantitative EEG Analysis Methids and Aplications, Artech House., 2009.

[14] B. Parsi, M. Bahrami, A. M. Esfahani and B. S. Sany, "Calibration verifications of a low-cost methoids for MEMS accelerometers," Transactions of the Institute of Mesarument and Control, vol. 36, no. 4, pp. 579-587, 2014.

[15] T. Electronics, "MPU-6050 Datasheet," [Online]. Available: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132807/TDK/MPU-6050.html. [Accessed 6 November 2024].

[16] Y. Saez, C. Urena, J. G. A. Valenzuela and E. Collado, "A Wearable Internet of Things-Based Device for the Quantitative Assessment of Hand Tremors in Parkinson's Disease: The ELENA Project," Sensors, vol. 25, no. 9, p. 2763, 2025.