

Initial validation of ELENA: a low-cost device for tremor monitoring in Parkinson's patients

Lissette Peña Batista¹, Cristian Ureña¹, Edwin Collado, PhD^{1,2}, and Yessica Sáez, PhD^{1,2, *}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá {lissette.penal, cristian.urena, yessica.saez, edwin.collado}@utp.ac.pa

²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá

*Corresponding author: yessica.saez@utp.ac.pa

Abstract-This article addresses the growing need for an effective system for tremor monitoring in patients with Parkinson's disease (PD). The ELENA project, a low-cost IoT-based device using an MPU6050 accelerometer for accurate detection of hand tremors, is presented. Prototype programming, sensor calibration and validation tests using the pwelch technique allowed accurate identification of tremor frequencies, validating the effectiveness of the system. In addition, a web application was developed in the process of implementation and integrated with ThingSpeak to enable remote monitoring, providing patients and healthcare professionals with easy and secure access to real-time data. Graphical data visualization facilitates understanding of tremor progression, providing valuable information for decision making in treatment and disease management. As future work, we propose to refine the user interface, explore additional measurements, and conduct clinical studies to validate the effectiveness of the system in real-world settings.

Keywords- Low-cost device, Parkinson's disease, Tremor monitoring, Validation.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Validación inicial de ELENA: un dispositivo de bajo costo para el monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson

Lisette Peña Batista¹, Cristian Ureña¹, Edwin Collado, PhD^{1,2}, and Yessica Sáez, PhD^{1,2} *

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá {lisette.pena1, cristian.urena, yessica.saez, edwin.collado}@utp.ac.pa

²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá

*Autor de correspondencia: yessica.saez@utp.ac.pa

Resumen—Este artículo aborda la creciente necesidad de un sistema eficaz para el monitoreo de temblores en pacientes con la enfermedad de Parkinson (EP). Se presenta el proyecto ELENA, un dispositivo de bajo costo basado en tecnología IoT que utiliza un acelerómetro MPU6050 para la detección precisa de temblores en las manos. La programación del prototipo, la calibración del sensor y las pruebas de validación mediante la técnica de Welch permitieron identificar con precisión las frecuencias de temblores, validando la efectividad del sistema. Además, se desarrolló una aplicación web en proceso de implementación y se integró con ThingSpeak para permitir el monitoreo remoto, proporcionando a pacientes y profesionales de la salud acceso fácil y seguro a datos en tiempo real. La visualización de datos en gráficos facilita la comprensión de la progresión de los temblores, ofreciendo información valiosa para la toma de decisiones en el tratamiento y gestión de la enfermedad. Como trabajo futuro, se propone perfeccionar la interfaz de usuario, explorar mediciones adicionales y realizar estudios clínicos para validar la efectividad del sistema en entornos del mundo real.

Palabras claves— Dispositivo de bajo costo, Enfermedad de Parkinson, Monitoreo de temblores, Validación.

I. INTRODUCCIÓN

La Enfermedad de Parkinson (EP) es una patología neurodegenerativa prevalente a nivel global, afectando a un número significativo de personas, y su incidencia continúa en aumento debido al envejecimiento de la población. Esta enfermedad se manifiesta con una variedad de síntomas, siendo los temblores uno de los más prominentes, impactando significativamente la calidad de vida de quienes la padecen [1], [2].

En Panamá, por ejemplo, la Escala Unificada de Evaluación de la Enfermedad de Parkinson (UPDRS) se emplea comúnmente para evaluar la gravedad de la enfermedad [3]. No obstante, las evaluaciones mediante UPDRS son intrínsecamente subjetivas, y se realizan si el tiempo de consulta y la cantidad de pacientes citados así lo permiten.

Una alternativa utilizada por neurólogos panameños son los diarios de pacientes, los cuales proporcionan una vía para que estos o sus cuidadores registren información acerca de su estado de EP entre las visitas clínicas. Sin embargo, mantener registros detallados de forma regular puede resultar tedioso, y recordar con precisión los síntomas supone un desafío, tanto para los pacientes como para sus cuidadores. Por consiguiente, surge la necesidad de un sistema capaz de monitorear los

movimientos de las personas con EP en la vida cotidiana. Un sistema de este tipo podría ofrecer información puntual y reducir la subjetividad. No obstante, desarrollar dispositivos para la monitorización de síntomas como temblores de EP presenta desafíos, como la distinción entre los temblores de EP y las actividades diarias normales, como cepillarse los dientes, comer, escribir, etc. El monitoreo continuo de los temblores de la EP puede proporcionar información valiosa, permitiendo intervenciones oportunas por parte del personal médico y ajustes de tratamiento personalizados basados en datos en tiempo real, mejorando en última instancia la atención al paciente y su calidad de vida.

A pesar de los avances en la comprensión y tratamiento de la EP, las limitaciones de los sistemas actuales de monitoreo de temblores han creado una brecha en la atención a pacientes. La falta de dispositivos precisos y económicamente accesibles para medir la frecuencia e intensidad de los temblores ha dificultado la gestión efectiva de esta condición neurodegenerativa.

La motivación detrás del desarrollo del proyecto ELENA radica en la necesidad de proporcionar una herramienta práctica y asequible para monitorear los temblores en personas con EP. El proyecto ELENA se fundamenta en la aplicación de la electrónica de asistencia basada en Internet de las Cosas (IoT), utilizando dispositivos de bajo costo como sensores inerciales y microcontroladores para detectar y registrar los temblores en las extremidades superiores de los pacientes con Parkinson y posteriormente presentarlos en formato amigable al personal de salud.

II. ESTADO DEL ARTE

La revisión de la literatura existente realizada en un trabajo previo presentado en [4] reveló una serie de estudios que han abordado los desafíos en el monitoreo de temblores en personas con enfermedad de Parkinson (EP), que a su vez cuentan con fortalezas y debilidades. En [5] emplearon un biosensor comercial NIMBLE para evaluar el temblor en diferentes partes del cuerpo, destacando la relevancia de la ubicación de los sensores. En [6] utilizaron el *Leap Motion Controller* para clasificar las mediciones del temblor del paciente, logrando una precisión superior al 98% y 95% para contraste y homogeneidad, respectivamente. Los autores de [7] construyeron un exoesqueleto con sensores IMU y dispositivos comerciales para predecir el temblor y el movimiento voluntario con altos porcentajes de acierto. En [8] los autores implementaron el dispositivo MOX5 con acelerómetro y

giroscopio para predecir el estado de apagado en pacientes con EP, demostrando una fiabilidad significativa. Los autores de [9] evaluaron el temblor utilizando un reloj inteligente SW3 Sony, obteniendo coeficientes de correlación significativos, mientras que los autores de [10] emplearon un teléfono inteligente modelo Sony Xperia SP para comparar clasificadores y apuntes del neurólogo, alcanzando una precisión del 95,91%. Por su parte, en el 2020 los autores de [11] evaluaron el temblor utilizando la Placa Muse en el dorso de la mano, logrando una precisión promedio del 90%. En ese mismo año, los autores de [12] colocaron el sensor Opal en las muñecas de 81 participantes de un estudio para medir movimiento, obteniendo una precisión del 92,82% y mostrando concordancia con las evaluaciones clínicas. Los autores de [13] utilizaron MetaMotionC en la mano del paciente, demostrando que el rendimiento aumentó según el número de funciones empleadas. Los autores de [14] emplearon acelerómetros Axivity AX3 en ambas muñecas, destacando la utilidad de la técnica de extracción del espectro de temblor.

Estos estudios han contribuido significativamente a la comprensión del panorama actual de los sistemas de monitoreo de temblores, proporcionando valiosas perspectivas que han guiado el diseño y desarrollo del prototipo ELENA, abordando las limitaciones identificadas en la literatura.

Aunque se han desarrollado diversos dispositivos, persiste una brecha en la literatura que ELENA busca llenar al proporcionar una solución integral y accesible para el monitoreo continuo de temblores en entornos cotidianos. La falta de dispositivos asequibles y precisos para el monitoreo continuo en el hogar es una limitación clave identificada en muchos estudios. Esto se puede percibir en los trabajos citados. Además, la necesidad de una solución que integre tecnologías de bajo costo para el monitoreo eficaz es una motivación compartida por investigaciones previas.

El objetivo principal de ELENA es diseñar e implementar un prototipo de monitoreo de temblores que pueda ser portado por pacientes con EP. Se busca proporcionar información detallada sobre la frecuencia e intensidad de los temblores en las manos, mejorando así la comprensión de la progresión de la enfermedad y permitiendo una gestión más efectiva.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Metodología

Para la realización de esta investigación, se han empleado varias metodologías, entre las cuales se incluyen enfoques aplicados, experimentales y exploratorios, que han posibilitado la construcción de un prototipo inicial. En la Fig. 1 se presenta el esquema metodológico que guio la fabricación del prototipo. Como se observa, el proceso se inició con la identificación del problema, seguido de una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con la Enfermedad de Parkinson (EP) [4].

Decidimos enfocarnos específicamente en los temblores de las manos, ya que estos constituyen uno de los síntomas más prominentes y afectan significativamente la calidad de vida de los pacientes con EP [1], [2]. Posteriormente, se llevó a cabo la determinación de los requisitos esenciales que debía cumplir el prototipo, tales como tamaño reducido, bajo peso, costo de fabricación accesible, portabilidad sencilla y facilidad de uso por parte del paciente. Guiándonos por estos requisitos, se procedió a la selección de los diversos componentes necesarios para la construcción del prototipo.

Es importante mencionar que este trabajo solo abarca hasta la validación del prototipo en el laboratorio y no se realizaron pruebas con personas. Con el objetivo de brindar una visión más detallada las Fig.1 y Fig. 2 muestran los pasos seguidos y la selección de los componentes utilizados para la elaboración del prototipo.

B. Materiales del prototipo

La selección de los materiales se llevó a cabo mediante una matriz de comparación, donde se evaluaron los componentes electrónicos considerando los requisitos iniciales del proyecto.

1) *Sensor de movimiento*: Para medir la frecuencia del temblor en los pacientes, se optó por utilizar un acelerómetro. El sensor MPU6050 fue seleccionado tras compararlo con otros sensores, eligiéndolo por sus características alineadas con los requisitos iniciales.

2) *Microcontrolador*: Se evaluaron cuatro microcontroladores, seleccionando finalmente el ESP32-Devkit-v1. Los aspectos considerados incluyeron interfaces/módulos, alimentación, consumo, bits, memoria, procesador, relojes y temporizadores, conexión a WiFi, peso y tamaño.

Otros componentes clave incluyen una pantalla *Organic Light-Emitting Diode (OLED)* de 0.96" para mostrar menús y submenús, esto permitirá que el paciente y el cuidado observe y seleccione diversas opciones entre ellas "si ya tomó su fármaco", esto último permitirá llevar un control de los medicamentos (Ver bloque en Fig. 2) que toma el paciente para que el medico verificar el horario y cantidades de la dosis, y la aparición de los primeros temblores y así prescribir los medicamentos dependiendo de la necesidad de cada uno de los pacientes. Sin embargo, en este artículo nos centraremos en otras partes del prototipo.

Cuando el paciente se coloca el prototipo, este inicia la lectura en los tres ejes de aceleración (x, y, z), es importante mencionar que no se hace uso de los otros tres ejes del giroscopio. El microcontrolador interpreta y procesa estos datos, que se envían mediante WiFi a la nube para su almacenamiento y visualización. Como medida adicional, el prototipo permite el almacenamiento de datos en modulo SD (memoria microSD). La Fig. 2 también muestra un bloque llamado "pulsador", representando cuatro botones incorporados en el prototipo para que el usuario pueda seleccionar opciones del menú mostrado en la pantalla OLED.

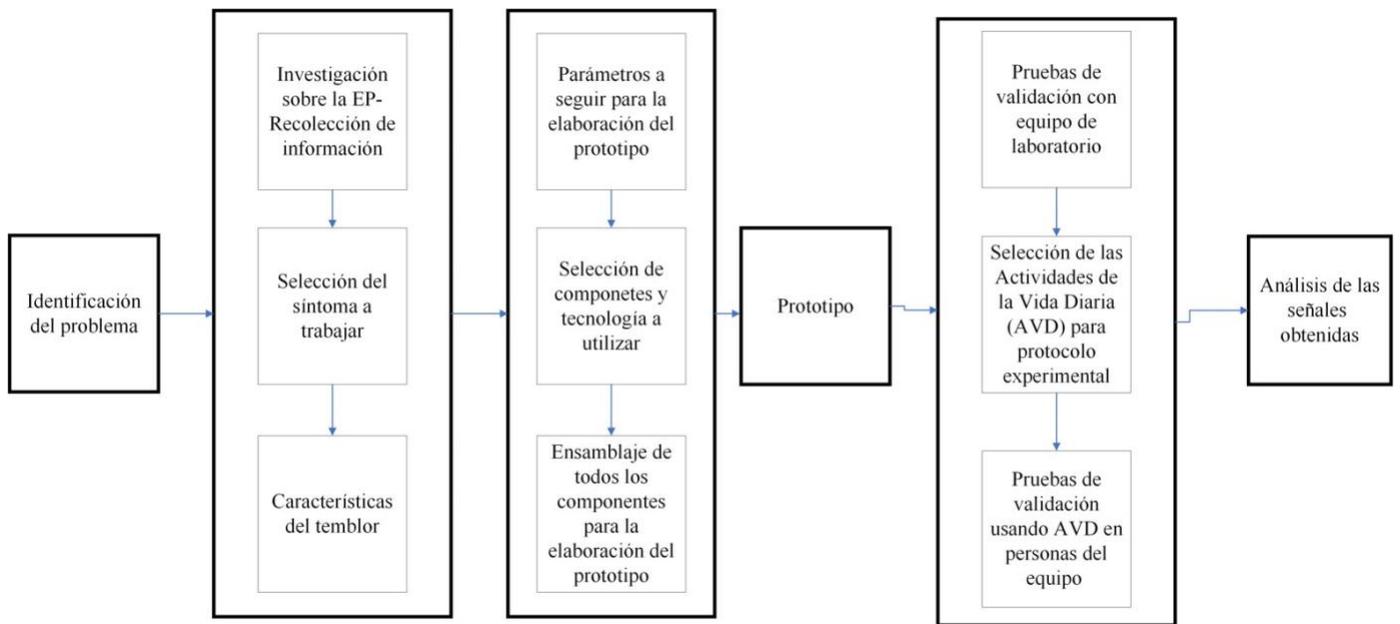


Fig. 1 Metodología propuesta para la elaboración del prototipo.

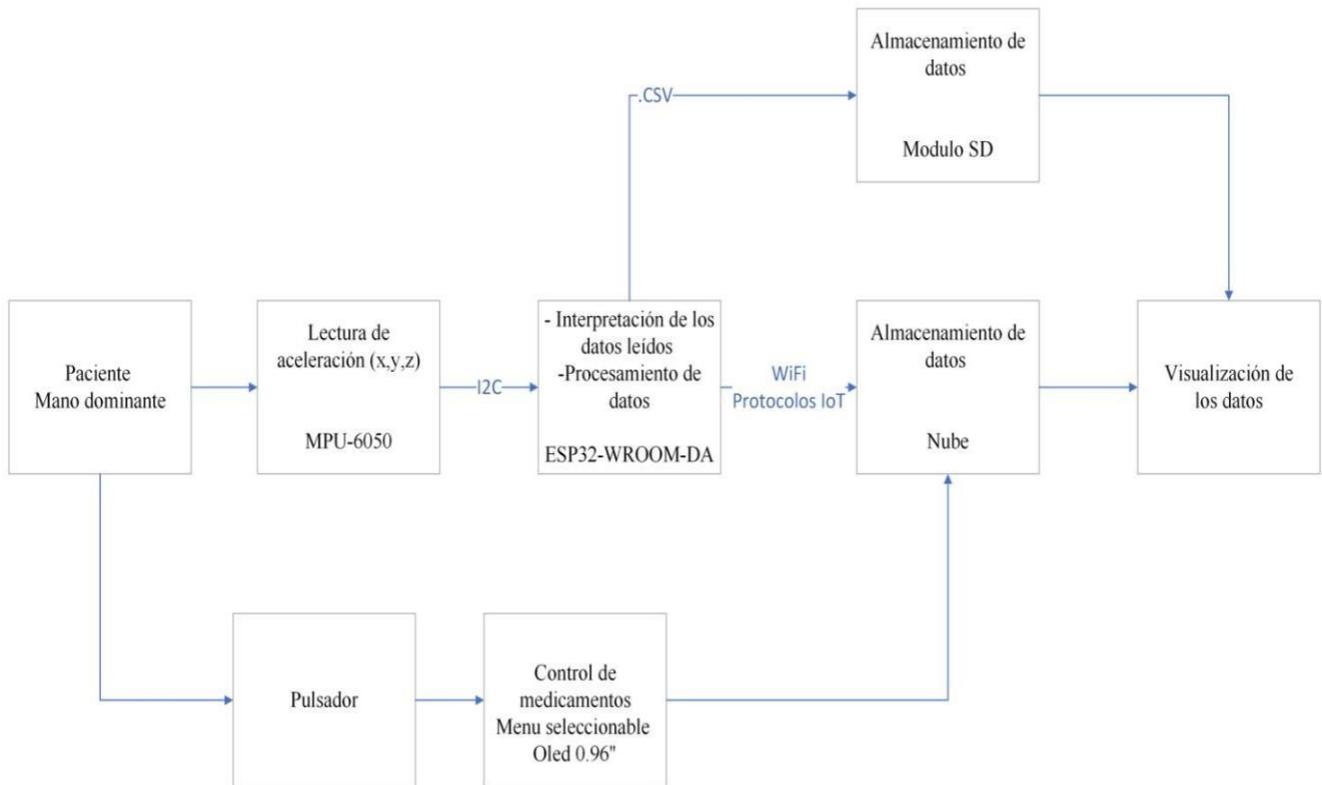


Fig. 2 Diagrama teórico de los componentes para la construcción del prototipo.

C. Diseño 3D del prototipo

El diseño 3D del prototipo ELENA se llevó a cabo mediante el software *Fusion 360*, aprovechando sus capacidades avanzadas para modelado tridimensional. La impresión del diseño se realizó con una impresora 3D *Prusa MK3S*, garantizando una fabricación precisa y eficiente. Durante el proceso de diseño, se prestó especial atención a componentes internos cruciales, asegurando su correcta disposición y funcionalidad.

La concepción del diseño se centró en la optimización de la comodidad y en la obtención de dimensiones adecuadas para su uso en la muñeca de los pacientes. Se realizaron ajustes precisos para garantizar un ajuste ergonómico y un desempeño óptimo del dispositivo. La selección cuidadosa de materiales y la configuración de los parámetros de impresión fueron esenciales para obtener un resultado de alta calidad y durabilidad en la fabricación del prototipo.

Además, para facilitar la construcción y el uso del prototipo, se incorporaron elementos prácticos, como tornillos y correas, que permiten el ensamblaje eficiente del dispositivo y su sujeción segura en la muñeca. Este enfoque integral en el diseño 3D contribuyó significativamente a la funcionalidad y practicidad del prototipo ELENA en su aplicación para el monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson.

D. Adquisición y Procesamiento de Datos

La programación del prototipo se llevó a cabo usando el software Arduino IDE versión 2.1.0. Se optó por este programa debido a su acceso abierto, permitiendo la replicabilidad y un bajo costo de producción al tratarse de un software gratuito.

La programación para la adquisición de datos constó de dos partes fundamentales: la calibración del sensor y la lógica de adquisición de datos.

Cuando se trabaja con sensores basado en la tecnología microelectromecánica o MEMS es importante considerar la calibración, puesto que estos no siempre son precisos debido a las diferentes fallas de instalación, construcción y perturbaciones externas. Existen diversas pruebas que se pueden utilizar para la calibración de acelerómetros y giroscopio, sin embargo, muchas requieren de gran cantidad de tiempo y la implementación de instrumentos que pueden llegar a ser más costosos que los propios sensores [15].

En esta primera etapa de validación se trabajó con una de las pruebas más sencillas y antiguas de laboratorio que no consumen mucho tiempo y dinero. Esta prueba a la que algunos autores denominan método de calibración de seis posiciones [16] se basa en la colocación del sensor de manera estática en seis diferentes posiciones. Y se espera que si el sensor se encuentra bien calibrado este debe generar valores aproximados a los $9,8 \text{ m/s}^2$ o 1 gravedad (g).

El procedimiento de calibración del sensor MPU6050 implicó pruebas específicas del acelerómetro, donde se tomaron mil muestras crudas del sensor y se acumularon en tres variables independientes (ax_sum, ay_sum, az_sum).

Posteriormente se calculó el promedio dividiendo la suma acumulada por el número de muestras. Estos promedios son establecidos como valores offset para cada eje (ax_offset, ay_offset, az_offset), los valores del offsets son usados en las siguientes partes del código para corregir las lecturas y obtener mediciones más precisas. Se realizó un proceso matemático para obtener valores calibrados, utilizando la sensibilidad elegida para el acelerómetro y el giroscopio. La configuración del MPU6050 incluyó la elección de rangos para el acelerómetro y el giroscopio, con sus respectivas sensibilidades, obtenidas de la hoja de datos del fabricante. Se realizaron pruebas de calibración para verificar el comportamiento correcto del sensor, utilizando un cubo de madera con ejes orientados para facilitar la identificación de los ejes paralelos a la gravedad. Finalmente, se llevó a cabo la programación del *Digital Low Pass Filter*, utilizando una tabla proporcionada por el fabricante para configurar el filtro tanto para el acelerómetro como para el giroscopio.

Una vez calibrado el sensor, se debe proceder con la lógica de la adquisición de datos. En este caso, los datos leídos fueron enviados mediante el puerto COM a una hoja de Microsoft Excel usando el complemento de software *Parallax Logic Explorer Data Acquisition (PLX-DAQ R2)*. Los datos fueron importados y analizados en Matlab R2023a en el dominio del tiempo, y en el dominio de la frecuencia. Para el primero caso se calculó la longitud de los datos y se normalizaron restándole la media, se estableció una frecuencia de muestreo de 20 Hz, asegurándonos de cumplir con el criterio de Nyquist. Se creó un vector de tiempo y se procedió a generar los gráficos en el dominio del tiempo. Para el dominio de la frecuencia se utilizó la función de Densidad Espectral de Potencia (*Power Spectral Density, PSD*) mediante el método de Welch, el cual ya ha sido utilizado en estudios previos que analizan el temblor de Parkinson ([2], [17], [18], [19]) y que en Matlab se usa bajo la función de “*pwelch*”. Esta función permite tomar los datos y realizar una segmentación de la señal en segmentos superpuestos (ventaneados) para luego calcular la transformada de Fourier de cada segmento, y estimar la PSD para luego promediarlas y obtener una PSD final. Luego se graficó la PSD en función de la frecuencia para visualizar cuáles fueron las frecuencias dominantes y si correspondían con las programadas en el generador de vibraciones (esto se detalla en la sección de pruebas de validación).

1) Descripción de las pruebas de validación de adquisición y procesamiento de datos

El propósito de poder medir diferentes frecuencias de movimiento es demostrar la viabilidad del dispositivo, lo que significa que, si el mismo es capaz de hacerlo, medirá los movimientos humanos en diferentes frecuencias. Se llevaron a cabo tres pruebas utilizando el generador de vibraciones (Ver Fig. 3) de la marca *3B Scientific*, modelo 100701, impedancia 8 Ohm. Estas pruebas consistieron en variar las frecuencias desde 0.5 Hz hasta 12 Hz y tomar datos utilizando el dispositivo propuesto. La Fig. 4 muestra cómo se encontraba conectado el generador de vibraciones, el generador de señales y el lugar donde se colocó el MPU-6050 para las pruebas de validación.



1. Tomas de entrada (tomas de seguridad)
2. Pasador de montaje con toma de 4 mm
3. Portafusibles (con fusible F 1.0 para 250 V)

Fig. 3 Generador de vibraciones utilizado para la captura de frecuencias específicas. Fuente: [20]

Para la correcta generación de las vibraciones, también se utilizó un generador de señales de la marca SIGLENT SDG 1032X. En este generador se configuraron las amplitudes y las frecuencias que se enviaron a un generador de vibraciones.

Durante las pruebas de validación, se consideraron las siguientes acciones:

- El prototipo se colocó en el generador de vibraciones sobre el pasador de montaje (ver Fig. 4) y se sujetó con cinta adhesiva, asegurando su posición central visualmente.
- El prototipo se conectó mediante un cable USB a la computadora desde donde se cargó el programa de adquisición de datos.
- Desde la computadora, que le suministraba energía al circuito, se habilitó el programa PLX-DAQ R2 el cual permitiría almacenar los datos leídos por el sensor en una hoja de Excel .xlsx en tiempo real.



Fig. 4 Disposición del MPU6050 sobre el generador de vibraciones.

- Se realizaron tres pruebas de validación. Es importante mencionar que las frecuencias programadas en el generador solo se verían reflejadas en el eje z, esto a que el generador de vibraciones movía el pasador de montaje hacia arriba y hacia abajo en una sola dirección (en este, caso el eje z).
- Las pruebas fueron las siguientes:

- Para la primera prueba de validación, se programó en el generador, frecuencias que iban de 1-12 Hz en paso de 1 Hz con un tiempo de variación entre frecuencias de 30 segundos, lo que permitió adquirir un total de 3674 lecturas que fueron procesadas en Matlab usando la función *pwelch*.
- Para la segunda prueba de validación, se programaron frecuencias que iban desde 0.5 a 12 Hz en paso de 0.5 Hz con un tiempo de variación entre frecuencias de 15 segundos, lo que permitió adquirir un total de 12015 lecturas que fueron procesadas usando *pwelch*.
- Para la tercera prueba de validación se programaron las siguientes frecuencias: 1-3, 3-5, 7-9, 5-3 y 3-1 Hz. En total se obtuvo unas 5412 lecturas que fueron procesadas usando *pwelch*.

- Todas las pruebas se realizaron con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, las cuales fue programada tanto en Arduino IDE como en Matlab. Para el Arduino se utilizó la Ecuación 1 que permite calcular el período de muestreo en milisegundos a partir de la frecuencia de muestreo en hertzios.

$$T_s(ms) = \frac{1}{F_s(Hz)} \times 1000 \quad (1)$$

donde T_s es el periodo de muestreo en milisegundos y F_s es la frecuencia de muestreo en Hertz.

A. Visualización de datos

La visualización de datos es una etapa crucial en el proceso de monitoreo de temblores mediante el prototipo ELENA. Se ha desarrollado una aplicación web (aún en fase de desarrollo) para facilitar el acceso a los datos recopilados. Esta aplicación proporcionará una interfaz sencilla y segura para que pacientes, familiares y médicos visualicen la evolución del temblor en el tiempo. Es importante destacar que la aplicación está diseñada para ser accesible desde cualquier ubicación del mundo.

Además de la aplicación web, se implementó la transferencia de datos a *ThingSpeak*, una plataforma *IoT* que permite el análisis en tiempo real de datos en la nube. Esta integración ofrece la ventaja de aprovechar la capacidad de escribir y ejecutar códigos de Matlab en *ThingSpeak*. La recepción de datos en esta plataforma se ha demostrado mediante el envío en tiempo real desde el prototipo de captura de datos.

Este enfoque de visualización de datos proporciona a los médicos una herramienta valiosa para la monitorización remota de múltiples pacientes, mejorando la toma de decisiones basada en información actualizada. La aplicación web, aún en desarrollo, pretende ser una solución integral para acceder y entender fácilmente la progresión de los temblores, contribuyendo así a una gestión más efectiva de la enfermedad de Parkinson.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Diseño 3D

El prototipo ELENA se ensambló con éxito, integrando todos los componentes según el diseño previo en *Fusion 360*. La fase de impresión 3D, realizada con *Prusaslicer* y una impresora *3D Prusa MK3S*, garantizó precisión y calidad, como se aprecia en la Fig. 5 y Fig. 6.

Un componente clave es la pantalla OLED, crucial para la interfaz del usuario. Su funcionamiento efectivo, destacado en la Fig. 7, contribuye significativamente a la experiencia de monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson. La pantalla proporciona información visual clara, mejorando la usabilidad y utilidad del dispositivo en su aplicación práctica. El ensamblaje exitoso y el rendimiento óptimo de la pantalla OLED refuerzan la viabilidad del prototipo ELENA como herramienta efectiva para el monitoreo continuo de temblores.

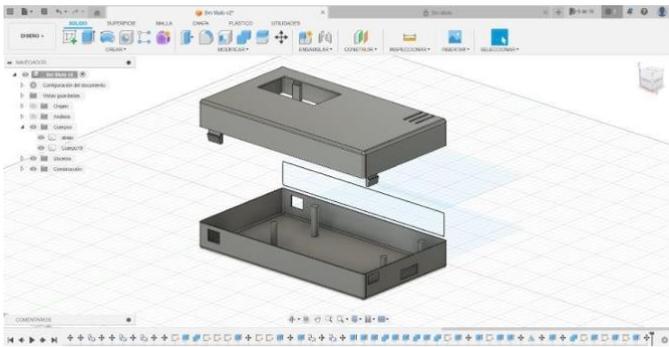


Fig. 5 Diseño 3D en Fusión 360.



Fig. 6 Prototipo Ensamblado

B. Pruebas de validación de adquisición y procesamiento de datos

Una vez realizadas las pruebas de validación utilizando el método de Welch para el análisis de las frecuencias, se pudo observar claramente las frecuencias dominantes. Estas frecuencias fueron previamente programadas en el generador de señales que se describió en secciones anteriores. En las siguientes figuras se pueden observar las gráficas obtenidas en cada una de las pruebas.



Fig. 7 Conectividad y funcionamiento de la pantalla oled

Tal como se observa en la Fig. 8 y la Fig. 9, se obtuvieron las frecuencias que fueron configuradas en el generador de señales para las pruebas de validación 1 y 2, respectivamente. Se puede notar que solo se observa un pico hasta la frecuencia de 10 Hz y esto se debe a la frecuencia de muestreo y al teorema de Nyquist, ya que para que se mostrara un pico en las frecuencias siguientes que fueron configuradas debería haberse muestreado mínimamente al doble.

Tal como se observa en la Fig. 10, se pudo obtener las frecuencias programadas y a diferencia de las dos primeras pruebas, al ser 9 Hz la frecuencia máxima, se pudo mostrar correctamente, ya que estaba dentro del criterio de Nyquist

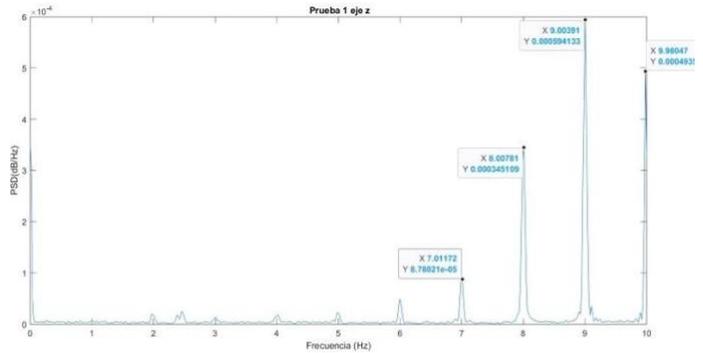


Fig. 8 Gráfica obtenida prueba de validación #1

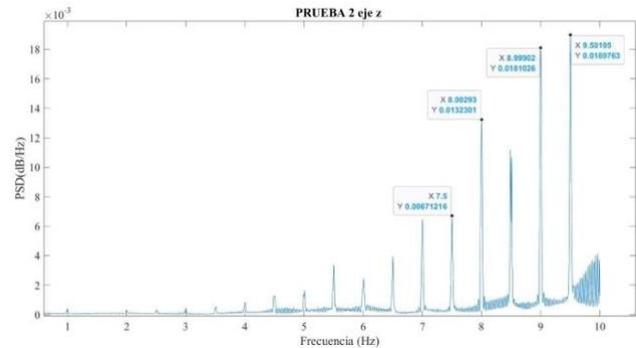


Fig. 9 Gráfica obtenida para la prueba de validación #2.

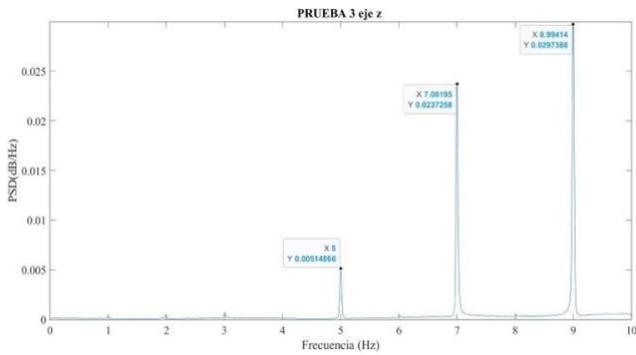


Fig. 10 Gráfica obtenida para la prueba de validación 3.

C. Plataforma de Visualización de Datos y Transferencia a ThingSpeak

Con el objetivo de facilitar el acceso y monitorización de datos recopilados, se ha desarrollado una aplicación web. Esta plataforma proporciona una interfaz accesible desde cualquier parte del mundo, destinada a pacientes, familiares y médicos. Es relevante destacar que los profesionales médicos cuentan con un acceso especializado, permitiéndoles monitorear datos de múltiples pacientes y tomar decisiones informadas basadas en información actualizada. La aplicación presenta una visualización gráfica de la evolución del temblor, abordando aspectos como frecuencia y amplitud a lo largo del tiempo. En la Fig. 11 se presentan avances significativos en el desarrollo de esta aplicación web. Es esencial mencionar que al escribir este artículo aún la aplicación se encontraba en desarrollo, por lo que solo se muestra la página del inicio y no se muestran los datos que llegan a ella y aún no está disponible para usuarios externos.

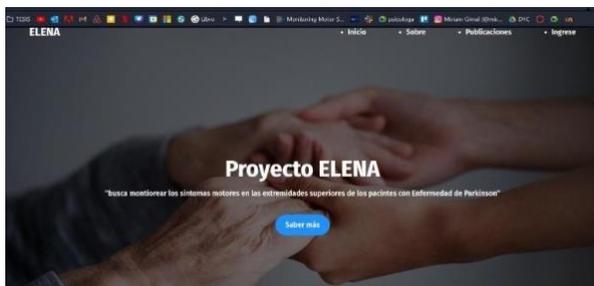


Fig. 11 Avances de la aplicación web para la visualización de datos.

Adicionalmente, se implementó la transferencia de datos a *ThingSpeak*, una plataforma de *IoT analytics*. Este servicio permite el análisis en tiempo real de datos en la nube, facilitando la recepción de datos enviados por diversos dispositivos. *ThingSpeak* ofrece la capacidad de escribir y ejecutar códigos de Matlab, proporcionando flexibilidad en el análisis de datos. La Fig. 12 muestra la recepción exitosa de datos del MPU-6050 en el canal de *ThingSpeak*.

Es relevante subrayar que los datos presentados en la Fig. 12 no corresponden a las pruebas de validación previamente descritas, sino que son datos enviados en tiempo real desde el prototipo de captura de datos. Este

paso confirma la efectividad del prototipo al transmitir datos a la plataforma de *ThingSpeak* mediante conexión WiFi, validando así la funcionalidad de la transferencia remota de información.

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de la programación implementada para la captura de datos y el análisis de las frecuencias a través del método de *pwelch*. La limitación observada en las frecuencias superiores a 10 Hz se atribuye al fenómeno de Nyquist, evidenciando la importancia de la elección adecuada de la frecuencia de muestreo para evitar el *aliasing*.

La técnica de calibración del sensor MPU6050, utilizando el método de seis posiciones, mostró ser efectiva, permitiendo obtener lecturas precisas y corregidas. Esta calibración resultó fundamental para la exactitud de las mediciones y la interpretación adecuada de las frecuencias capturadas durante las pruebas de validación.

La implementación de la tecnología *IoT* y la transferencia de datos a la plataforma *ThingSpeak* proporciona una solución práctica para el monitoreo remoto de los pacientes con enfermedad de Parkinson. La aplicación web en desarrollo amplía la accesibilidad a los datos, facilitando la visualización y análisis tanto para los pacientes como para los profesionales de la salud.



Fig. 12 Recepción de datos de aceleración en el canal de *ThingSpeak*.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo abordó la creciente necesidad de un sistema efectivo para el monitoreo de temblores en pacientes con la enfermedad de Parkinson (EP). La implementación del proyecto ELENA, basado en dispositivos de bajo costo y tecnología IoT, demostró ser una solución prometedora. La programación del prototipo, la calibración del sensor MPU6050 y las pruebas de validación utilizando el método de *pwelch* permitieron la identificación precisa de las frecuencias de temblores, validando la efectividad del sistema propuesto. La aplicación web en desarrollo y la integración con *ThingSpeak* abren nuevas posibilidades para el monitoreo remoto, proporcionando a los pacientes y profesionales de la salud acceso fácil y seguro a datos en tiempo real. La visualización de datos en gráficos facilita la comprensión de la progresión de los temblores, brindando información valiosa para la toma de decisiones en el tratamiento y la gestión de la enfermedad.

Además, es crucial destacar que el diseño preciso en 3D, implementado con el software *Fusion 360* y materializado mediante la impresora *3D Prusa MK3S*, junto con la incorporación de la pantalla OLED, ha desempeñado un papel fundamental en la calidad y experiencia general del proceso de validación inicial del prototipo ELENA. La atención meticulosa a los detalles en los componentes internos, la comodidad y las dimensiones del primer prototipo no solo garantiza la funcionalidad del dispositivo, sino que también contribuye significativamente a la estética y portabilidad que se espera tener con el producto final. La pantalla OLED, por su parte, mejora la interacción usuario-prototipo al proporcionar una interfaz clara y legible. Estas adiciones no solo fortalecen la viabilidad técnica del sistema, sino que también mejoran la utilidad práctica del proyecto, asegurando una experiencia integral y efectiva para los usuarios finales.

Como trabajo futuro se espera desarrollar y perfeccionar la interfaz de usuario de la aplicación web para garantizar una experiencia intuitiva y amigable para los usuarios finales, considerando las necesidades específicas de los pacientes con EP. Es también conveniente explorar la posibilidad de incluir la medición de otros parámetros, como la velocidad y la amplitud de los temblores, para obtener una evaluación más completa de la condición de los pacientes. Dado que el proyecto ELENA cuenta con colaboración con profesionales de la salud, se espera llevar a cabo estudios clínicos siguiendo con los protocolos de bioética y validar la efectividad del sistema en entornos del mundo real, garantizando su viabilidad y utilidad clínica. Micro

AGRADECIMIENTOS

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 también agradecen al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por brindar financiamiento parcial para

este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] B. Zhang, F. Huang, J. Liu y Z. Dingguo, "A novel posture for better differentiation between Parkinson's tremor and essential tremor," *Frontiers in neuroscience*, vol. 12, p. 317, 2018.
- [2] A. Carmona- Almazán, G. Dorantes-Méndez, J. F. Rodríguez-Arellano y A. R. Mejía-Rodríguez, "Triaxial accelerometry wireless system for characterization of Parkinsonian Tremor," de *43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, Mexico, 2021.
- [3] Movement Disorder Society Task Force on Rating Scales for Parkinson's Disease, "The unified Parkinson's disease rating scale (UPDRS): status and recommendations", *Movement Disorders*, vol. 18, n° 7, pp. 738-750, 2003.
- [4] L. Peña Batista, R. Nieto, C. Ureña, L. Vásquez, E. Collado y Y. Sáez, "Technology for monitoring tremor in the upper extremities of patients with Parkinson's disease: a systematic review and a proposal," de *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development"*, Buenos Aires, Argentina, 2023.
- [5] B. Boroojerdi y et. al, "Clinical feasibility of a wearable, conformable sensor patch to monitor motor symptoms in Parkinson's disease," *Parkinsonism & Related Disorders*, vol. 61, pp. 70-76, 2019.
- [6] G. Vivar, D.-L. Almanza-Ojeda, I. Cheng, J. C. Gómez, J. A. Andrade- Lucio y M.-A. Ibarra-Manzano, "Contrast and Homogeneity Feature Analysis for Classifying Tremor Levels in Parkinson's Disease Patients," *Sensors*, vol. 19, n° 9, p. 2072, 2019.
- [7] G. Rivera, V. Bonilla, M. Moya, G. Mosquera y L. A. Vitalyevich, "Dispositivo Mecatrónico para el análisis y mitigación de movimientos involuntarios en personas con enfermedad de Parkinson," *Enfoque UTE*, vol. 10, n° 1, pp. 153-172, 2019.
- [8] M. Heijmans, J. G. V. Habets, C. Herff, J. Aarts, A. Stevens, M. L. Kuijff y P. L. Kubben, "Monitoring Parkinson's disease symptoms during daily life: a feasibility study," *npj Parkinson's Disease*, vol. 5, n° 1, p. 21, 2019.
- [9] R. López-Blanco, M. A. Velasco, A. Méndez-Guerrero y e. al, "Smartwatch for the analysis of rest tremor in patients with Parkinson's disease," *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 401, pp. 37-42, 2019.
- [10] E. Samadi, H. Ahmadi y F. N. Rahatabad, "Analysis of Hand Tremor in Parkinson's Disease: Frequency Domain Approach," *Frontiers in Biomedical Technologies*, vol. 7, n° 2, pp. 105-111, 2020.
- [11] P. Locatelli, D. Alimonti, G. Traversi y V. Re, "Classification of Essential Tremor and Parkinson's Tremor Based on a Low-Power Wearable Device," *Electronics*, vol. 9, n° 10, 2020.
- [12] N. Mahadevan, C. Demanuele, H. Zhang, D. Volfson, B. Ho, M. K. Erb y S. Patel, "Development of digital biomarkers for resting tremor and bradykinesia using a wrist-worn wearable device," *npj Digit. Med.*, vol. 3, n° 5, 2020.
- [13] A. C. Alves de Araújo, E. G. Da Rocha Santos, K. Santos Guedes de Sá, V. K. Teixeira Furtado, F. A. Santos, R. Costa de Lima, L. V. Krejcová, B. Lopes Santos-Lobato y G. H. Lima Pinto, "Hand Resting Tremor Assessment of Healthy and Patients With Parkinson's Disease: An Exploratory Machine Learning Study and et al.," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, n° 778, 2020.
- [14] R. San-Segundo, A. Zhang, A. Cebulla, S. Panev, G. Tabor, K. Stebbins, R. E. Massa, A. Whitford, F. De la Torre y J. Hodgins, "Parkinson's Disease Tremor Detection in the Wild Using Wearable Accelerometers," *Sensors*, vol. 20, n° 20, 2020.
- [15] L. P. Perez, *Un método de calibración de sensores*, Almería: Universidad de Almería, 2015.
- [16] S. Khankalantary, S. Ranjbaran y S. Ebadollahi, "Simplification of calibration of low-cost MEMS accelerometer and its temperature compensation without accurate laboratory equipment," *Measurement Science and Technology*, vol. 32, n° 4, p. 045102, 2021.
- [17] E. Rojas, S. L. Schmidt, A. Chowdhury, M. Pajic y D. A. T. a. D. S. Won, "A comparison of an implanted accelerometer with a wearable accelerometer for closed-loop DBS," de *44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*

(EMBC), Glasgow, Scotland, United Kingdom, 2022.

- [18] B. Zhang, F. Huang, J. Liu y D. Zhang, "A Novel Posture for Better Differentiation Between Parkinson's Tremor and Essential Tremor," *Frontiers Neuroscience*, vol. 12, p. 317, 2018.
- [19] S. S. L. Meka, R. Borgohain y M. K. y. Rukmini, "Quantitative Evaluation of Parkinsonian Tremor and the Impact on it by DBS and Drugs," de *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, 2022.
- [20] 3B Scientific, "3B Scientific," [En línea]. Available: https://www.3bscientific.com/product-manual/1000701_EN.pdf. [Último acceso: 18 diciembre 2023].