

Technology for monitoring tremor in the upper extremities of patients with Parkinson's disease: a systematic review and a proposal

Lisette Peña Batista, Bachelor¹, Roberto Nieto, Bachelor¹, Cristian Ureña, Bachelor¹, Lucibell Vásquez, Bachelor¹, Edwin Collado, PhD^{1,2,*}, and Yessica Sáez, PhD^{1,2,*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá {lisette.penal, roberto.nieto, cristian.urena, lucibell.vasquez,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

Abstract – PD patients come to experience a wide spectrum of cognitive, psychiatric, non-motor, and motor symptoms. Tremor is one of the initial symptoms described by 70% of patients diagnosed with PD and quantifying it will allow the specialist to know the evolution of his patient and the possible treatment to implement. The objective of this research is to identify systems, devices or instruments and the methods used to monitor tremors that affect the upper extremities of patients with PD. In addition, this work proposes an initial prototype system that allows the capture of involuntary movements that occur in patients with PD. It was observed that the largest number of articles use their monitoring devices in controlled environments and despite the fact that there are many studies that are developing devices for monitoring tremors in the upper extremities, more efforts are still needed in this area. Many studies conclude that using IMU sensors has proven to be a good technique that allows monitoring of tremors. Other results obtained show that the proposed prototype works correctly, since when compared with a commercial application on a cell phone, very similar values are obtained, demonstrating its proper functioning.

Keywords—Portable device, Parkinson's disease, upper extremities, sensors, tremor.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Tecnología para el monitoreo del temblor en las extremidades superiores de pacientes con Enfermedad de Parkinson: una revisión sistemática y una propuesta

Lisette Peña Batista, Bachelor¹, Roberto Nieto, Bachelor¹, Cristian Ureña, Bachelor¹, Lucibell Vásquez, Bachelor¹, Edwin Collado, PhD^{1,2}, and Yessica Sáez, PhD^{1,2,*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá {lisette.pena1, roberto.nieto, cristian.urena, lucibell.vasquez,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

Resumen – Los pacientes con Enfermedad de Parkinson (EP) llegan a experimentar un amplio espectro de síntomas cognitivos, psiquiátrico, no motores y motores. El temblor es uno de los síntomas motores iniciales descrito por el 70% de los pacientes diagnosticados con la EP y cuantificarlo le permitirá a los especialistas conocer la evolución de sus pacientes y el posible tratamiento a implementar. El objetivo de esta investigación es identificar sistemas, dispositivos, instrumentos y los métodos utilizados para el monitoreo de los temblores que aquejan las extremidades superiores de los pacientes con EP. Además, este trabajo propone un sistema prototipo inicial que permita la captura de los movimientos involuntarios que afectan a los pacientes con EP. Se pudo observar que el mayor número de artículos utilizan sus dispositivos de monitoreo en entornos controlados y a pesar de que muchos son los estudios que se encuentran desarrollando dispositivos para el monitoreo de los temblores que aquejan las extremidades superiores, aún se necesitan más esfuerzos en esta área. Muchos estudios concluyen que utilizar sensores IMU ha demostrado ser una buena técnica que permite el monitoreo de estos temblores. Otros de los resultados obtenidos demuestran que el prototipo propuesto trabaja correctamente, ya que al compararlos con una aplicación comercial en teléfono móviles se obtienen valores muy parecidos, demostrando el buen funcionamiento de este.

Palabras claves— Dispositivo portátil, enfermedad de Parkinson, extremidades superiores, sensors, temblores.

I. INTRODUCCIÓN

La Enfermedad de Parkinson (EP) es considerada un trastorno que modifica el funcionamiento normal de las células nerviosas del cerebro, específicamente los ganglios basales y la sustancia negra [1]. Los pacientes con EP llegan a experimentar un amplio espectro de síntomas cognitivos, psiquiátrico, no motores y motores. De estos últimos, los síntomas cardinales y en los que se guían los médicos para sospechar que la persona sufre de la EP son: temblores, bradicinesia, rigidez, inestabilidad postural y congelación de la marcha (FOG por sus

siglas en inglés) [2], [3]. La EP es uno de los trastornos neurodegenerativos con mayor crecimiento de casos a nivel mundial. En el año 2005 estudios demostraron que la incidencia de la enfermedad en países con un gran número de habitantes rondaba los 4,1 y 4,6 millones de personas diagnosticadas. Esta enfermedad también ha ocupado el catorceavo lugar en las listas de las mayores enfermedades causante de muerte en los Estados Unidos y estudios más recientes estiman que alrededor de 7 a 10 millones de personas padecen de la EP en estos momentos, cifra que podría elevarse a medida que aumente la edad de las personas [2], [4], [5], [6].

El efecto que causa la enfermedad en la calidad de vida (CdV) de los pacientes y sus familiares es significativo [3]. En un inicio y durante las próximas etapas, la EP es difícil de diagnosticar y pese a las numerosas investigaciones que se han realizado aún no existe una prueba sólida que permita identificar de manera exacta la EP. La literatura habla de que alrededor del 20 al 30% de los casos diagnosticados con EP fueron exámenes engañosos, ya que muchos de los signos y síntomas de la enfermedad se encuentran presente en otras enfermedades como el Temblor Esencial (TE), lo que muestra que no se cuenta con un método estándar que permita la diferenciación correcta [4], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Detectar la enfermedad lo más pronto posible permitirá iniciar con el tratamiento adecuado y retardarla, ya que a medida que la EP avance los síntomas se complican [9].

Pese a grandes esfuerzos que realizan los científicos, no se cuenta con tratamiento que retrasen el avance de la EP [13]. Actualmente, el tratamiento clínico prescrito más utilizado son los fármacos (como la levodopa), sin embargo, con el paso de los años este tratamiento farmacológico no tiene la misma respuesta que en un inicio, provocando efectos adversos en los pacientes y en un 50% complicaciones motoras y no motoras. Además, el médico debe saber la dosis exacta del medicamento, de lo contrario su paciente puede experimentar discinesia como efecto secundario causado por el medicamento [1], [4], [14], [15]. Otra de las terapias que se están implementando son las cirugías de estimulación cerebral profunda (DBS, por sus siglas

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

en inglés), no obstante, esta conlleva una serie de riesgos significativos y podrían suponer un alto costo para los pacientes y sus familiares [1].

Por otro lado, los métodos utilizados para la evaluación, seguimiento y control de la enfermedad en la gran mayoría de los casos son subjetivos, pues se basan en entrevistas clínicas, exámenes físicos, historial de la enfermedad, observaciones sobre el estado físico del paciente durante el periodo de consulta médica (donde él paciente puede estar bajo la presencia de fármaco y verse mejor de lo que se encuentra en su vida cotidiana) y la utilización de escalas (UPDRS, Hoehn y Yahar, ADL, PDQ-39, PD NMS Questinnaire, etc.), donde esta última técnica dependerá de la experiencia del evaluador [3], [4], [5], [16]. Por ello, contar con herramientas clínicas tecnológicas que permitan obtener datos fiables del estado del paciente es crucial, ya que le brinda al médico información objetiva que se puede traducir en mejoras en el tratamiento y, por consiguiente, en mejoras en la CdV del paciente. Esto además aumenta las probabilidades de desarrollar terapias orientadas a la mitigación o retardo de los síntomas motores [3], [13], [17].

Es por lo antes expuesto que el objetivo de esta investigación es el de identificar sistemas, dispositivos, instrumentos y los métodos utilizados para el monitoreo de los temblores que aquejan las extremidades superiores de los pacientes con EP. Además, este trabajo busca proponer un sistema prototipo inicial que permita la captura de los movimientos involuntarios que afectan a los pacientes con EP. Para el cumplimiento del objetivo este artículo se encuentra dividido de la siguiente manera: en la Sección 2 se explican los temblores en EP, la Sección 3 presenta la metodología implementada para el desarrollo de este trabajo, en la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos y finalmente en la Sección 5 las discusiones y conclusiones.

II. EL TEMBLOR EN LA EP

El temblor en la EP es uno de los síntomas motores iniciales descrito por el 70% de los pacientes diagnosticados con la enfermedad. Este es uno de los síntomas de mayor molestia, característicos y notorios, y él paciente puede llegar a experimentarlo con mayor intensidad a medida que aumente su nivel de estrés y/o ansiedad [3], [4], [18]. Además, este es quizás uno de los síntomas más importantes que necesitan ser monitoreados, ya que cuantificarlo le permitirá a el especialista conocer la evolución de su paciente y el posible tratamiento a implementar [4], [19]. El temblor que experimenta el paciente con EP es considerado no lineal, de variación en el tiempo, estocástico y de naturaleza no estacionaria y regularmente se presenta en las manos [1], [2], [20]. Pese a la gran cantidad de estudios que se tiene sobre la evaluación y la gravedad del temblor en EP, este aún figura como uno de los mayores retos sintomatológicos de la enfermedad [3], [8].

III. TECNOLOGÍA PARA EL MONITOREO DEL TEMBLOR EN LAS EXTREMIDADES SUPERIORES

En esta sección se abordará todo lo relacionado con la revisión del arte realizada acerca de las tecnologías para el monitoreo del temblor en las extremidades superiores.

A. Metodología de la revisión del arte

Para la revisión se utilizó en gran medida las directrices PRISMA. Con el objetivo de tener un enfoque más amplio de las técnicas, instrumentos y análisis que se utilizan para el monitoreo del temblor en las extremidades superiores de los pacientes. Para iniciar se escogieron las tres bases de datos: PudMed, IEEE Xplore y Google Scholar, las cuales fueron seleccionados por ser repositorios populares, de alto alcance e impacto tanto en la investigación biomédica, como en aspectos técnicos. Una vez seleccionadas las fuentes de información se procedió con la escogencia de las palabras claves las cuales fueron: "Parkinson's disease", "tremor", "weareable devices" y "hand". También se le indico a cada motor de búsqueda avanzada que excluyeran las palabras "tremor suppression" y "march", cada uno de estos términos fueron introducidos usando operadores lógicos. Esto permitiría que los resultados arrojados estuvieran orientados con el cumplimiento del objetivo de este trabajo. Para esta revisión se escogieron estudios publicados en inglés entre enero 2019 hasta julio 2022, ya que en este idioma se publica la mayor cantidad de artículos científicos.

Luego se definieron ciertos criterios de elegibilidad con el fin de seleccionar las fuentes más relevantes alineadas con el objetivo:

- Los estudios seleccionados deben ser artículos de revistas y solo se considerará artículos de congresos si se encuentran completos, publicados entre enero 2019 hasta julio 2022.
- Solo serán considerados artículos que se encuentren open access y se excluirá aquellos que deban ser comprados.
- Se incluirán en el estudio artículos que busquen solo monitorear el temblor de las extremidades superiores y que además de monitorear lo anterior monitorean otros síntomas.
- Se excluirá del estudio artículos que se encuentren relacionados solamente con el monitoreo de la marcha, los estados ON/OFF, las alteraciones posturales y los temblores en las extremidades inferiores. Se permitirá incluir artículos si además de monitorear lo antes mencionado monitorean el temblor en las extremidades superiores.

Los artículos de cada base de datos fueron enviados de manera automática a software Zotero, que es un asistente de investigación personal que permite la recopilación, organización, anotación y citación de artículos científicos, libros, entre otros [21]. Al utilizar la herramienta Zotero se encontraron artículos duplicados en donde el programa con la intervención humana procedió a eliminarlos. Una vez culminada la acción anterior se analizaron los títulos y resumen

para descartar artículos no relacionados. Posteriormente se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión y finalmente se procedió a examinar los estudios restantes.

B. Resultados de la búsqueda

De las bases de datos consultadas se obtuvo un total de 1073 artículos (1030 estudios de Google Scholar, 22 estudios de PudMed y 21 de IEEE), los cuales fueron almacenados en la base de datos de Zotero. De los trabajos recopilados, se encontraron 100 artículos duplicados, que fueron eliminados con la ayuda de esta herramienta. Luego, un total de 823 artículos fueron excluidos con base en sus resúmenes y títulos. Finalmente, se obtuvieron 150 artículos que fueron sometidos a los criterios de inclusión y exclusión, dejando un total de 24 artículos seleccionados para esta revisión bibliográfica. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo siguiendo las directrices de PRISMA.

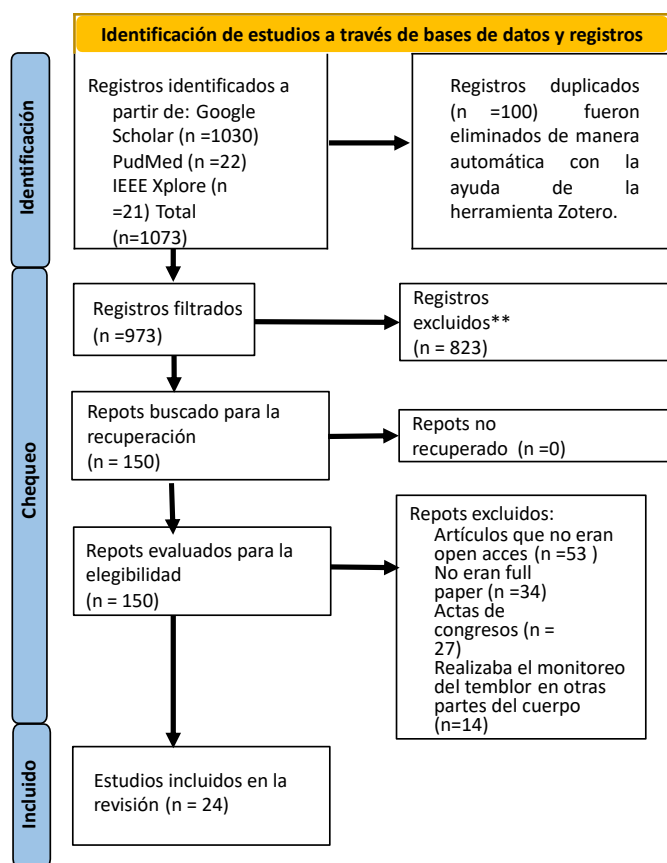


Fig. 1 Diagrama metodológico PRISMA utilizado en esta revisión.

También se realizó un análisis que permitiera conocer el porcentaje de estudios seleccionados por cada año. Como se observa en la Fig. 2, solamente el 13% de los artículos leídos correspondían al año 2022, un resultado que era de esperar, ya que solo se consideraron artículos hasta el mes de Julio.

Porcentaje de artículos seleccionados por año

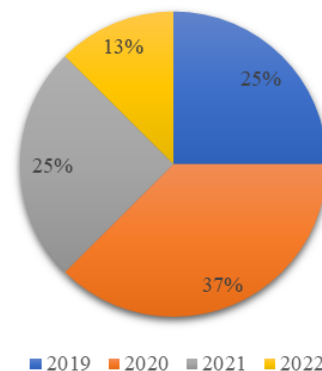


Fig. 2 Porcentaje de artículos seleccionados por cada año.

1) Entornos de control

En la actualidad se busca la manera más efectiva de monitorear los síntomas motores de los pacientes con EP. Diferentes estudios trabajan en la realización de dispositivos de monitoreo que permitan eliminar las apreciaciones subjetivas que supone la utilización de las escalas para la evaluación de los síntomas.

Investigaciones consideran que la mejor manera de monitorear los síntomas en los pacientes es hacerlo de manera continua y durante sus actividades cotidianas, pues el monitoreo clínico supone realidades contrarias cuando se compara con los entornos domiciliarios a los que se enfrenta cada día el paciente. Además, el monitoreo continuo en el hogar permitirá evaluar de mejor manera la progresión de la enfermedad y la efectividad del tratamiento del paciente [15], [16], [17], [10].

Pese a lo anterior, muchos estudios aún realizan sus pruebas en entornos controlados en laboratorios o en clínicas bajo la supervisión de un especialista, ya sea porque se utilizan sensores o equipos que no son portátiles, se necesita de la presencia de un técnico que sepa manejar el equipo o también un especialista que necesite explicar de manera detallada los ejercicios que necesita hacer el paciente para el correcto análisis [4]-[6], [9]-[10], [13], [18]-[20], [22]-[24].

También se cuentan con estudios que permitan la evaluación tanto en entornos controlados como en el ambiente natural, en donde se desenvuelve el paciente, lo cual suministra a los investigadores resultados de dos realidades distinta y permite comparar los resultados obtenidos [2] [25]. La Fig. 3 muestra en porcentaje la cantidad de artículos según el entorno donde se realizaron las pruebas.

Entorno donde se realizaron las pruebas

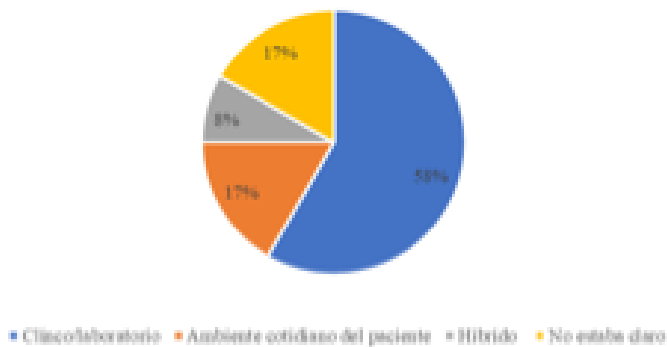


Fig. 3 Porcentaje de artículos seleccionados por cada año.

Como se observa en la Fig. 3, se encontró que la gran mayoría de los estudios fueron realizados en entornos de control.

2) Sensores inerciales

Estudios han llegado a considerar que la implementación de señales de electromiograma EMG con electrodos de superficie para el monitoreo de los temblores son el estándar oro, permitiendo obtener en conjunto con otras técnicas resultados muy positivos, sin embargo, el costo de su implementación es elevado, conlleva mucho tiempo y solo puede ser realizada por especialistas y técnicos capacitados [9], [24]. Por ello, se han llegado a proponer diversas metodologías y herramientas que logren diferenciar entre la amplitud y la frecuencia de los temblores provocados por la EP con el de otras enfermedades [12]. Las frecuencias características de los temblores que se presentan en la EP son extremadamente bajas, por lo que varios estudios consideran que la utilización de sensores inerciales cumple con la función de captar estas frecuencias. Sin embargo, aún existe dentro de la comunidad científica diferentes cuestionamientos sobre: la posición en la que se deben colocar en las extremidades superiores del paciente (si se desea monitorear esta parte) y el tipo de sensor a utilizar [3]. Los sensores IMU permiten estimar las actividades físicas como: la posición, la velocidad y la orientación. Además, son sensores de bajo costo, tamaño y consumo, lo que ha permitido que sean utilizados para detectar síntomas como el temblor, la bradicinesia, bloqueos de la marcha y discinesia en pacientes con EP [4], [16]. De los estudios consultados para esta revisión se puede observar que se utilizan diversos IMU [5], [12], [15], [17]-[19], [23]. Muchos estudios han utilizado dispositivos comerciales con el fin de evaluar su efectividad [2], [4], [9], [10], [13], [16], [20], [22], [25]-[29].

La implementación de sensores, en especial aquellos que permiten la creación de dispositivos portátiles, ha permitido en la medicina ofrecer a los pacientes una atención mucho más personalizada. Además, los sensores inerciales como acelerómetros permiten ofrecer información más fiable, ya que detectan variaciones mínimas que generalmente son pasadas

por alto en las observaciones realizadas por el personal de salud [23].

En esta revisión literaria se ha observado que para analizar las señales obtenidas por los sensores existen diversas metodologías. Las más utilizadas son aquellas relacionadas con técnicas de inteligencia artificial (IA) y otras como el dominio de la frecuencia y el tiempo como las implementadas en los estudios [3], [12], [15], [20], [23], [26]. En estos trabajos se utilizaron técnicas como el análisis espectral, las transformadas rápidas de Fourier, las transformadas de Hilbert, transformada de wavelets, el espectro de la potencia, la densidad espectral y diversos algoritmos de clasificación y predicción, entre otras para visualizar e identificar la frecuencia que se deseaba obtener.

3) Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) y sus tantas ramas cada vez se están utilizando más en la medicina y en la EP no es la excepción. Al realizar esta revisión se pudo encontrar que gran parte de los artículos se encuentran trabajando con algún tipo de AI, ya sea redes neuronales, aprendizaje profundo supervisado y no supervisado, clasificadores, aprendizaje automático, entre otras técnicas. Y es que estudios han demostrado que utilizar sistemas embebidos, sensores IMU, combinados con alguna técnica de inteligencia artificial, permiten obtener, procesar, clasificar y predecir datos que el ojo humano no podría realizar en tiempo real [18].

3.1) Redes neuronales artificiales

Artículos como el [18], utilizaron Redes Neuronales Artificiales (RNA) Multicapa con el fin de buscar y clasificar patrones similares de las señales electromiográficas obtenida de los pacientes. En este estudio se utilizaron RNA tipo Back Propagation, ya que permite una mejor optimización y capacidad para retroalimentarse. Durante el entrenamiento, no se llegó a superar el 5% del error medio cuadrado, llegando a concluir que este tipo de RNA es la más conveniente para utilizar en estudios que trabajen con señales electromiográficas, permitiendo la identificación y clasificación de patrones de la señal.

3.2) Aprendizaje automático

La clasificación estadística y su combinación con el aprendizaje automático son técnicas que cada vez son más utilizadas para el diseño de sistemas inteligentes, ya que permiten el uso de datos de entrada. En el estudio [4], donde buscaban clasificar las señales del temblor, implementaron en conjunto con sensores no portátiles la utilización de clasificadores de aprendizaje automático supervisado en donde obtuvieron los rendimientos más altos en los clasificadores: árbol embolsado (BgT) y vecinos más cercanos-fino (F-KNN, por sus siglas en inglés). Este método logró clasificar las mediciones del temblor en tres niveles con una precisión superior al 98%. Los autores en [10] utilizaron algoritmos de aprendizaje automático (KNN, support Vector Machines

(SVM), Naive Bayes (NB), árbol de decisión (DT)), donde también se demostró obtener el 90% de precisión para clasificar el temblor Parkinson y el temblor esencial. Por su parte, el estudio en [7] utilizó siete clasificadores de aprendizaje automático (KNN), regresión logística (LR), clasificador de vectores de soporte (SVC), análisis discriminante lineal (LDA), bosque aleatorio (RF), DT y Gaussian Naive Bayes (GNB). El objetivo en este trabajo era comprobar cuál de los algoritmos era el más preciso para clasificar los temblores, siendo el KNN el que mejor resultados presentó y SVC el que peor. En el estudio [9] también se utilizaron siete modelos predictivos eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), clasificación de crestas (Ridge), red neuronal de retropropagación (BP), red neuronal convolucional (CNN), RF, SVM y LR. Este estudio fue realizado en 398 pacientes para identificar cuál era el mejor algoritmo que permitiera diferenciar entre la EP y TE, demostrando que RF y XGBoost tenían una mejor capacidad predictiva general con una precisión mayor al 0.84. En [6] se presenta un trabajo que buscaba clasificar el tipo de temblor (EP, TE y temblores fisiológicos) según la posición y la frecuencia del temblor utilizando el clasificador RF. Este sistema mostró tener una mejor precisión en comparación con los resultados obtenidos por un neurólogo. Otros estudios que también implementaron algún tipo de clasificador, modelos heurísticos, aprendizaje profundo o aprendizaje automático fueron [3], [17], [23]. Siendo los clasificadores KNN y DT los más implementados en varios artículos.

E. Dispositivos comprados

Muchos estudios que buscan monitorear los temblores ponen a prueba dispositivos que ya se encuentren disponibles en el mercado, de los cuales muchos incorporan algún tipo de sensor inercial como acelerómetro, giroscopio o ambos. Ejemplo de lo anterior son los relojes inteligentes que incorporan sensores inerciales y algunos permiten la extracción de los datos brutos leídos para su posterior procesamiento. En el estudio [22] se utilizó el reloj inteligente SW3 de la marca Sony©, demostrando que la implementación de los relojes para el monitoreo del temblor si es posible, confiable, bien correlacionado con los puntajes clínicos y ampliamente aceptado por los pacientes. Otro estudio que también utilizó reloj inteligente y obtuvo buenos resultados fue el presentado en [28].

Al igual que los relojes inteligentes que traen incorporado acelerómetros y giroscopios, los teléfonos inteligentes también incluyen este tipo de sensores, por lo que han sido puestos a pruebas al momento de querer monitorear los temblores en las manos de los pacientes con EP. El estudio en [20] utilizó un smartphone para capturar las señales y posteriormente analizarlas. Este estudio demostró una alta precisión del temblor del paciente en correlación con las anotaciones realizadas por el neurólogo utilizando la escala. Otro ejemplo es el estudio en [16], donde utilizaron el dispositivo portátil MOX5 que permite trabajar con los datos sin procesar y brinda los datos en formato European Data Formant (EDF) [26],

permitiendo demostrar la fiabilidad de los estados de apagado de manera objetiva.

La utilización de biosensores que permitan el monitoreo de los temblores también son alguna de las ayudas que ya se encuentran en el mercado. Los estudios [2], [25], [27] utilizaron parches NIMBLE (MC10, Inc., Lexington, MA, EE.UU.) ubicados en diversas áreas del cuerpo en conjunto con algoritmos y escalas que permitieran estimar la gravedad de los síntomas de los pacientes con EP, arrojando resultados positivos que demuestran la correlación entre las puntuaciones de síntomas motores predichos por el sensor del parche y las evaluaciones clínicas.

Otros dispositivos utilizados y que también arrojaron resultados positivos fueron teclados [26] y controladores de movimiento de salto (Leap Motion Controller) [4], [29], sin embargo, muchos de los antes mencionados no pueden ser utilizados en áreas comunes en donde se desenvuelve el paciente.

IV. PROPUESTA DE UN PROTOTIPO DE DISPOSITIVO PARA MONITOREO DEL TEMBLOR EN LAS EXTREMIDADES SUPERIORES

Esta sección abordará todo lo relacionado a la construcción preliminar de un prototipo de bajo costo que permita captar las señales de los temblores provocados por la EP en las extremidades superiores, así como los resultados obtenidos.

A. Diseño y metodología

Partiendo de la necesidad de monitorear los temblores de los pacientes y que fueran de manera continua, se desarrolló un diseño básico inicial que fuera capaz de detectar los movimientos en tres ejes x, y, z. A este punto es importante mencionar que esta investigación forma parte un estudio macro que busca el monitoreo continuo de los temblores utilizando tecnología IoT, permitiendo al médico acceder a los datos de su paciente desde cualquier parte del mundo.

Para lograr con el objetivo se realizó un diseño conceptual de prototipo inicial a construir, posteriormente se seleccionaron los componentes electrónicos que fueran de bajos costos a utilizar, para finalmente construir el prototipo físico.

B. Modelo conceptual

Para el diseño del sistema se utilizó un sensor que permitiera captar los movimientos, un microprocesador que extraería la información leída por el sensor y permitiera el envío de los datos a una plataforma/dispositivo de visualización, como se muestra en la Fig. 4.

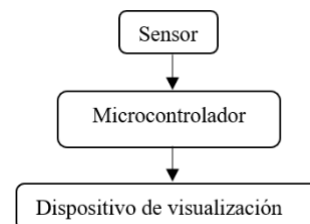


Fig. 4 Modelo conceptual del dispositivo.

El diseño de este dispositivo consiste en la programación de un microcontrolador Arduino, donde se agregaron las librerías para comunicar el microcontrolador con el sensor MPU6050. Luego, se agregaron instrucciones dentro de una función para traducir la información enviada del sensor y obtener el valor en los tres ejes (x, y, z). Estas serán las variaciones de posición respecto al origen, las cuales luego fueron analizadas en Excel. Además, en el monitor serie inicializamos la calibración del MPU6050 para tomar como referencia inicial un punto fijo. En la Fig. 5, se muestra el funcionamiento del dispositivo de monitoreo de temblores propuesto.

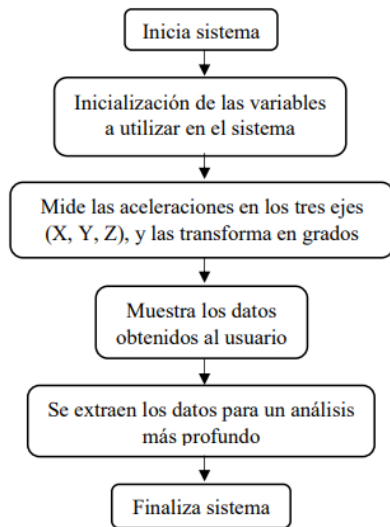


Fig. 5 Diagrama de flujo de programación.

Con la ayuda del software *Fritzing* se diseñó el prototipo utilizando un microcontrolador Arduino, el cual recibió las lecturas del acelerómetro. La información recibida fue dada en función de posición vs tiempo, para luego ser procesada y analizada por herramientas del software Excel. En la Fig. 6 muestra el diagrama en *Fritzing*.

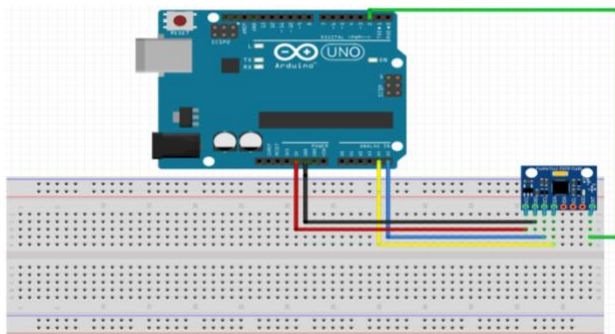


Fig. 6 Simulación de la conexión del microprocesador con el sensor del prototipo.

C. Materiales y prototipo final

Para desarrollar este proyecto de manera tangible se necesitaron ciertos elementos indispensables, los cuales lo detallamos en la Tabla I.

TABLA I
MATERIALES Y COSTOS UTILIZADOS EN EL PROTOTIPO

Material	Costo aproximado
Microcontrolador Arduino	B/. 17.00
Acelerómetro MPU6050	B/. 8.00
Guante deportivo	B/. 15.00
Otros materiales	B/. 15.00
Total	B/. 55.00

Para el desarrollo del prototipo se utilizó un sensor IMU, el cual permite registrar datos con una gran exactitud porque contiene una conversión hardware de 16 bits de A/D por cada canal para la digitalización de las salidas del acelerómetro que capta los canales x, y, z al mismo tiempo. El sensor utiliza el I2C-bus para comunicarse con el Arduino. Una gran ventaja del dispositivo propuesto es que es muy práctico para el paciente y de muy bajo costo para su elaboración. La Fig. 7 muestra el prototipo físico que portaría un paciente.

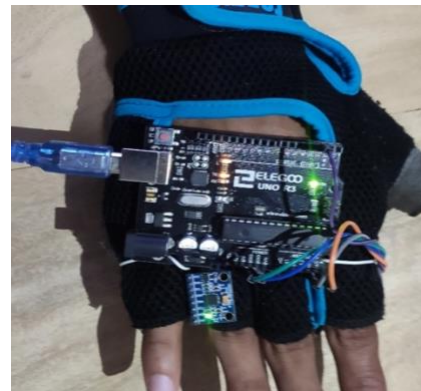


Fig. 7 Prototipo del dispositivo de medición de temblores en extremidades superiores.

D. Resultados

Las pruebas preliminares fueron realizadas en los miembros del equipo. Se realizaron cuatro simulaciones, colocando en la mano derecha el guante con el dispositivo armado y realizando movimientos que simulaba el temblor de las personas con Parkinson para luego proceder a registrarlos. El microcontrolador Arduino nos dio la información en los tres ejes (x, y, z), como se muestra en la Tabla II, en forma de posición vs. tiempo. Esta información fue enviada al Microsoft Excel para visualizar la información mediante gráficas, las cuales facilitan el análisis. Luego estas posiciones se introdujeron en las ecuaciones 1 y 2.

$$\vec{v} = \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{t - t_0} \quad (1)$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} \quad (2)$$

Tabla II. Resultados en los tres ejes

Eje Y	Eje Z	Eje X
0,0769	0,0063	0,9652
0,1706	-0,3301	0,9577
-0,2853	-0,2149	0,7769
-0,9380	0,1994	0,4251
0,0000	0,3976	-0,1097
0,0000	0,3640	0,0246
-0,4407	0,0355	0,1258
0,2575	0,2997	0,4763
0,6988	0,7343	0,0046
0,0000	0,0122	0,0034
0,0000	-0,7900	0,0066
0,0000	0,0001	0,0006
-0,4250	0,0001	0,0025
0,7937	0,0001	0,0046
0,0000	0,0002	0,0082

La Fig. 8 muestra los resultados obtenidos, donde las tres en la parte superior (verde, rojo y celeste) son las gráficas de la aceleración vs. tiempo en los tres ejes (x, y, z) y la inferior (azul) es la sumatoria de los tres ejes en aceleración vs. tiempo.

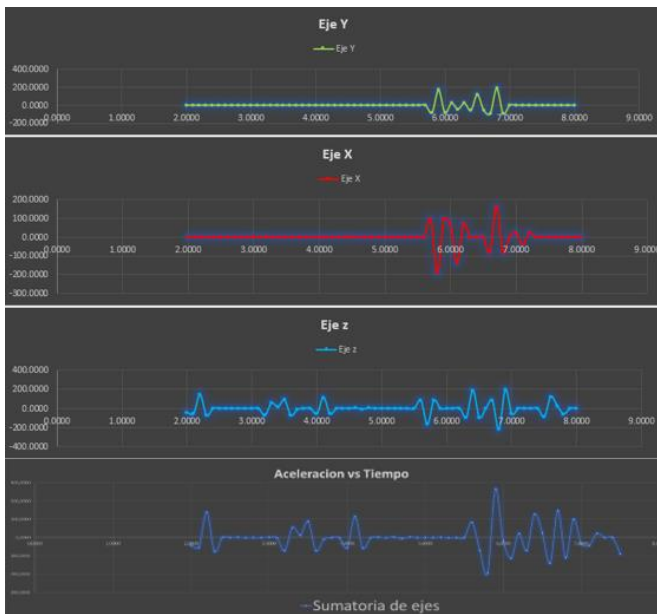


Fig 8. Análisis de datos para obtener las gráficas de Aceleración vs Tiempo.

El análisis obtenido fue comparado con los datos de la aplicación móvil *Vibration Analysis*, la cual usa el acelerómetro del celular para calcular la frecuencia del movimiento de la

persona, tal como se aprecia en los resultados de la simulación en la Fig. 9.



Fig 9. Resultados con la aplicación móvil (VIBRATION ANÁLISIS)

Al comparar el prototipo realizado con los datos arrojados por la aplicación, se logró demostrar una gran similitud en las gráficas analizadas. El prototipo permite un amplio análisis ya que brinda información en tres ejes, facilitando el cálculo y el análisis necesario al médico o persona interesada que desee estudiar los temblores provocados por la EP.

V. CONCLUSIONES

Con el pasar de los años se ha hecho necesario buscar nuevas metodologías que ayuden al personal médico en el diagnóstico, seguimiento y control de la EP. Si bien es cierto, la utilización de escalas ayuda al médico, esta técnica sigue siendo subjetiva porque depende de cada entrevistador, por lo que el desarrollo e implementación de dispositivos de monitoreo remoto que se utilicen en el entorno clínico o en entornos cotidianos para el paciente ayudara a brindar información objetiva al médico.

Durante la realización de este trabajo se pudo observar que el mayor número de artículos utilizan sus dispositivos de monitoreo en entornos controlados bajo la supervisión de un personal del equipo de investigación o un personal experto en la EP, por lo que se hace necesario también buscar monitorear a los pacientes en entornos cotidianos para que el médico pueda obtener una mayor información del avance de la EP y la eficiencia del tratamiento.

La utilización de sensores IMU ha demostrado ser una buena técnica que permite el monitoreo de los temblores en los pacientes con EP, ya que son económicos, pequeños, de bajo consumo que los hace idóneos para desarrollar sistemas portátiles que puedan ser utilizados en entornos controlados y no controlados.

La implementación de sensores inerciales en conjunto con diversas técnicas de inteligencia artificial permite no solo la adquisición de las frecuencias y de la amplitud, sino también que pueden clasificar el tipo de temblor que la persona

experimenta, suministrando datos fiables que pueden ser traducidos a la obtención de un mejor diagnóstico y así evitar diagnósticos erróneos que son habituales al inicio de la EP.

A pesar de que muchos son los estudios que se encuentran desarrollando dispositivos para el monitoreo de los temblores en las extremidades superiores, aún se necesitan más esfuerzos en esta área. Sin lugar a duda la implementación de dispositivos comerciales que cuenten con sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) como celulares y relojes contribuyen al seguimiento de los síntomas motores de la EP, pero con la creciente tasa de personas padeciendo la enfermedad se hace necesario la creación de dispositivos destinados al monitoreo de los temblores. Además, gran parte de estos dispositivos tienen un precio elevado, lo cual los hace poco atractivos e inaccesibles para muchos pacientes.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que el prototipo propuesto trabaja correctamente, ya que al compararlos con una aplicación comercial en teléfono celular se obtienen valores muy parecidos, demostrando el buen funcionamiento de este.

En trabajos futuros se puede incluir una clasificación de la intensidad de los temblores mediante técnicas de procesamiento de señales, las cuales pueden ser luego comparadas con tablas utilizadas en diagnóstico de EP para definir el grado de avance de la enfermedad. Además, para mejorar el producto final se puede agregar una unidad microSD de almacenamiento local y desarrollar una carcasa para darle un diseño más cómodo y proteger los circuitos.

REFERENCIAS

- [1] A. Ibrahim, y. Zhou, M. E. Jenkins, a. I. trejos y M. D. Naish, "Real-Time Voluntary Motion Prediction and Parkinson's Tremor Reduction Using Deep Neural Networks" in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 29, pp. 1413-1423, 2021.
- [2] K. D. C. W. S. M. X. C. G. T. S. S. E. R. D. & G. S. Jamie L. Adams, "A real-world study of wearable sensors in Parkinson's disease," *Nature partner journals| parkinson's disease*, vol. 7, n° 106, 2021.
- [3] R.-C. I. D. P. a. N. P. Asma Channa, "A-WEAR Bracelet for Detection of Hand Tremor and Bradykinesia in Parkinson's Patients" *Sensors*, vol. 21, n° 3, 2021.
- [4] D.-L. A.-O. I. C. J. C. G. J. A. A.-L. a. M.-A. I.-M. Guillermina Vivar, "Contrast and Homogeneity Feature Analysis for Classifying Tremor Levels in Parkinson's Disease Patients" *Sensors*, vol. 19, n° 9, 2019.
- [5] T. P. J. R. Gregory NealMcKay, "A low-cost quantitative continuous measurement of movements in the extremities of people with Parkinson's disease," *MethodsX*, vol. 6, pp. 169-189, 2019.
- [6] K. S. a. S. R. W. A. Brindha, "TREMOR CLASSIFICATION USING WEARABLE IOT BASED SENSORS," de *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Chennai, India, 2022.
- [7] E. G. d. R. S. K. S. G. d. S. V. K. T. F. F. A. S. R. C. d. L. L. V. K. B. L. S.-L. G. H. L. P. Ana Camila Alves de Araújo, "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, 2020.
- [8] N. P. a. V. C. Asma Channa, "Wearable Solutions for Patients with Parkinson's Disease and Neurocognitive Disorder: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 20, n° 9, 2020.
- [9] N. L. S. L. L. Z. C. S. a. J. L. Xupo Xing, "Identification and Classification of Parkinsonian and Essential Tremors for Diagnosis Using Machine Learning Algorithms," *frontiers in Neuroscience*, vol. 16, 2022.
- [10] D. A. ., G. T. a. V. R. Patrick Locatelli, "Classification of Essential Tremor and Parkinson's Tremor Based on a Low-Power Wearable Device," *Electronics*, vol. 9, n° 10, 2020.
- [11] P. A. D. M. W. Nico Surantha, "A Review of Wearable Internet-of-Things Device for Healthcare," de *5th International Conference on Computer Science and Computational Intelligence 2020*, 2020.
- [12] A. S. López, "Comparación de dispositivos para la adquisición de señales de acelerometría en Extremidades superiores para la caracterización del temblor parkinsoniano.," *Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, vol. 8, n° 1, 2021.
- [13] C. D. H. Z. D. V. B. H. M. K. E. a. S. P. Nikhil Mahadevan, "Development of digital biomarkers for resting tremor and bradykinesia using a wrist-worn wearable device," *npj Digit. Med.*, vol. 3, n° 5, 2020.
- [14] D. R. K. B. K. H. K. C. T. a. e. a. M. Kelley Erb 1, "mHealth and wearable technology should replace motor diaries to track motor fluctuations in Parkinson's disease," *npj Digital Medicine*, vol. 3, n° 6, 2020.
- [15] A. Z. ., A. C. ., S. P. ., G. T. ., K. S. R. E. M. A. W. F. d. I. T. a. J. H. Rubén San-Segundo, "Parkinson's Disease Tremor Detection in the Wild Using Wearable Accelerometers," *Sensors*, vol. 20, n° 20, 2020.
- [16] J. G. V. H. C. H. J. A. A. S. M. L. K. & P. L. K. Margot Heijmans, "Monitoring Parkinson's disease symptoms during daily life: a feasibility study," *npj Parkinson's Disease*, vol. 5, n° 21, 2019.
- [17] J. J.-S. M. A. B. a. B. G. Murta D. Hssayeni, "Ensemble deep model for continuous estimation of Unified Parkinson's Disease Rating Scale III," *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 20, n° 32, 2021.
- [18] V. B. M. M. G. M. L. A. V. Gabriel Rivera, "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.
- [19] T. Z.-Z. a. e. al, "Quantification of tremor severity with a mobile tremor pen," *Heliyon*, vol. 6, n° 8, 2020.
- [20] H. A. F. N. R. Elham Samadi, "Analysis of Hand Tremor in Parkinson's Disease: Frequency Domain Approach," *Frontiers in Biomedical Technologies*, vol. 7, n° 2, pp. 105-111, 2020.
- [21] Zotero, "Zotero," [En línea]. Available: <https://www.zotero.org/>. [Último acceso: 5 Octubre 2022].
- [22] M. A. A.-G. a. e. a. RobertoLópez-Blanco, "Smartwatch for the analysis of rest tremor in patients with Parkinson's disease," *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 401, pp. 37-42, 2019.
- [23] A. W. C. A. F. H. J. G. a. K. P. K. Rene Peter Bremm, "TreCap: A wearable device to measure and assess tremor data of visually guided hand movements in real time" *arXiv*, 2021.
- [24] R. N. A. A. a. e. a. Basilio Vescio, "Development and Validation of a New Wearable Mobile Device for the Automated Detection of Resting Tremor in Parkinson's Disease and Essential Tremor," *Diagnostics*, vol. 11, n° 200, 2021.
- [25] B. B. a. e. 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.
- [26] D. V. D. Atemangoh Bruno Peachap, "Detection of early Parkinson's disease with wavelet features using finger typing movements on a keyboard," *SN Applied Sciences*, vol. 2, 2020.
- [27] N. S. a. e. al., "Role of data measurement characteristics in the accurate detection of Parkinson's disease symptoms using wearable sensors," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 12, 2020.
- [28] F. M. P. a. e. al., "High-Resolution Motor State Detection in Parkinson's Disease Using Convolutional Neural Networks," *Scientific Reports*, vol. 10, 2020.

- [29] G. S. S. G. ., B. Ö. ., M. R. M. T. J. A. a. Y. O. Ç. Prashanna Khwaounjoo, "Non-Contact Hand Movement Analysis for Optimal Configuration of Smart Sensors to Capture Parkinson's Disease Hand Tremor," *Sensors*, vol. 22, n° 4613, 2022.
- [30] Maastricht Instruments , "Accelerometry.eu," [En línea]. Available: <https://www.accelerometry.eu/products/wearable-sensors/activity-monitor-comparison/mox5/>. [Último acceso: 7 Noviembre 2022].
- [31] Y. X. X. L. Y. F. W. Z. Y. T. K. R. W. C. ., a. X. C. Ruirui Lu, "Evaluation of Wearable Sensor Devices in Parkinson's Disease: A Review of Current Status and Future Prospects," *Hindawi*, vol. 2020, 2020.
- [32] A. Almogren, "An automated and intelligent Parkinson disease monitoring system using wearable computing and cloud technology," *Cluster Comput* , vol. 22, n° 1, pp. 2309-2316, 2019.