



Explorando los avances y desafíos en la monitorización continua de los temblores para la enfermedad de Parkinson: una revisión sistemática

Exploring the advances and challenges in continuous tremor monitoring for Parkinson's disease: a systematic review

Lisette Peña,^{1,2}, Edwin Collado^{1,2,3}, Yessica Sáez^{1,2,3,*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

²Centro Regional de Azuero, Grupo de Investigación en Ingeniería de Telecomunicaciones y Sistemas Inteligentes aplicados a la sociedad (ITSIAS), Los Santos, Panamá

³Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP), Panamá

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

RESUMEN. La Enfermedad de Parkinson (EP), un trastorno neurodegenerativo prevalente, impacta significativamente la calidad de vida de los afectados. Este estudio presenta una revisión exhaustiva de los sistemas de monitoreo de la EP, resaltando la necesidad de soluciones más efectivas y accesibles. El objetivo principal es proporcionar una base sólida para desarrollar mejoras en el monitoreo de la EP y así mejorar la calidad de vida de los pacientes. La revisión, realizada de manera sistemática, exploró bases de datos científicas con criterios específicos, centrando la atención en entornos de control, sensores inerciales e inteligencia artificial. Los resultados destacan la importancia de considerar entornos clínicos y cotidianos para un monitoreo completo, así como el papel crucial de los sensores inerciales y la inteligencia artificial en mejorar la precisión y capacidad predictiva de los sistemas. Se identificaron diversas fortalezas y debilidades en los sistemas de monitoreo existentes, lo que subraya la necesidad de soluciones más efectivas. La comprensión de las tendencias actuales y las brechas en la investigación informa directamente los objetivos y enfoques metodológicos del estudio, contribuyendo así a avanzar hacia soluciones más eficientes en el monitoreo de la EP y a mejorar la calidad de vida de quienes la padecen.

Palabras clave. Asistencia tecnológica, Enfermedad de Parkinson, Internet de las Cosas, Monitorización de temblores, Soluciones de bajo costo, Tecnologías de sensores.

ABSTRACT. Parkinson's Disease (PD), a prevalent neurodegenerative disorder, significantly impacts the quality of life of those affected. This study presents a comprehensive review of PD monitoring systems, highlighting the need for more effective and accessible solutions. The main objective is to provide a solid foundation for developing improvements in PD monitoring and thus enhancing the quality of life for patients. The review, conducted systematically, explored scientific databases with specific criteria, focusing on control environments, inertial sensors, and artificial intelligence. The results emphasize the importance of considering clinical and everyday environments for comprehensive monitoring, as well as the crucial role of inertial sensors and artificial intelligence in improving the accuracy and predictive capacity of systems. Various strengths and weaknesses were identified in existing monitoring systems, underscoring the need for more effective solutions. Understanding current trends and gaps in research directly informs the objectives and methodological approaches of the study, thus contributing to advancing more efficient solutions in PD monitoring and improving the quality of life for those affected.

Keywords. Technological assistance, Parkinson's disease, Internet of Things, Tremor monitoring, Low-cost solutions, Sensor technologies.

Citación: L. Peña, E. Collado y Y. Sáez, "Explorando los avances y desafíos en la monitorización continua de los temblores para la enfermedad de Parkinson: una revisión sistemática", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 2, pp. (0), 2024.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 19 de febrero de 2024. **Recibido con correcciones:** 19 de julio de 2024. **Aceptado:** 19 de julio de 2024.

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4065>

Copyright: 2024 L. Peña, E. Collado y Y. Sáez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

La Enfermedad de Parkinson (EP) se define como un trastorno neurodegenerativo que afecta específicamente los ganglios basales y la sustancia negra, alterando el funcionamiento normal de las células nerviosas del cerebro [1]. Los síntomas cardinales de la EP, como temblores, bradicinesia, rigidez, inestabilidad postural y congelación de la marcha (FOG), son indicativos clave para el diagnóstico [2], [3].

La incidencia global de la EP ha experimentado un aumento significativo, estimándose que, para el año 2030, entre 7 y 10 millones de personas padecerán la enfermedad, con una proyección de aumento asociado al envejecimiento de la población [2], [4 - 6]. Este incremento contribuye a que la EP ocupe el decimocuarto lugar entre las principales causas de muerte en los Estados Unidos [6].

El impacto en la calidad de vida (CdV) de los pacientes y sus familias es considerable, exacerbado por la dificultad inicial para diagnosticar la EP, la cual comparte síntomas con otras condiciones, como el Temblor Esencial (TE) [4], [6 - 12]. La detección temprana es fundamental, ya que permite iniciar el tratamiento adecuado y ralentizar la progresión de la enfermedad [9].

A pesar de los esfuerzos científicos, aún no se dispone de tratamientos que detengan la progresión de la EP [13]. Los fármacos, como la levodopa, son la opción clínica más común, pero con el tiempo pierden eficacia y pueden causar efectos adversos con complicaciones motoras y no motoras [1], [4], [14], [15]. La estimulación cerebral profunda (DBS) se ha propuesto como terapia, pero conlleva riesgos significativos y costos elevados [1].

Los métodos actuales de evaluación dependen en gran medida de enfoques subjetivos, como entrevistas clínicas, exámenes físicos y escalas, que pueden no reflejar con precisión la condición del paciente [3 - 5], [16]. La necesidad de herramientas clínicas tecnológicas objetivas se destaca, ya que proporcionarían datos fiables para mejorar el tratamiento y la CdV del paciente, además de facilitar el desarrollo de terapias dirigidas a mitigar o retrasar los síntomas motores [3], [13], [17].

El temblor, experimentado por el 70% de los pacientes diagnosticados con la Enfermedad de

Parkinson (EP), constituye uno de los síntomas iniciales más molestos, característicos y notorios. Su intensidad puede aumentar en situaciones de estrés o ansiedad [3], [4], [18]. Dada su relevancia, el monitoreo preciso de este síntoma es crucial, ya que la cuantificación proporciona al especialista información valiosa sobre la evolución del paciente y sugiere posibles enfoques de tratamiento [4], [19].

El temblor asociado a la EP se describe como no lineal, con variaciones en el tiempo, de naturaleza estocástica y no estacionaria, y se manifiesta comúnmente en las manos [1], [2], [20]. A pesar de los numerosos estudios sobre la evaluación y gravedad del temblor, sigue siendo uno de los desafíos más significativos en el ámbito sintomatológico de la EP [3], [8].

Esta revisión tiene como objetivo proporcionar una visión integral de los sistemas y dispositivos utilizados para monitorear los temblores en las extremidades superiores de pacientes con EP. El artículo se estructura en secciones que abordan los temblores, la metodología utilizada, los resultados obtenidos y las discusiones y conclusiones.

2. Materiales y Métodos

Este trabajo es una extensión del trabajo presentado en [21]. Para la ejecución de esta revisión sistemática, se adoptó un enfoque guiado por las directrices del PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis, por sus siglas en inglés) con el propósito de obtener una comprensión exhaustiva de las técnicas, instrumentos y análisis empleados en el monitoreo de temblores en las extremidades superiores de pacientes con EP. La metodología abarca diversas etapas, incluyendo preguntas de investigación clave, proceso de búsqueda, criterios de inclusión y exclusión, metodología específica para evaluar los documentos seleccionados, así como la síntesis y extracción de datos, junto con la evaluación del riesgo de sesgo en la investigación.

2.1. Preguntas de Investigación

Se identificaron las siguientes preguntas de investigación (PI) y se proporcionó un análisis detallado para responderlas. Se diseñaron preguntas específicas

para orientar la revisión sistemática, buscando abordar aspectos cruciales relacionados con las tecnologías de monitoreo de temblores en pacientes con EP. Estas son:

- PI1. ¿Cuáles son las regiones y países que actualmente lideran las investigaciones relacionadas con el monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson?
- PI2. ¿En qué aspectos específicos se centran los estudios para la evaluación de prototipos o productos diseñados para medir los temblores en pacientes con Parkinson?
- PI3. ¿Cómo se define y aplica el entorno de control en los estudios enfocados en el monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson?
- PI4. ¿Cuáles son los métodos predominantes utilizados para validar los desarrollos o productos destinados al monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson?
- PI5. ¿Cuál es la metodología preferida para llevar a cabo el análisis de datos en la investigación sobre tecnologías para medir temblores en la enfermedad de Parkinson?
- PI6. ¿Qué sensores son comúnmente empleados en los productos y prototipos diseñados para el monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson?
- PI7. ¿Cuál ha sido y sigue siendo el papel de la Inteligencia Artificial en los estudios relacionados con el monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson?

Las preguntas de investigación (PI1-PI7) formuladas en este estudio se han diseñado con el propósito de arrojar luz sobre distintos aspectos cruciales relacionados con el monitoreo de temblores en pacientes con Enfermedad de Parkinson (EP). En primer lugar, la PI1 busca identificar las regiones y países líderes en las investigaciones sobre el monitoreo de temblores, proporcionando una visión geográfica del estado actual de la investigación. La PI2 se centra en los aspectos específicos que abordan los estudios al evaluar prototipos o productos destinados a medir los temblores en pacientes con Parkinson, proporcionando una comprensión detallada de las áreas de enfoque de dichas evaluaciones. La PI3 se enfoca en definir y aplicar entornos de control, esclareciendo cómo se maneja esta variable en los estudios de monitoreo de temblores. La PI4 busca revelar los métodos predominantes para la validación de productos destinados al monitoreo, aportando información valiosa sobre la robustez y fiabilidad de dichas soluciones. La PI5 indaga sobre la metodología preferida para el análisis de datos, destacando las prácticas analíticas predominantes en la investigación. La PI6 se orienta a

identificar los sensores comúnmente utilizados en productos y prototipos, proporcionando un panorama tecnológico de las herramientas empleadas. Por último, la PI7 aborda el papel de la Inteligencia Artificial (IA) en los estudios, permitiendo comprender cómo esta tecnología ha influido y continúa influyendo en el desarrollo de sistemas de monitoreo de temblores. En conjunto, estas preguntas ofrecen una perspectiva integral y detallada que contribuye significativamente a la revisión del estado del arte, proporcionando información clave sobre los avances, enfoques y desafíos en el ámbito del monitoreo de temblores en la EP.

2.2. Proceso detallado de búsqueda

Para realizar esta revisión sistemática, se optó por tres bases de datos reconocidas: PubMed, IEEE Xplore y Google Scholar, seleccionadas por su amplio alcance e influencia tanto en la investigación biomédica como en la técnica. Se emplearon términos clave específicos, tales como "Parkinson's disease", "tremor", "wearable devices" y "hand", con el propósito de focalizar la búsqueda en la temática de interés. Con el fin de refinar los resultados, se utilizaron operadores lógicos para excluir intencionalmente términos como "tremor suppression" y "march".

La búsqueda se restringió a estudios publicados en inglés, considerando que este idioma prevalece en las publicaciones científicas. Se limitó la búsqueda a un período específico, desde enero de 2019 hasta julio de 2022, para abordar las investigaciones más recientes y relevantes en el ámbito del monitoreo de enfermedades de Parkinson.

Tras completar la búsqueda en las tres bases de datos especificadas en la sección anterior, se logró recuperar un total de 1073 artículos (1030 estudios de Google Scholar (96%), 22 estudios de PubMed (2%) y 21 de IEEE (2%)). Todos estos artículos fueron debidamente almacenados en una base de datos propia en Zotero para su posterior revisión y análisis. La Figura 1 muestra la distribución porcentual de estudios de diferentes bases de datos.

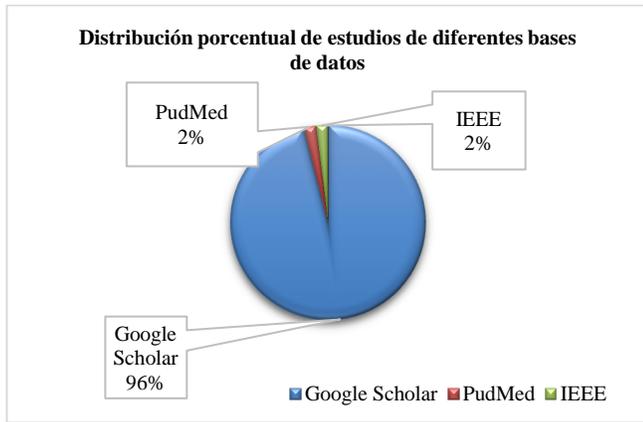


Figura 1. Distribución porcentual de estudios de diferentes bases de datos

2.3. Criterios de Inclusión y Exclusión

Criterios de Inclusión:

- La revisión se limitó a estudios en inglés, abarcando artículos de revistas y libros como fuentes primarias, y artículos publicados en las actas de conferencias como fuentes secundarias.
- Se incluyeron únicamente artículos publicados entre enero de 2019 y julio de 2022, garantizando la relevancia temporal de la información recopilada.
- Se consideraron aquellos artículos que contenían datos resultantes de pruebas experimentales.
- Se incluyeron artículos que proporcionaban información relevante sobre de monitoreo de temblores en personas con EP.

Criterios de Exclusión:

- Se excluyeron artículos duplicados, asegurando la integridad y singularidad de la información.
- Se descartaron artículos que presentaban una metodología vaga o poco clara acerca de su experimentación. Es decir, estudios con falta de claridad, detalle o precisión en la descripción de la metodología utilizada en un estudio o investigación. Esto puede incluir aspectos como la falta de información sobre los procedimientos específicos empleados, la ausencia de detalles sobre el diseño del estudio, la falta de explicación sobre cómo se recopilaron y analizaron los datos, o una descripción generalizada que no permite entender completamente cómo se llevó a cabo el estudio.
- Se excluyeron artículos que carecían de referencias sustanciales de artículos experimentales en la misma área, garantizando la validez y relevancia de la investigación incluida.

2.4. Selección de Estudios

La revisión bibliográfica inició con la búsqueda en las tres bases de datos previamente mencionadas: Google Scholar, PubMed e IEEE Xplore. Un total de 1073 artículos se recuperaron durante este proceso, distribuidos entre 1030 estudios de Google Scholar, 22 de PubMed y 21 de IEEE. Estos artículos fueron gestionados a través del software Zotero, que facilitó la identificación y eliminación de 100 duplicados, garantizando la integridad de la base de datos.

Posteriormente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los títulos y resúmenes de los artículos restantes, aplicando criterios de inclusión y exclusión. En este paso, 823 artículos fueron excluidos debido a su falta de relevancia para los objetivos de la revisión. Finalmente, 150 artículos pasaron a la fase de revisión detallada, donde se aplicaron criterios más rigurosos.

Siguiendo los principios de PRISMA, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión, lo que resultó en la selección final de 24 artículos para la revisión sistemática. El proceso completo se representa en el Diagrama de Flujo PRISMA (Figura 2).

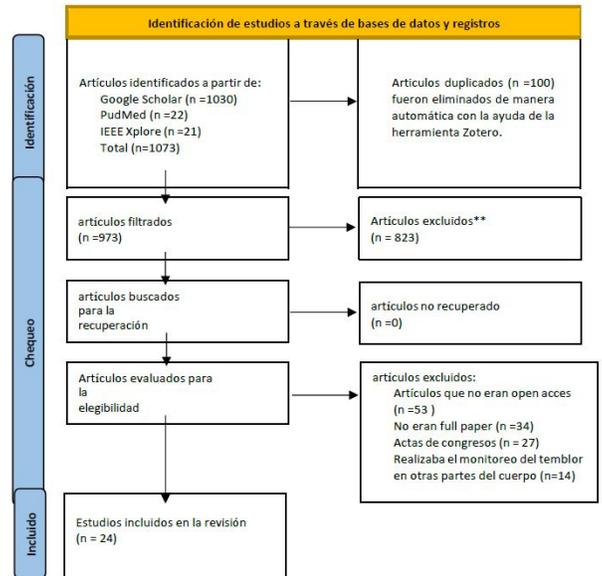


Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA para la revisión sistemática.

No se incluyeron estudios seleccionados por base de datos debido a la superposición entre las bases y a la falta de identificación en Zotero. A pesar de no contar con acceso abierto a la mayoría de los artículos de IEEE Xplore, se tomaron en cuenta para la selección final.

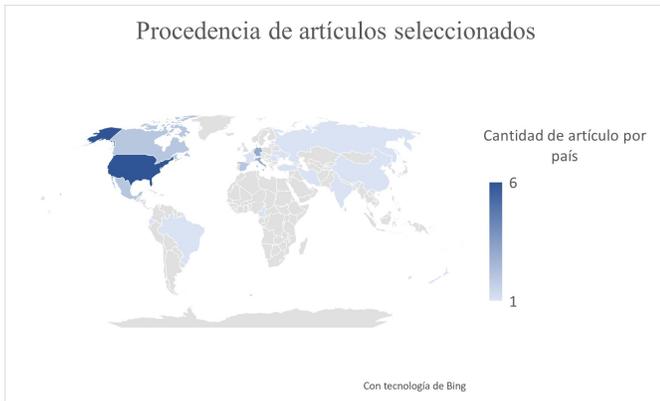


Figura 1. Procedencia por países de los artículos seleccionados. Nota: Para la elaboración de este mapa de calor se incluyeron los países de todos los autores que colaboraron en los diferentes artículos seleccionados.

Para explorar la procedencia geográfica de los estudios seleccionados, se creó un mapa de calor (Ver Figura 3), revelando que Estados Unidos lidera en la investigación sobre el monitoreo de síntomas motores en personas con Parkinson.

Además, se analizó la distribución por año, evidenciando que el 13% de los artículos corresponden al año 2022, ajustándose a la limitación temporal de la revisión hasta julio de ese año (Figura 4).

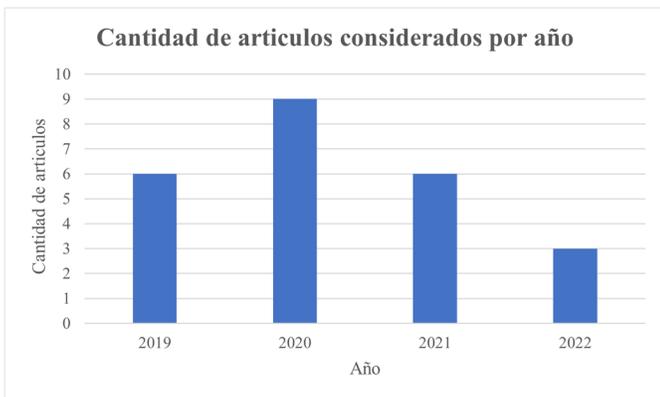


Figura 2. Porcentajes de artículos seleccionados por año

2.5. Síntesis y Extracción de Datos

En el proceso de extracción de datos, se abordaron las preguntas de investigación planteadas (PI1-PI7) para proporcionar una comprensión completa del estado actual del monitoreo de temblores en pacientes con enfermedad de Parkinson. La información extraída incluyó:

- **Títulos y Resúmenes de la Literatura Seleccionada:** Se revisaron los títulos y resúmenes para identificar la región o país de procedencia de los autores

líderes en investigaciones sobre el monitoreo de temblores (PI1).

- **Nombres de los Autores:** Se registraron los nombres de los autores para identificar a los principales contribuyentes en el campo (PI1).

- **Evaluación de Regiones Líderes (PI1):** Se investigó y analizó detenidamente la distribución geográfica de las investigaciones, identificando las regiones y países líderes en el campo del monitoreo de temblores en pacientes con enfermedad de Parkinson.

- **Enfoque en Evaluación de Prototipos (PI2):** La información relevante sobre los aspectos específicos en los que se centran los estudios para evaluar prototipos o productos diseñados para medir temblores en pacientes con Parkinson fue extraída y analizada.

- **Definición y Aplicación del Entorno de Control (PI3):** Se examinaron los estudios enfocados en el monitoreo de temblores para comprender cómo se define y aplica el entorno de control, proporcionando ideas sobre las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las evaluaciones.

- **Métodos de Validación Predominantes (PI4):** Se identificaron y analizaron los métodos predominantes utilizados para validar desarrollos o productos destinados al monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson, ofreciendo una visión detallada de los procedimientos de validación implementados.

- **Metodología Preferida para el Análisis de Datos (PI5):** Se recopiló información sobre la metodología preferida utilizada para llevar a cabo el análisis de datos en la investigación sobre tecnologías para medir temblores en la enfermedad de Parkinson.

- **Sensores Comúnmente Empleados (PI6):** Se identificaron y examinaron los sensores comúnmente empleados en los productos y prototipos diseñados para el monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson.

- **Papel de la Inteligencia Artificial (PI7):** La revisión se enfocó en comprender el papel histórico y actual de la Inteligencia Artificial en los estudios relacionados con el monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson.

Este enfoque integral de extracción y síntesis de datos permitió abordar de manera específica cada pregunta de investigación, proporcionando una visión detallada y respuestas fundamentadas en la revisión del estado del arte en el monitoreo de temblores en pacientes con enfermedad de Parkinson.

2.6. Limitaciones y Riesgo de Sesgo

Esta revisión sistemática presenta ciertas limitaciones y riesgos de sesgo que deben ser considerados al interpretar los resultados. La principal limitación radica en la selección de la literatura inicial, donde la búsqueda se restringió a estudios publicados entre enero de 2019 y julio de 2022. Este sesgo temporal podría haber excluido estudios que aún poseen relevancia en el campo del monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson.

Otra fuente potencial de sesgo se encuentra en la aplicación de criterios subjetivos para la inclusión y exclusión de estudios durante la fase de revisión. A pesar de establecer criterios estrictos y transparentes, la interpretación subjetiva podría introducir cierto grado de sesgo en la selección de estudios.

Nuestra revisión se enfocó exclusivamente en tres bases de datos prominentes: PubMed, IEEE Xplore y Google Scholar. Sin embargo, es importante reconocer que esta selección puede haber restringido la diversidad y exhaustividad de nuestros hallazgos. La omisión de otras plataformas de investigación de renombre, como Scopus y SpringerLink, podría haber limitado nuestra capacidad para capturar perspectivas adicionales y datos relevantes en el campo de estudio. La decisión de no incluir estas fuentes se basó principalmente en consideraciones prácticas, incluyendo la disponibilidad de recursos y nuestra familiaridad con las plataformas seleccionadas. No obstante, en futuras investigaciones, es imperativo ampliar la búsqueda a una gama más amplia de fuentes para garantizar la exhaustividad y la representatividad de los datos recopilados. "La ausencia de un análisis exhaustivo de todas las bases de datos disponibles, como Scopus y SpringerLink, representa un riesgo potencial de sesgo, ya que estas plataformas podrían contener información valiosa que no se ha considerado en esta revisión.

Es esencial reconocer estas limitaciones y riesgos de sesgo al interpretar los hallazgos de esta revisión sistemática, comprendiendo que la elección de criterios y bases de datos puede influir en la exhaustividad y representatividad de la información recopilada.

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta un resumen de los artículos seleccionados en la revisión, destacando los métodos, entornos de evaluación, y resultados obtenidos en cada estudio.

Los resultados abarcan una amplia gama de dispositivos y entornos de evaluación, destacando la diversidad de métodos empleados en la investigación.

Algunas de las preguntas de investigación que se pueden abordar con la información proporcionada en la Tabla 1 incluyen las PI2-PI6.

Es evidente que la mayoría de los estudios se centran en entornos clínicos, pero algunos exploran la viabilidad de la monitorización en entornos cotidianos o domiciliarios. La variedad de tecnologías, desde sensores inerciales hasta biosensores comerciales y dispositivos portátiles, refleja la continua innovación en el campo de la monitorización de síntomas de la EP. Además, los resultados detallan la eficacia de estos métodos, proporcionando una visión integral de cómo estas tecnologías pueden contribuir a la estratificación, clasificación y evaluación precisa de los síntomas de la EP.

En general, la Tabla 1 destaca la importancia de la investigación y la aplicación de diversas tecnologías para mejorar la monitorización de los pacientes con EP, brindando información valiosa que puede influir en futuras intervenciones y tratamientos.

Tabla1. Descripción general de los artículos seleccionados

Año	Primer Autor	Evaluación de	Entorno de Control	Método de Validación	Resultado
2019	Gregory Neal McKay [5]	Sensores colocados en manos y pies	Clínico	32 personas (20 pacientes con EP, 1 paciente con atrofia multisistémica, 3 participantes de control sanos y 8 pacientes que probaron el Test-retest)	El método permite estratificar personas con EP de otras afecciones, conocer la gravedad y estado de la medicación, y analizar los resultados con técnicas de procesamiento de señales personalizadas para distinguir patrones patognomónicos de diferentes trastornos del movimiento.
2019	Babak Borrojerdi [22]	Biosensor comercial NIMBLE	Mixto	20 pacientes de distintos grados de avance completaron las dos partes del estudio.	Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,471 ($p = 0,031$) entre las puntuaciones observadas en la clínica y las predichas por el algoritmo del sensor. Además, el 91% de las observaciones previstas y observadas fueron iguales dentro de un rango de ± 1 , y se evaluaron precisión y variabilidad en actividades específicas.
2019	Guillermina Vivar [4]	Leap Motion Controller	Clínico	20 personas participaron (11 hombres y 9 mujeres)	El método clasificó las mediciones del temblor del paciente después de MDS-UPDRS en tres niveles (0, 1 y 2) con una precisión superior al 98% y 95% para contraste y homogeneidad.
2019	Gabriel Rivera [18]	Exoesqueleto con sensores IMU y Myo armband	Clínico	13 pacientes con EP	El exoesqueleto predijo el temblor desde 0.0% hasta un 96.88% y el movimiento voluntario desde un 34.38% hasta un 100% de acierto.
2019	Margot Heijmans [16]	Dispositivo MOX5 con acelerómetro y giroscopio	Hogar (dos semanas)	20 pacientes con EP idiopática	El sensor portátil predijo de manera fiable el estado de apagado notificado subjetivamente, y los participantes completaron los cuestionarios utilizados como verdad paralela en un 79,1%.

2019	Roberto López Blanco [23]	Reloj inteligente SW3 Sony©	Clínico (evaluación anual)	22 pacientes con EP	El reloj inteligente mostró una alta correlación con las puntuaciones del temblor en reposo (UPDRS-III), y se obtuvo un coeficiente de fiabilidad intraclase con temblor de reposo = 0,89.
2020	Elham Samadi [20]	Smartphone Sony Xperia SP	Laboratorio	50 pacientes con EP	Comparando clasificadores y apuntes del neurólogo usando la escala UPDRS, se logró una precisión de $95,91 \pm 1,51$.
2020	Patrick Locatelli [10]	Placa Muse en dorso de la mano	Laboratorio	24 pacientes (17 EP y 7 con temblor esencial)	Se obtuvo una precisión promedio del 90% al clasificar el temblor de Parkinson y el temblor esencial. Los clasificadores basados en características de potencia tuvieron un rendimiento del 91,4%.
2020	Atenabgoh Bruno Peachap [24]	Teclado de computadora con software Tappy	No especifica	217 participantes	Se alcanzó hasta un 100% de precisión en la clasificación en algunos casos.
2020	Nikhil Mahadevan [13]	Opal (APDM, Inc.) en las muñecas	Clínica (dos visitas)	81 participantes (31 con EP y 50 personas de control)	Se logró una precisión de movimiento en la mano del 92,82%. Además, los datos mostraron una buena concordancia con las evaluaciones clínicas para el temblor de reposo y la amplitud del temblor en reposo.
2020	Ana Alves [7]	MetaMotionC en la mano	No especifica	50 participantes (18 pacientes con EP, 32 personas de control)	Entre los clasificadores utilizados, KNN presentó la mayor precisión. El rendimiento aumentó según el número de funciones utilizadas, y se demostró que el mejor algoritmo para clasificar el temblor es el KNN.
2020	Rubén Sánchez Segundo [15]	Acelerómetros Axivity AX3 en ambas muñecas	Hogar	12 pacientes con EP	El uso de CNN-T/NT+MLP presentó el mejor rendimiento entre los doce sistemas analizados, permitiendo la autoevaluación de temblores en el hogar. Se recomienda utilizar MFCCs-T/NT cuando no se cuente con suficientes datos

					para entrenar una red neuronal profunda.
2020	Nicholas Shawen [25]	Biosensor MC10 y reloj Apple Watch Series 2	Clínico	13 personas con EP	No hay una marcada diferencia al clasificar el temblor entre el reloj y el biosensor. Sin embargo, el giroscopio mostró mejores datos al ver la bradicinesia.
2020	Tibor Zakji-Zechmeister [19]	Acelerómetro MPU9250 en extremidades superiores	Clínica e investigación	30 participantes (14 con EP y 16 con temblor esencial)	Se encontraron correlaciones significativas entre la gravedad del temblor del sistema propuesto y las evaluaciones MDS-UPDRS en EP y el TETRAS en ET fuera y dentro de la terapia.
2020	Franz MJ Pfister [26]	Reloj Microsoft Band 2	Entorno del paciente	30 pacientes	Alta correlación entre el modelo utilizado y las anotaciones de la escala realizada a cada persona.
2021	Rene Peter Bremm [27]	Sensores MAX21100 y MAX11060 en el antebrazo	Clínica e investigación	10 personas sanas	Resultados en sujetos sanos demuestran una precisión del 95%.
2021	Basilio Vescio [28]	Electrodos de EMG en músculos antagonistas de brazos	Clínico	21 participantes (14 con EP y 7 con TE)	Se implementó correlación de Pearson y Coeficiente de correlación intraclass, mostrando que no hay diferencias significativas en la frecuencia y diferencia de fase del temblor entre μ EMG y EMG.
2021	A. Salgado López [12]	Sensor MPU6050 en la muñeca	No especifica	3 participantes sanos	Comparación de dispositivos en muñeca y dedo demostró señales muy similares con correlación cruzada de 0.9957.
2021	Asma Chana [3]	Sensores inerciales (Pmod Nav) en brazalete	Clínico	40 participantes (10 con temblores, 10 con bradicinesia y 20 personas de control)	El sistema discriminó correctamente a 34 participantes en las clases, logrando una precisión del 91,7%.
2021	Jaime L. Adams [2]	Parque MC10 Inc. con cinco sensores	Clínica y casa	34 participantes (17 con EP y 17 personas de control)	El sistema contabilizó la cantidad de horas en que se manifestó el temblor. Fue significativamente mayor en

					manos más afectadas de personas con Parkinson.
2021	Murtadha D. Hssayeni [17]	Sensores de inercia en muñeca y tobillo	Hogar	24 pacientes con EP	Las puntuaciones obtenidas tuvieron una correlación del 0,79 ($p < 0,0001$) con la escala UPDRS-III estimada.
2022	A. Brindha [6]	Sensor MPU6050 en la muñeca	Clínico y laboratorio	15 pacientes con temblor de leves a graves	El dispositivo, con clasificador, diferenció tipos de temblor con un 86,67% de precisión. También obtuvo un 73,33% de precisión sin el clasificador.
2022	Prashanna Khwaounjoo [29]	Leap Motion Controller	No especifica	55 pacientes con EP	Al comparar las manos, se encontraron diferencias significativas en volumen, velocidad y aceleración entre la mano derecha e izquierda. No hubo diferencias significativas en frecuencias.
2022	Xupo Xing [9]	Acelerómetros en dedo y sensores EMG en músculos	Clínica	398 participantes (257 con EP y 141 con temblor esencial)	Modelos de aprendizaje (RF y XGBoost) mostraron una precisión superior a 0,84 y AUC superior a 0,90 en la clasificación de temblores.

3.1. Entornos de Control y Evaluación

Esta sección está relacionada con la pregunta PI3 ¿Cómo se define y aplica el entorno de control en los estudios enfocados en el monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson?

La búsqueda de métodos eficaces para monitorear los síntomas motores en pacientes con enfermedad de Parkinson (EP) ha llevado a la creación de dispositivos de monitoreo que buscan superar las limitaciones subjetivas inherentes a las escalas de evaluación de síntomas. Múltiples investigaciones destacan la importancia de realizar el monitoreo de manera continua y durante las actividades cotidianas de los pacientes [2], [3], [5], [6], [9], [10], [16 - 20], [22], [25 - 27]. Este enfoque se justifica al considerar que las realidades del monitoreo clínico difieren significativamente de los entornos domésticos en los que los pacientes experimentan sus síntomas diariamente. Además, el monitoreo continuo en el hogar facilita una evaluación más precisa de la progresión de la enfermedad y la eficacia del tratamiento [10], [15 - 17].

A pesar de esta premisa, varios estudios aún realizan pruebas en entornos controlados, ya sea en laboratorios o clínicas, bajo la supervisión de especialistas [4 - 6], [9] [10] [13], [18 - 24]. Esta elección se justifica por diversas razones, como la utilización de sensores o equipos no portátiles, la necesidad de la presencia de técnicos capacitados para manejar el equipo, o la asistencia de especialistas que requieren explicar detalladamente los ejercicios necesarios para el análisis correcto.

Existen también estudios que han logrado evaluar a los pacientes tanto en entornos controlados como en sus entornos naturales, proporcionando a los investigadores resultados que reflejan estas dos realidades distintas y permiten una comparación significativa de los resultados obtenidos [2], [25]. La Figura 5 presenta un resumen visual de la distribución de los estudios según el entorno en el que se llevaron a cabo. En esta figura, se destaca que el 58% de los estudios fueron realizados en entornos de control, ya sea en clínicas o laboratorios. Un 17% llevó a cabo sus pruebas en entornos naturales o cotidianos para los pacientes, mientras que un 8% adoptó un enfoque híbrido, realizando pruebas tanto en entornos

controlados como naturales. Además, en un 17% de los casos, no se proporcionó información suficiente para comprender el entorno de control utilizado. Estos hallazgos subrayan la diversidad de enfoques en la investigación de dispositivos de monitoreo para la EP y resaltan la importancia de considerar tanto los entornos controlados como los naturales en la evaluación de la efectividad de estos dispositivos.

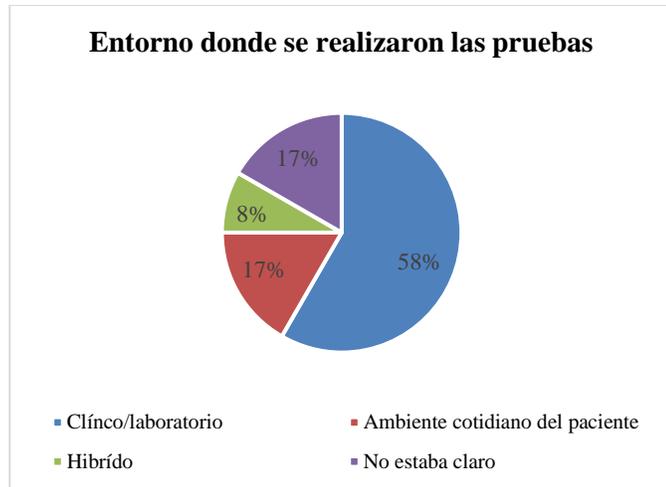


Figura 3. Entornos en donde se realizaron las pruebas

3.2. Sensores

Esta sección aborda específicamente la PI6 ¿Qué sensores son comúnmente empleados en los productos y prototipos diseñados para el monitoreo de temblores en pacientes con Parkinson? Los sensores inerciales, conocidos como IMU (Unidades de Medición Inercial), ofrecen la capacidad de estimar actividades físicas, tales como posición, velocidad y orientación. Son dispositivos de bajo costo, tamaño reducido y consumo eficiente, lo que los convierte en herramientas ideales para la detección de síntomas como temblores, bradicinesia, bloqueos de la marcha y discinesia en pacientes con enfermedad de Parkinson [4], [16].

Aunque algunos estudios consideran que las señales de electromiograma (EMG) con electrodos de superficie son el "estándar oro" para el monitoreo de temblores, su implementación implica costos elevados, consume mucho tiempo y requiere la intervención de especialistas y técnicos capacitados [9], [24]. Como alternativa, se han propuesto diversas metodologías y herramientas para diferenciar entre la amplitud y frecuencia de los

temblores causados por la enfermedad de Parkinson y otras afecciones [12].

Dada la baja frecuencia característica de los temblores en la enfermedad de Parkinson, varios estudios sugieren que los sensores inerciales son capaces de captar estas frecuencias de manera efectiva. No obstante, aún persisten preguntas dentro de la comunidad científica sobre la posición óptima de colocación en las extremidades superiores del paciente y el tipo específico de sensor a utilizar [3]. La revisión de estudios revela que diversos IMU se emplean en la investigación, detallados en la Tabla 1: [5], [12], [15], [17 - 20], [23]. Además, muchos estudios han evaluado dispositivos comerciales para determinar su eficacia, como se evidencia en: [2], [4], [9 - 10], [13], [16], [20 - 22], [25 - 29].

La implementación de sensores, especialmente aquellos que permiten la creación de dispositivos portátiles, ha permitido avanzar hacia una atención médica más personalizada. Los sensores inerciales, como los acelerómetros, ofrecen información más fiable al detectar variaciones minúsculas que podrían pasar desapercibidas en las observaciones convencionales del personal de salud [23].

Esta revisión literaria destaca la diversidad de metodologías utilizadas para analizar las señales de los sensores. Entre las más comunes se encuentran las relacionadas con técnicas de inteligencia artificial, así como enfoques en el dominio de la frecuencia y el tiempo, como se evidencia en estudios específicos: [3], [12], [15], [20], [23], [26]. Estas metodologías incluyen análisis espectral, transformadas rápidas de Fourier, transformadas de Hilbert, transformadas de wavelets, espectro de potencia, densidad espectral y diversos algoritmos de clasificación y predicción. Estas técnicas han permitido visualizar e identificar las frecuencias de interés de manera efectiva.

3.3. Inteligencia Artificial

Esta sección responde principalmente a la Pregunta de Investigación PI7, específicamente, ¿Cuál ha sido y sigue siendo el papel de la Inteligencia Artificial en los estudios relacionados con el monitoreo de temblores en la enfermedad de Parkinson? A su vez, esta PI está relacionada con los enfoques y metodologías utilizados para analizar las señales de temblor en pacientes con enfermedad de Parkinson. Aborda cómo la Inteligencia Artificial, específicamente las Redes Neuronales

Artificiales y las técnicas de aprendizaje automático, como clasificadores y modelos predictivos, son aplicadas en la interpretación de las señales obtenidas de diferentes estudios, ofreciendo ideas sobre la eficacia de estos métodos en la detección y clasificación de patrones de temblor. Hemos revisado los artículos que contemplan este componente.

Redes Neuronales Artificiales (RNA):

En el artículo [18], se emplearon Redes Neuronales Artificiales, específicamente la Multicapa, para la búsqueda y clasificación de patrones en señales electromiográficas de pacientes con enfermedad de Parkinson. Se optó por RNA de tipo Back Propagation debido a su capacidad de optimización y retroalimentación, logrando un error medio cuadrado inferior al 5% durante el entrenamiento. Este estudio concluyó que este tipo de RNA es particularmente adecuado para investigaciones que involucran señales electromiográficas, permitiendo la identificación y clasificación eficiente de patrones en las señales.

Aprendizaje Automático:

El uso de clasificación estadística y su combinación con el aprendizaje automático ha ganado prominencia en el diseño de sistemas inteligentes. En el estudio [4], que buscaba clasificar las señales de temblor, se implementaron clasificadores de aprendizaje automático supervisado junto con sensores no portátiles. El uso de algoritmos como árbol embolsado (BgT) y Vecinos más cercanos-fino (F-KNN) alcanzó una precisión superior al 98% en la clasificación de mediciones de temblor. Otros estudios, como [3], [6], [7], [9], [10], [17], [23], también utilizaron diversos clasificadores y modelos heurísticos, demostrando que el aprendizaje automático es una técnica efectiva para clasificar y predecir patrones en las señales de temblor en pacientes con enfermedad de Parkinson.

4. Conclusiones

Esta revisión destaca el progreso significativo en el campo de la monitorización de la EP y señala el potencial transformador de estas tecnologías para el diagnóstico, seguimiento y tratamiento personalizado de esta enfermedad neurodegenerativa. Sin embargo, es imperativo abordar los desafíos restantes para garantizar la aplicación efectiva y generalizada de estas innovaciones en la atención clínica.

La revisión del estado del arte revela una amplia diversidad en las tecnologías utilizadas para monitorizar la enfermedad de Parkinson (EP), desde sensores inerciales hasta biosensores comerciales y dispositivos portátiles. Además, se observa una tendencia hacia la exploración de entornos de evaluación más allá de los clínicos, abarcando el hogar y el laboratorio. Esta diversidad indica un enfoque integral para abordar las complejidades de la EP y adaptar la monitorización a la vida diaria de los pacientes.

La mayoría de los estudios presentados enfatizan la validación y precisión de los métodos utilizados. Se destaca la importancia de correlacionar los resultados obtenidos con evaluaciones clínicas estándar, como la escala UPDRS, para garantizar la fiabilidad de las mediciones. La alta precisión alcanzada en varios estudios, a menudo superior al 90%, sugiere que estas tecnologías tienen el potencial de ser herramientas efectivas y confiables para la monitorización de la EP.

La implementación creciente de técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales en la clasificación y predicción de síntomas de la EP destaca una dirección prometedora en la investigación. La capacidad de estos algoritmos para procesar grandes conjuntos de datos y proporcionar resultados precisos sugiere un avance significativo en la capacidad de diagnóstico y estratificación de los pacientes.

A pesar de los avances, persisten desafíos, como la variabilidad en la presentación de síntomas entre pacientes, la necesidad de estandarización en la recopilación y análisis de datos, y la integración efectiva de estas tecnologías en la práctica clínica. Además, la falta de especificidad en algunos métodos indica la importancia de continuar refinando las técnicas y explorar enfoques combinados para una evaluación más holística.

La integración de sensores y técnicas de inteligencia artificial ha permitido una atención más personalizada para los pacientes con EP. La capacidad de monitorear continuamente en entornos cotidianos proporciona datos más representativos de la vida diaria, lo que puede influir directamente en ajustes terapéuticos y mejoras en la calidad de vida de los pacientes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto FID22-040, bajo contrato por subsidio económico ID No.200-2022. Los autores agradecen a los estudiantes e

investigadores del grupo de investigación en Ingeniería de Telecomunicación y Sistemas Inteligentes Aplicados a la Sociedad (ITSIAS). Los autores E.C. y Y.S. reconocen el apoyo del Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá al proporcionar financiamiento parcial para la publicación de este manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

A continuación, se especifica la contribución de cada autor: Investigación, L.P. y Y.S.; Conceptualización, L.P. y Y.S.; Revisión sistemática, L.P. y Y.S.; Preparación y corrección del artículo, E.C. y Y.S.; Supervisión, E.C. y Y.S..

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] A. Ibrahim, Y. Zhou, M. E. Jenkins, A. L. Trejos y M. D. Naish, «Real-Time Voluntary Motion Prediction and Parkinson's Tremor Reduction Using Deep Neural Networks,» *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 29, pp. 1413-1423, 2021.
- [2] J. L. Adams, K. Dinesh, C. W. Snyder, C. W. Xiong, C. W. Tarolli, S. Sharma, E. R. Dorsey y G. Sharma, «A real-world study of wearable sensors in Parkinson's disease,» *Nature partner journals| parkinson's disease*, vol. 7, n° 1, p. 106, 2021.
- [3] A. Channa, R.-C. Ifrim, D. Popescu y N. Popescu, «A-WEAR Bracelet for Detection of Hand Tremor and Bradykinesia in Parkinson's Patients,» *Sensors*, vol. 21, n° 3, p. 981, 2021.
- [4] G. Vivar, D.-L. Almanza-Ojeda, I. Cheng, J. C. Gomez, 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.
- [5] G. N. McKay, T. P. Harrigan y J. R. Brašić, «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] A. Brindha, K. Sunitha y S. R. Wilson, «Tremor Classification Using Wearable Iot Based Sensors,» de *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Chennai, India, 2022.
- [7] A. C. Alves de Araújo, E. G. da Rocha Santos, K. S. Guedes de Sá, V. K. Teixeira Furtado, F. A. Santos, R. Costa de Lima, L. V. Krejčová, 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,» *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, p. 778, 2020.
- [8] A. Channa, N. Popescu y a. Ciobanu, «Wearable Solutions for Patients with Parkinson's Disease and Neurocognitive Disorder: A Systematic Review,» *Sensors*, vol. 20, n° 9, p. 2713, 2020.
- [9] X. Xing, L. Shun, N. Luo, L. Zhou y C. L. J. Song, «Identification and Classification of Parkinsonian and Essential Tremors for Diagnosis Using Machine Learning Algorithms,» *frontiers in Neuroscience*, vol. 16, p. 701632, 2022.
- [10] 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, p. 1695, 2020.
- [11] N. Suranthal, P. Atmajab, Davidc y M. Wicaksonod, «A Review of Wearable Internet-of-Things Device for Healthcare,» *Procedia Computer Science*, vol. 179, pp. 936-943, 2020.
- [12] Á. Salgado López, A. Carmona Almazan, G. Dorantes Mendez y A. R. Mejia Rodriguez, «Comparación de dispositivos para la adquisición de señales de acelerometría en Extremidades superiores para la caracterización del temblor parkinsoniano,» de *Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, Guadalajara, 2021.
- [13] N. Mahadevan, C. Demanuele, H. V. Zhang, 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° 1, p. 5, 2020.
- [14] M. Erb, D. Karlin y B. e. a. Ho, «mHealth and wearable technology should replace motor diaries to track motor fluctuations in Parkinson's disease,» *npj Digit. Med.*, vol. 3, n° 6, 2020.
- [15] R. San-Segundo, A. Zhang, A. Cebulla, S. Panev, G. Tabor, K. Stebbins, R. Massa, A. Whitford, F. de la Torre y J. Hodgins, «Parkinson's Disease Tremor Detection in the Wild Using Wearable Accelerometers,» *Sensors*, vol. 20, p. 5817, 2020.
- [16] M. Heijmans, J. G. V. Habets, C. Herff, J. Aarts, A. Stevens, M. L. Kuijf y P. L. Kubben, «Monitoring Parkinson's disease symptoms during daily life: a feasibility study,» *npj Parkinson's Disease*, vol. 5, n° 21, 2019.
- [17] M. D. Hssayeni, J. Jimenez-Shahed, M. A. Burack y B. Ghoraani, «Ensemble deep model for continuous estimation of Unified Parkinson's Disease Rating Scale III,» *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 20, n° 32, pp. 1-20, 2021.
- [18] 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.
- [19] T. e. a. Zajki-Zechmeister, «Quantification of tremor severity with a mobile tremor pen,» *Heliyon*, vol. 6, n° 8, 2020.
- [20] E. Samadi, E. Ahmadi y F. Nowshiravan Rahatabad, «Analysis of Hand Tremor in Parkinson's Disease: Frequency Domain Approach,» *Frontiers in Biomedical Technologies*, vol. 7, n° 2, pp. 105-111, 2020.
- [21] L. Peña Batista, C. Ureña, R. Nieto, L. Vasquez, 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.
- [22] B. e. a. Borojerd, «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.
- [23] R. e. a. López-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.
- [24] A. B. Peachap, D. Tchiotsop, V. Louis-Dorr y D. Wolf, «Detection of early Parkinson's disease with wavelet features using finger typing movements on a keyboard,» *SN Applied Sciences*, vol. 2, pp. 1-8, 2020.
- [25] N. e. a. Shawen, «Role of data measurement characteristics in the accurate detection of Parkinson's disease symptoms using wearable sensors,» *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 17, pp. 1-14, 2020.
- [26] F. M. e. a. Pfister, «High-resolution motor state detection in Parkinson's disease using convolutional neural networks,» *Scientific reports*, vol. 10, n° 1, p. 5860, 2020.
- [27] R. P. Bremm, A. Werle, C. Auer, F. Hertel, J. Gonçalves y K. P. Koch, «TreCap: A wearable device to measure and assess tremor data of visually guided hand movements in real time,» *arXiv preprint arXiv:2108.01736*, 2021.
- [28] B. Vescio, R. Nisticò, A. Augimeri, A. Quattrone, M. Crasà y A. Quattrone, «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° 2, p. 200, 2021.
- [29] P. Khwaounjoo, G. Singh, S. Grenfell, B. Özsoy, M. R. MacAskill, T. J. Anderson y Y. O. Çakmak, «Non-Contact Hand Movement Analysis for Optimal Configuration of Smart Sensors to Capture Parkinson's Disease Hand Tremor.,» *Sensors*, vol. 22, n° 12, p. 4613, 2022.