

RESUMEN

Los accidentes cerebrovasculares (ACV) representan una de las principales causas de discapacidad motora. La evaluación clínica del progreso en la movilidad del brazo suele depender de la observación visual del terapeuta o de sistemas de cámaras muy costosos, lo que dificulta un seguimiento continuo y preciso, especialmente en lugares con pocos especialistas. El objetivo de este proyecto es desarrollar un dispositivo de monitoreo portátil basado en sensores inerciales y una aplicación móvil para registrar de forma exacta el rango de movimiento de los pacientes post-ACV, apoyando el diagnóstico y la evaluación a distancia. El método consistió en el diseño e impresión 3D de un dispositivo ligero que integra un sensor inercial (IMU) capaz de medir la orientación del brazo en tiempo real. Esta información se transmite de forma inalámbrica a una aplicación móvil diseñada con elementos visuales atractivos para guiar al paciente. El sistema basa su análisis en un modelo de evaluación bilateral, midiendo primero el movimiento del brazo sano para utilizarlo como referencia ideal y compararlo matemáticamente con la movilidad del brazo afectado en los distintos planos anatómicos. Como resultado principal, se logró consolidar un sistema que captura los datos del movimiento y genera reportes automáticos de forma inmediata. La aplicación procesa la información para calcular el porcentaje exacto de recuperación del paciente y empaqueta estos datos visualmente. Se demostró que el dispositivo permite al especialista médico recibir mediciones confiables de forma remota, confirmando que es una herramienta accesible y efectiva para dar continuidad a la evaluación clínica de los pacientes de manera remota.

Capítulo 1. Introducción

Los accidentes cerebrovasculares (ACV) son una de las principales causas de discapacidad motora. Muchos pacientes requieren un seguimiento riguroso para evaluar cómo recuperan el control del brazo. Sin embargo, la evaluación médica de este progreso suele depender de la simple observación del especialista o, en su defecto, de sistemas de cámaras de laboratorio que son muy caros. Esta falta de herramientas accesibles para medir el movimiento de forma exacta dificulta que los médicos obtengan un diagnóstico preciso de la evolución del paciente.

En los últimos años, la evaluación a distancia ha surgido como una opción viable para registrar el movimiento utilizando dispositivos portátiles. Entre estos, los sensores inerciales (IMU) destacan por su bajo costo, tamaño pequeño y capacidad para obtener datos de aceleración y posición en tiempo real. Su uso ha demostrado ser lo suficientemente preciso para medir hasta dónde puede moverse el brazo, identificar problemas al moverse y apoyar el diagnóstico clínico. Con este proyecto buscó establecer las bases para crear un dispositivo portátil capaz de medir objetivamente el movimiento del brazo en pacientes que sufrieron un ACV, usando un sensor IMU y enviando la información a distancia.

1.1 Antecedentes

La rehabilitación de los miembros después de un accidente cerebrovascular (ACV) es un proceso largo y complejo que requiere seguimiento constante para la recuperación del control motor, la fuerza y el rango de movimiento. A pesar de la importancia de

este proceso, múltiples estudios han documentado que la adherencia a la terapia suele ser baja. Factores como limitaciones económicas, dificultad para desplazarse, falta de transporte, barreras físicas y disponibilidad limitada de especialistas afectan directamente la continuidad del tratamiento. En este contexto, ha surgido la necesidad de explorar alternativas que permitan complementar o sustituir parcialmente la terapia presencial mediante sistemas accesibles, portátiles y de uso domiciliario.

Dentro de estas alternativas, los sensores inerciales (IMU) han recibido creciente atención por su capacidad para registrar aceleración, velocidad angular y orientación de segmentos corporales en tiempo real. Su bajo costo, facilidad de implementación y portabilidad los han convertido en componentes clave para el desarrollo de sistemas de rehabilitación remota. A diferencia de los sistemas ópticos, los IMU permiten registrar movimiento sin necesidad de cámaras o infraestructura especializada, lo que facilita su uso tanto en entornos clínicos como en el hogar.

Mei (2024) desarrolló un dispositivo portátil basado en IMU para medir la actividad del brazo en sobrevivientes de ACV, demostrando que la señal obtenida permite distinguir patrones de movimiento útiles para el seguimiento terapéutico. El sistema fue evaluado en tareas funcionales específicas y mostró un desempeño consistente en la detección de movimiento, lo que valida el uso de IMU como herramienta de apoyo clínico. De forma similar, Hernandez (2023) diseñó un sensor de muñeca orientado a evaluar la calidad de movimientos durante ejercicios de rehabilitación, logrando

clasificaciones precisas en tareas repetitivas, lo que sugiere que los IMU pueden utilizarse para ofrecer retroalimentación automatizada al paciente.

Por otra parte, Picerno (2023) comparó un sistema IMU construido desde cero con un sistema óptico profesional y encontró errores menores a 5° en mediciones de cinemática del miembro superior, afirmando que los IMU son lo suficientemente precisos para aplicaciones clínicas. Aunque el estudio incluía comparación con un estándar, la implementación del sistema IMU fue desarrollada desde cero, cumpliendo con el tipo de investigaciones relevantes para este proyecto. A esto se suma la contribución de Kim (2022), quien evaluó un sistema IMU para cuantificar rangos de movimiento del hombro y confirmó que los sensores registran variaciones angulares útiles para pacientes con movilidad reducida.

Además del análisis cuantitativo del movimiento, varios estudios han enfocado sus esfuerzos en la rehabilitación desde casa. Lai (2023) desarrolló un sistema con IMU para monitorear ejercicios guiados en casa, integrando instrucciones visuales y registro automático de repeticiones. Los participantes calificaron positivamente la facilidad de uso del dispositivo, lo que apoya su implementación en terapias remotas. Serrano (2024) reforzó estas conclusiones al diseñar un sistema portátil capaz de evaluar el progreso semanal del paciente, proporcionando información objetiva que puede ser enviada directamente al terapeuta.

El uso de algoritmos para clasificación y análisis de movimiento ha ampliado las posibilidades de los IMU. Zhang (2023) creó un modelo computacional capaz de identificar la calidad del movimiento empleando exclusivamente datos de aceleración y

velocidad angular, mostrando una precisión alta en la detección de ejecuciones correctas e incorrectas durante ejercicios de rehabilitación. De manera complementaria, Ramos-García (2022) utilizó IMU para analizar patrones motores alterados en tareas repetitivas del brazo, demostrando que el sensor puede diferenciar entre movimientos funcionales y movimientos compensatorios. Finalmente, Torres-López (2023) evaluó un dispositivo IMU para monitoreo continuo del brazo y reportó buena repetibilidad interevaluador, indicando que los sensores pueden proporcionar datos confiables durante sesiones prolongadas.

En conjunto, estos estudios demuestran que el empleo de IMU en rehabilitación de los miembros post-ACV no solo es viable, sino que ofrece ventajas significativas: registro continuo del movimiento, portabilidad, bajo costo, facilidad de uso y capacidad de integración con aplicaciones móviles. Los IMU permiten obtener métricas cuantitativas útiles para el seguimiento clínico, como rangos de movimiento, repeticiones, detección de patrones motores y clasificación de calidad de movimiento. La evidencia revisada establece una base sólida para el diseño de un dispositivo propio de rehabilitación remota, orientado a permitir que los pacientes continúen su terapia desde casa con monitoreo adecuado por parte del terapeuta.

Con estos antecedentes, el proyecto busca aprovechar los principios y resultados generados por estas investigaciones para desarrollar un sistema de monitoreo basado en IMU, específicamente diseñado para apoyar a pacientes post-ACV.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Desarrollar un dispositivo de diagnóstico remoto para pacientes con secuelas post-ACV que permita monitorear sus movimientos mediante sensores inerciales y enviar los datos a una aplicación móvil para apoyar el seguimiento terapéutico desde casa.

1.2.2 Objetivos específicos.

Diseñar un dispositivo portátil capaz de registrar los movimientos del paciente con buena precisión utilizando sensores inerciales.

Implementar una aplicación móvil que guíe los ejercicios de rehabilitación y almacene la información generada por el paciente para su análisis remoto.

1.3 Justificación

El accidente cerebrovascular (ACV) representa una de las principales causas de discapacidad motora a nivel mundial, afectando significativamente la funcionalidad del miembro superior y la autonomía en las actividades de la vida diaria. La recuperación de estas funciones requiere programas de rehabilitación intensivos, continuos y supervisados; sin embargo, factores como la distancia a los centros especializados, los costos de traslado y las limitaciones económicas dificultan la adherencia al tratamiento. Esta problemática impacta directamente en la calidad de vida del paciente y en su proceso de reintegración social y laboral.

La rehabilitación es fundamental para recuperar la función motora, especialmente durante los primeros meses posteriores al evento. Sin embargo, para que el tratamiento sea efectivo, debe ser constante, repetitivo y supervisado. En la práctica, muchos pacientes no logran mantener la continuidad de su terapia debido a distintos factores, como la distancia a los centros de rehabilitación, los costos de transporte, la falta de tiempo o incluso la escasez de especialistas en algunas regiones. Esta interrupción en el tratamiento puede disminuir significativamente el nivel de recuperación alcanzado.

Frente a esta problemática, es necesario buscar alternativas que permitan extender la rehabilitación más allá del entorno clínico. La telerehabilitación surge como una opción que facilita el seguimiento del paciente desde su hogar, reduciendo barreras físicas y económicas. Sin embargo, para que este tipo de modalidad sea efectiva, es importante contar con herramientas que permitan registrar el movimiento de forma objetiva y confiable, evitando depender únicamente de la percepción del paciente o del reporte verbal.

Por eso, los sensores inerciales (IMU) representan una solución accesible y práctica. Estos dispositivos permiten medir variables relacionadas con el movimiento, como aceleración y cambios de orientación, lo que posibilita analizar la ejecución de ejercicios terapéuticos. Además, su tamaño reducido y bajo costo facilitan su integración en dispositivos portátiles tipo wearable, los cuales pueden ser utilizados cómodamente en casa sin interferir con las actividades del usuario.

Existe una necesidad real para el desarrollo de un dispositivo portátil que permita monitorear pacientes que han sufrido un ACV. La intención es aportar una herramienta que contribuya al

seguimiento remoto del proceso de rehabilitación, favoreciendo la continuidad terapéutica y proporcionando información que pueda apoyar la toma de decisiones clínicas.

Capítulo 2.

MARCO TEÓRICO

El accidente cerebrovascular (ACV) es una de las principales causas de mortalidad y de discapacidad adquirida en adultos a nivel mundial. Sus secuelas neurológicas frecuentemente se manifiestan como déficits motores severos, especialmente en el miembro superior, ocasionando hemiparesia, debilidad muscular y una reducción drástica del rango de movimiento funcional, lo que compromete gravemente la independencia del paciente en sus actividades de la vida diaria (Mongeau et al., 2024). En México, esta patología representa un reto de salud pública de gran magnitud; se estima una incidencia de 118 nuevos casos por cada 100,000 habitantes, lo que se traduce en la alarmante cifra de aproximadamente 170,000 nuevos pacientes cada año (Secretaría de Salud, 2023).

Tras sufrir un ACV, los pacientes requieren procesos de rehabilitación prolongados e intensivos para estimular la neuroplasticidad y recuperar la movilidad. Sin embargo, la continuidad de este tratamiento se ve fuertemente limitada por diversas barreras socioeconómicas y deficiencias estructurales en el sistema de salud. A nivel nacional, existe una densidad notablemente baja de especialistas, calculada en apenas 9.17 fisioterapeutas por cada 10,000 habitantes. A esta escasez de personal se suma el hecho de que, en centros de rehabilitación ubicados en poblados lejanos, en muchas ocasiones no se cuenta con un rehabilitador de manera permanente. Estos factores, combinados con los altos costos asociados al tratamiento, la distancia hacia las clínicas y la falta de transporte adecuado, provocan que

una gran cantidad de pacientes abandonen o suspendan sus terapias. Esta interrupción no solo afecta su recuperación funcional, sino que dificulta enormemente que los médicos puedan realizar evaluaciones funcionales objetivas y dar un seguimiento adecuado al progreso de cada caso.

Por esas razones, la tele rehabilitación y el monitoreo remoto han surgido como alternativas tecnológicas altamente efectivas que permiten trasladar la evaluación clínica desde el hospital hasta el entorno domiciliario del paciente. Para cuantificar de manera correcta la falta motora sin depender de estimaciones visuales o de la presencia física del especialista, la práctica clínica se apoya en la cinemática articular. En pacientes post-ACV, la evaluación funcional más precisa suele basarse en un modelo de evaluación bilateral del movimiento. Este enfoque establece que el patrón de referencia clínico más exacto es el propio paciente, permitiendo una valoración completamente personalizada. El modelo consiste en tomar el comportamiento cinemático del lado sano como el valor funcional de control, para luego compararlo directamente con la movilidad del miembro afectado. Esta evaluación comparativa se centra en la medición del Rango de Movimiento (ROM, por sus siglas en inglés) a través de los tres planos anatómicos principales que rigen la biomecánica del brazo. En el plano sagital se evalúan los movimientos de flexión y extensión (con un rango ideal de hasta 180 grados); en el plano frontal se analizan la abducción y aducción; y en el plano horizontal se registra la abducción y aducción horizontal, así como las rotaciones internas y externas. A partir de la recolección de estas mediciones precisas en ambos miembros, el sistema es capaz de calcular el porcentaje de simetría funcional mediante una relación matemática directa que divide el ROM del lado afectado entre el ROM del lado sano, multiplicando el resultado por cien para

obtener el porcentaje de recuperación: $\% \text{ Recuperación} = (\text{ROM lado afectado} / \text{ROM lado sano}) \times 100$.

Tradicionalmente, la medición del ROM y la obtención de la cinemática articular con alta precisión necesitarían de sistemas ópticos de captura de movimiento (OMCS) basados en múltiples cámaras infrarrojas y marcadores reflectantes adheridos a la piel (Choi et al., 2021). Aunque precisos, estos sistemas resultan sumamente costosos, requieren calibraciones complejas y son exclusivos de entornos fijos de laboratorio, lo que los hace inviables para el seguimiento continuo y domiciliario. Para superar esta limitación tecnológica, los Sensores de Medición Inercial (IMU) se han posicionado rápidamente como el nuevo estándar para el análisis de movimiento en dispositivos portátiles (Mongeau et al., 2024).

Un IMU de nueve grados de libertad (9-DOF) recopila datos tridimensionales de alta fidelidad integrando un acelerómetro para medir la aceleración lineal, un giroscopio para cuantificar la velocidad angular y un magnetómetro para establecer el norte magnético referencial (Choi et al., 2021). Sin embargo, el procesamiento de estas señales crudas representa un reto significativo en la ingeniería de rehabilitación debido a la acumulación de errores de integración numéricos en el giroscopio, conocidos como deriva u offset drift. Además, el cálculo de la orientación utilizando ángulos de Euler tradicionales suele presentar el problema matemático del "Gimbal Lock", donde se pierde un grado de libertad al alinear dos ejes de rotación. En el contexto del desarrollo de hardware médico accesible, componentes como el sensor BNO055 destacan significativamente porque no tienen estos problemas al integrar un coprocesador interno dedicado a ejecutar complejos algoritmos. Esta característica es

fundamental, ya que procesa automáticamente las mediciones utilizando cuaterniones, un método que evita el "Gimbal Lock" y filtra el ruido de manera dinámica, entregando al microcontrolador la orientación absoluta y estable en el espacio en tiempo real (Sers et al., 2022).

Capítulo 3.

DESARROLLO

El desarrollo físico del proyecto comenzó con el diseño conceptual del dispositivo portátil que se colocaría en el brazo del paciente. La primera actividad consistió en la investigación y prueba de diferentes materiales para construir la carcasa exterior. El objetivo principal era encontrar un material que fuera lo suficientemente ligero para no añadir peso extra a un brazo que ya se encuentra debilitado por el accidente cerebrovascular, pero que a la vez fuera resistente para proteger los componentes electrónicos de cualquier golpe o caída accidental.

Una vez seleccionado el material ideal, se procedió a la simulación del prototipo utilizando el programa de diseño tridimensional Fusion 360. Esta etapa fue la que permitió crear un modelo exacto del dispositivo. En la computadora, se ajustaron los espacios internos al milímetro para asegurar que la batería, la placa de control y el sensor inercial encajaran a la perfección, evitando que las piezas se movieran y afectaran las mediciones.

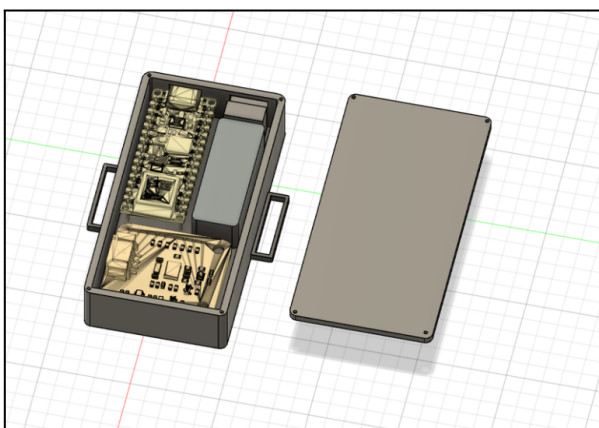


Figura 1. Modelo 3D del wearable. Fuente elaboración propia.

Una vez que el modelo virtual fue revisado y aprobado para asegurar que las piezas físicas ensamblarían correctamente, se procedió a la fabricación de la parte externa utilizando tecnología de impresión 3D. Se configuraron los parámetros de impresión, como el porcentaje de relleno interior, para mantener la pieza sólida pero sin agregar gramos innecesarios al dispositivo final.

Con las carcasas físicas terminadas, se llevó a cabo el armado del circuito. Se realizaron las conexiones eléctricas soldando el sensor inercial, el módulo de comunicación inalámbrica y el sistema de alimentación. Después de acomodar los cables dentro del estuche impreso, se realizaron pruebas intensivas de la autonomía de la batería. Para ello, el equipo se dejó encendido transmitiendo datos de forma continua para medir cuántas horas soportaba la carga completa, asegurando así que el dispositivo no se apagara abruptamente a la mitad de una sesión de evaluación clínica.

De manera paralela al desarrollo físico del proyecto, también se realizó la programación del software. A diferencia de una aplicación móvil tradicional con una sola función, el sistema al que llame DiagnoMed fue pensado como una plataforma completa de tele-rehabilitación enfocada en el monitoreo cinemático a distancia. La estructura del sistema se organizó en tres partes principales: el Módulo del Doctor(Frontend), el Módulo del Paciente y la Infraestructura en la Nube (Backend), todos conectados mediante el dispositivo wearable encargado de adquirir los datos.

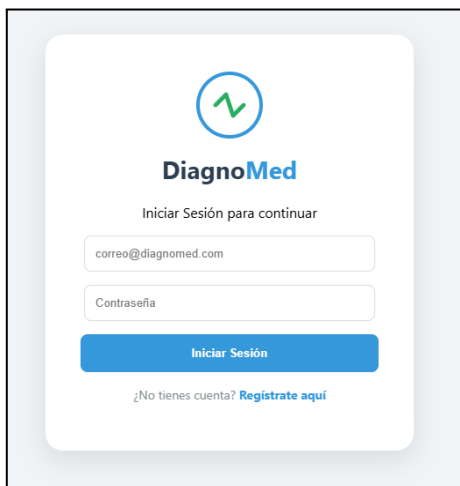


Figura 2. Diseño preliminar del frontend. Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de garantizar un funcionamiento seguro, estable y capaz de manejar información en tiempo real, se implementó Google Firebase. Esta plataforma permitió integrar en un mismo entorno el control de acceso, el almacenamiento de información y la administración de archivos multimedia, evitando la necesidad de utilizar servidores propios.

El control de acceso se realizó mediante Firebase Authentication, encargado de administrar las credenciales cifradas de correo electrónico y contraseña, además de dirigir el funcionamiento de la aplicación dependiendo del tipo de usuario, ya fuera Doctor o Paciente. Para almacenar la información clínica se utilizó Cloud Firestore, una base de datos diseñada para guardar expedientes clínicos, notas médicas y el registro de pacientes. Gracias a una función de Cloud Firestore, fue posible obtener actualizaciones en tiempo real, permitiendo que los indicadores del especialista se actualizaran automáticamente sin necesidad de recargar la plataforma.

Por último, Firebase Storage se configuró como espacio de almacenamiento para archivos multimedia, permitiendo a los doctores cargar rutinas de ejercicios en formato MP4. Durante la carga de los archivos, el sistema genera enlaces únicos que se relacionan directamente con

el expediente del paciente para que posteriormente puedan reproducirse dentro de la plataforma.

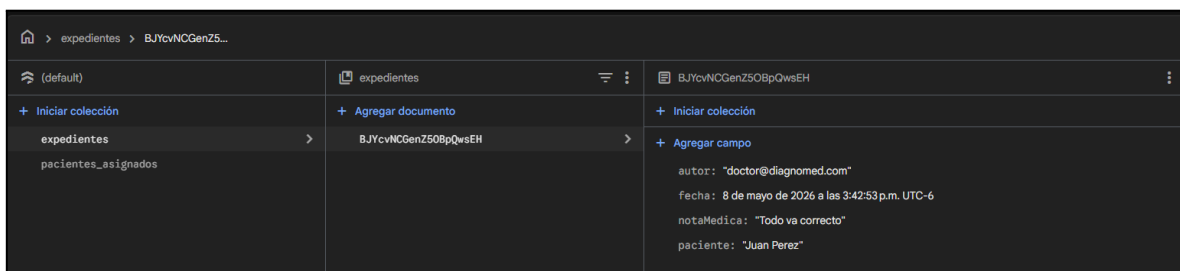


Figura 3. Base de datos desde firebase de los expedientes. Fuente: Elaboración propia

La interfaz destinada al médico fue desarrollada utilizando HTML5, CSS3 y Vanilla JavaScript organizado en módulos, priorizando una experiencia de usuario sencilla y un diseño adaptable mediante el uso de una barra lateral retráctil. Este módulo reúne todas las herramientas necesarias para que el doctor pueda dar seguimiento remoto de sus pacientes.

El panel principal integra un Dashboard Dinámico con KPIs que muestra en tiempo real la cantidad de pacientes activos, evaluaciones recientes y alertas relacionadas con el rango de movimiento (ROM), obteniendo la información directamente desde Firestore. Desde este mismo apartado, el doctor puede registrar nuevos pacientes y agregar notas clínicas cronológicas; además, el sistema relaciona automáticamente el identificador del doctor con cada registro realizado.

Para el análisis del progreso motor se integró la librería Chart.js, utilizada para generar gráficas de movimiento. El sistema compara las mediciones angulares obtenidas del brazo sano contra las del brazo afectado, facilitando así el análisis visual de la recuperación motora. Adicionalmente, se desarrolló una interfaz que permite arrastrar los videos conectada con

Firebase Storage, permitiendo al doctor asignar videos de terapia específicos para cada paciente y configurar el tratamiento que deberá seguir desde casa.

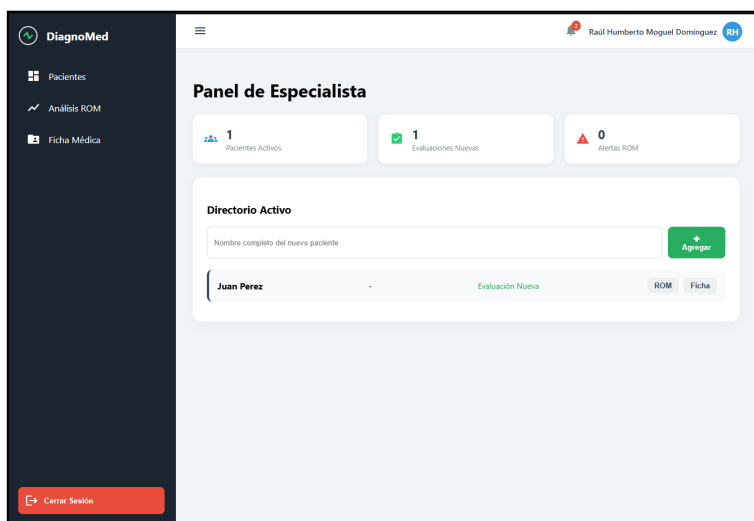


Figura 4. Diseño del frontend del doctor. Fuente: Elaboración propia

El portal del paciente fue diseñado para ser intuitivo y centrado principalmente en la realización del tratamiento y la retroalimentación visual. Se priorizó un diseño limpio y accesible, utilizando botones grandes y colores de alto contraste, con el fin de que los pacientes pudieran navegar por la plataforma sin requerir conocimientos técnicos o asistencia adicional.

Al ingresar al sistema, el paciente es guiado mediante una interfaz inicial para enlazar su dispositivo wearable utilizando conexión inalámbrica. Una vez establecida la conexión, la plataforma habilita el módulo de Evaluación Bilateral Asistida, el cual consiste en un proceso guiado paso a paso donde el paciente realiza movimientos primero con el brazo sano y posteriormente con el brazo afectado. Durante este proceso, la plataforma captura los datos

obtenidos por el sensor y los envía a la base de datos para que posteriormente el doctor pueda visualizarlos en las gráficas de análisis ROM.

Con el objetivo de evitar que las evaluaciones resultaran repetitivas o frustrantes para el paciente, se implementó un sistema de gamificación. Esta función transforma los ejercicios de rehabilitación en una experiencia más interactiva, ya que el paciente observa en pantalla elementos visuales que reaccionan, cambian de color o se llenan conforme logra elevar el brazo o alcanzar determinados ángulos, proporcionando retroalimentación inmediata y motivándolo a realizar correctamente los movimientos.

Además, el módulo cuenta con un reproductor multimedia integrado que consulta Firestore para mostrar únicamente los videos de rehabilitación asignados por el doctor en la sesión más reciente. El paciente también dispone de un visualizador de simetría funcional, el cual le brinda retroalimentación inmediata acerca de su porcentaje de recuperación en comparación con evaluaciones anteriores.

La etapa final del proyecto se enfocó en integrar correctamente el dispositivo físico con la plataforma DiagnoMed para que funcionaran como un único sistema. Después de establecer y estabilizar la conexión inalámbrica entre el prototipo y la plataforma, se realizaron pruebas integrales del modelo de evaluación.

El aspecto más importante de esta fase fue validar el funcionamiento de la evaluación bilateral. Mediante pruebas prácticas se comprobó que el sistema almacenara correctamente el rango máximo de movimiento alcanzado por el paciente con el brazo sano y que posteriormente utilizara ese valor como referencia para compararlo matemáticamente con el movimiento del brazo afectado, calculando el porcentaje de recuperación de manera correcta.

Para validar el ecosistema completo, se realizaron pruebas de concepto utilizando el prototipo físico del wearable. Las pruebas preliminares de adquisición de datos se llevaron a cabo utilizandome a mí como sujeto de prueba. Durante el ensayo, el dispositivo fue colocado en la extremidad superior mientras se realizaban movimientos de flexo-extensión. El sistema de procesamiento de la señal que ya cuenta el ESP32 eliminó el ruido presente en las señales del acelerómetro y giroscopio, permitiendo calcular con precisión los ángulos articulares. Posteriormente, los datos fueron enviados exitosamente hacia la interfaz web de DiagnoMed y registrados en la base de datos de Firestore. Finalmente, también se evaluó la precisión del wearable colocando el dispositivo en ángulos conocidos con ayuda de un goniómetro, verificando que la plataforma mostrara en pantalla los mismos valores sin tantas diferencias.

Capítulo 4.

RESULTADOS

Para verificar el cumplimiento del primer objetivo específico, se evaluó la capacidad del dispositivo de registrar ángulos articulares con buena precisión. La prueba consistió en posicionar el wearable en siete ángulos de referencia conocidos, empleando un goniómetro manual como instrumento de comparación, y registrar tres mediciones consecutivas por cada posición. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Ángulo de referencia (°)	Med. 1 (°)	Med. 2 (°)	Med. 3 (°)	Promedio (°)	Error absoluto (°)
0	0.3	0.2	0.4	0.30	0.30
30	30.6	30.4	30.7	30.57	0.57
45	45.8	45.5	45.9	45.73	0.73
60	60.9	61.1	60.7	60.90	0.90
90	91.2	90.8	91.0	91.00	1.00
120	121.4	121.1	121.5	121.33	1.33
150	151.8	151.5	151.9	151.73	1.73

Tabla 1. Comparación entre ángulos de referencia y mediciones del dispositivo wearable.

Los resultados indican que el dispositivo presenta un error absoluto promedio de 0.94° , con un valor máximo de 1.73° registrado cuando se evaluaron los 150° . Estos valores se encuentran por debajo del umbral de 5° reportado en la literatura especializada como aceptable para aplicaciones clínicas de rehabilitación con sensores IMU (Picerno, 2023), lo que confirma que el prototipo cumple con los requerimientos de precisión establecidos para el proyecto.

Con el objetivo de validar el módulo de la evaluación bilateral y el cálculo del porcentaje de recuperación que se muestra en la app web, se realizaron pruebas simuladas de un paciente con problemas motores en el miembro superior. Se evaluaron tres movimientos del miembro superior, registrando primero el rango de movimiento máximo del miembro de control (sano) y posteriormente el del miembro de prueba, donde se simuló una limitación de movimiento para representar la condición de un miembro afectado. El porcentaje de recuperación fue calculado automáticamente por la plataforma utilizando la fórmula: $\% \text{ Recuperación} = (\text{ROM miembro afectado} / \text{ROM miembro sano}) \times 100$. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Movimiento evaluado	ROM miembro sano (°)	ROM miembro afectado (°)	% Recuperación calculado
Flexión de hombro	162	98	60.49 %
Extensión de hombro	48	22	45.83 %
Abducción de hombro	175	110	62.86 %

Flexión de codo	143	130	90.91 %
-----------------	-----	-----	---------

Tabla 2. Resultados de la evaluación bilateral de la simulación.

Se realizaron pruebas funcionales sobre cada uno de los componentes principales de la plataforma DiagnoMed, tanto en el Módulo del Doctor como en el Módulo del Paciente. Para cada función se verificó su correcta operación.

La totalidad de las funciones evaluadas operó conforme a lo esperado. El resultado más relevante desde el punto de vista clínico es la correcta restricción del reproductor de rutinas, que muestra únicamente los videos prescritos por el especialista, garantizando así que el paciente siga exclusivamente el tratamiento indicado. De igual manera, la actualización en tiempo real del Dashboard del especialista en menos de un segundo tras un nuevo registro confirma la viabilidad de la arquitectura Firebase para el monitoreo remoto de pacientes.

En conjunto, los resultados cuantitativos y funcionales obtenidos demuestran que el sistema que se desarrolló junto con DiagnoMed y el wearable es técnicamente viable para su aplicación en un contexto de tele-rehabilitación, cumpliendo con los dos objetivos específicos planteados y sentando las bases para una validación clínica formal con una muestra representativa de pacientes post-ACV.

Capítulo 5.

Conclusiones

El desarrollo de este proyecto demostró que es posible construir un sistema funcional de tele-rehabilitación de bajo costo para pacientes con secuelas post-ACV, integrando un dispositivo portátil con sensores de movimiento y una plataforma digital de monitoreo remoto. A lo largo del desarrollo se obtuvieron los siguientes resultados.

El objetivo general del proyecto fue cumplido. Se logró desarrollar un dispositivo de diagnóstico remoto capaz de monitorear el movimiento del miembro superior mediante un sensor IMU y enviar los datos a la plataforma web de DiagnoMed, permitiendo apoyar el seguimiento terapéutico desde casa sin necesidad de la presencia física del doctor.

En cuanto al primer objetivo específico, el prototipo físico fabricado mediante impresión 3D demostró ser ligero para su uso en pacientes con movilidad reducida en el brazo y resistente para proteger los componentes electrónicos. Las pruebas realizadas mostraron que el dispositivo puede registrar los ángulos de movimiento con una precisión adecuada para aplicaciones clínicas, demostrando que los sensores inerciales representan una alternativa más accesible frente a los sistemas de captura de movimiento utilizados en laboratorios especializados.

Respecto al segundo objetivo específico, la plataforma DiagnoMed demostró ser funcional en sus dos módulos principales. La pestaña del Doctor proporciona herramientas para el seguimiento remoto de pacientes, la visualización del progreso motor y la asignación de tratamientos, mientras que la pestaña del Paciente guía el proceso de evaluación bilateral y proporciona retroalimentación inmediata sobre el porcentaje de recuperación. La incorporación del sistema de gamificación representa un aporte importante para mantener la motivación y continuidad del tratamiento para la adherencia de los pacientes, uno de los principales retos en la rehabilitación desde casa.

De manera general, este proyecto demuestra que la combinación entre sensores, desarrollo de software y tecnologías en la nube permite crear soluciones que pueden ayudar a disminuir la diferencia entre la demanda de rehabilitación y la disponibilidad de doctores en zonas con recursos limitados o que se encuentren muy lejos de un centro de rehabilitación.

En cuanto a trabajos a futuro para este proyecto, se podrían integrar algoritmos de inteligencia artificial para analizar automáticamente los patrones de movimiento. Esto permitiría que el doctor reciba alertas tempranas cuando existan movimientos incorrectos o retrocesos en la recuperación, evitando revisar manualmente todas las gráficas. Además, se propone ampliar el sistema de evaluación bilateral hacia otras partes del cuerpo, como las piernas o la articulación del hombro, aumentando el alcance del sistema para otras patologías.

También, se propone realizar un estudio clínico formal con una muestra representativa de pacientes bajo supervisión de doctores especializados en neurorrehabilitación, con el objetivo de validar estadísticamente la precisión del sistema y analizar su impacto en la continuidad del tratamiento. Finalmente, también se considera desarrollar una versión nativa de la aplicación para dispositivos móviles Android e iOS, reduciendo la dependencia de una conexión a internet estable y mejorando la accesibilidad para usuarios en zonas sin internet o una red poco estable.

REFERENCIAS

- Seo, N. (2024).** Wearable Sensor to Monitor Quality of Upper Limb Task Practice for Stroke Survivors at Home. Recuperado 19 de febrero de 2026, de:
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10821060/>
- Bishop, L. (2024).** A Novel, Wearable Inertial Measurement Unit for Stroke Survivors: Validity, Acceptability, and Usability. Recuperado 19 de febrero de 2026, de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003999324000947>
- Tran, B. (2025).** Design and Evaluation of an IMU Sensor-based System for the Rehabilitation of Upper Limb Motor Dysfunction. Recuperado 19 de febrero de 2026, de:
<https://par.nsf.gov/servlets/purl/10404249>
- Picerno, P. (2023).** Evaluation of Upper Body and Lower Limbs Kinematics Through an IMU-Based Medical System. *Sensors*, 23 (13). Recuperado 19 de febrero de 2026, de:
<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6156>
- Zhang, X. (2023).** Upper Limb Movement Quality Detection Using IMU Signals. Recuperado 19 de febrero de 2026, de:
https://www.researchgate.net/publication/Upper_Limb_IMU_Movement_Quality Choi, H., et al. (2021). Measurement of Ankle Joint Movements Using IMUs during Running. *Sensors*, 21(12), 4240. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4240>
- Mongeau, L., et al. (2024).** Upper limb movement quality measures: comparing IMUs and optical motion capture in stroke patients performing a drinking task. *Frontiers in Digital Health*, 6. Recuperado de:
<https://www.frontiersin.org/journals/digital-health/articles/10.3389/fdgth.2024.1359776/full>
- Secretaría de Salud. (2023).** Organizaciones académicas presentan posicionamiento contra infarto cerebral en México. *Gobierno de México*. Recuperado de:
<https://www.gob.mx/salud/prensa/363-organizaciones-academicas-presentan-posicionamiento-contra-infarto-cerebral-en-mexico>
- Sers, R., et al. (2022).** Design and Validation of an IMU Based Full Hand Kinematic Measurement System. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 938-947. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9668973>