

<https://dx.doi.org/10.17488/RMIB.46.SI-TAIH.1523>

E-LOCATION ID: e1523

Prototipo: Sistema robótico elevado con tres grados de libertad para rehabilitación de cadera controlado por sistemas embebidos

Prototype: Elevated robotic system with three degrees of freedom for hip rehabilitation controlled by embedded systems.

Héctor Miguel Buenabad Arias¹  Antonio Isaías Martínez Santos¹  Andrés Blanco Ortega²  
Miguel Ángel Basurto Pensado¹  Diego Hernández Cabrera¹ 

¹Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas - Universidad Autónoma del Estado de Morelos - Morelos, México

²Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - Tecnológico Nacional de México - Morelos, México

RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo de sistema robótico que permite movimientos en ejes X-Y-Z desde una posición elevada sobre el paciente, diseñado específicamente para la rehabilitación de cadera. El sistema, controlado por sistemas embebidos, proporciona un control preciso y adaptable a las necesidades individuales del paciente a lo largo del proceso de rehabilitación. La estructura del robot permite movimientos controlados y ajustables, promoviendo la futura integración de rutinas, y ejercicios que imiten el rango de movimiento natural de la cadera. Además, el sistema ha sido optimizado para ser intuitivo, garantizando eficiencia tanto al paciente como para el profesional de la salud, facilitando así la rehabilitación y mejorando los resultados funcionales.

PALABRAS CLAVE: ingeniería, rehabilitación, robótica, sistemas embebidos, terapia.

ABSTRACT

This article presents the development of a prototype robotic system that allows movements in X-Y-Z axes from an elevated position on the patient, designed specifically for hip rehabilitation. The system, controlled by embedded systems, provides precise and adaptable control to the individual needs of the patient during the rehabilitation process. The structure of the robot allows controlled and adjustable movements, promoting the future integration of routines and exercises that mimic the natural range of motion of the hip. In addition, the system is optimized to be intuitive, ensuring efficiency for both the patient and the healthcare professional, facilitating rehabilitation and improving functional outcomes.

KEYWORDS: embedded systems, engineering, rehabilitation, robotics, therapy.

Autor de correspondencia

DESTINATARIO: Andrés Blanco Ortega

INSTITUCIÓN: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO - TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO - MORELOS, MÉXICO

DOMICILIO: Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
Cuernavaca, Morelos, México C.P. 62490

EMAIL: andres.bo@cenidet.tecnm.mx

Received:

15 de Febrero 2025

Accepted:

28 de Abril 2025

Published:

19 de Diciembre 2025

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la rehabilitación de los miembros inferiores se ha convertido en un campo crítico dentro de la medicina y fisioterapia, abarcando desde lesiones y cirugías hasta enfermedades que afectan la funcionalidad motriz. Esta tendencia ha incrementado la demanda de tratamientos eficaces y accesibles para recuperar funcionalidad y calidad de vida.

Desde la ingeniería, se han desarrollado soluciones innovadoras basadas en técnicas multidisciplinarias, entre incluyendo la robótica, el control automático y la inteligencia artificial. Los dispositivos para rehabilitación están diseñados para acompañar y asistir al paciente progresivamente, facilitando ejercicios para su recuperación.

La incorporación de dispositivos en favor de la rehabilitación ha permitido incorporar la simultaneidad de pacientes, manejo y tratamiento remoto, mejor control sobre las actividades realizadas, así como la recopilación para la evaluación objetiva del rendimiento de los tratamientos aplicados. ^[1]

Tecnología en la rehabilitación

La aplicación de la ingeniería dentro de la rehabilitación tiene una larga historia, sin embargo, se ha presentado un fuerte crecimiento de desarrollo de dispositivos para ello en las últimas décadas, debido a la necesidad, mejora de productividad y rendimiento que se reflejan en su desempeño al aplicarse estas actividades en la recuperación del individuo. ^[2]

La tecnología se ha encargado de transformar significativamente el campo de la rehabilitación, proporcionando a la sociedad herramientas que incrementan la eficacia de los tratamientos. Las soluciones tecnológicas han permitido a los profesionales de la salud implementar enfoques y rehabilitación más personalizada a cada paciente, desde equipos de terapia automatizados, hasta dispositivos portátiles, actuando de manera pasiva o activa para el beneficio de la persona ^[1].

Dentro de las metas más importantes dentro del campo de la rehabilitación e ingeniería es desarrollar e implementar tecnologías que puedan ser manejadas de manera sencilla y accesible por ingenieros, fisioterapeutas, personal clínico e inclusive por el paciente en turno ^[3].

La tecnología se encuentra revolucionando campos como este, ofreciendo métodos cada vez más optimizados y eficaces para la recuperación de las personas, lo que ayuda a la motivación del paciente, además de mantener un enfoque científico apoyado de los datos recopilados.

Beneficios de la tecnología en la rehabilitación

La integración de tecnologías como la robótica, los sistemas embebidos y la automatización en procesos de rehabilitación genera numerosos beneficios de alto impacto en los profesionales de la salud, así como en los pacientes, siendo adaptables, personalizables y cómodos para ambas partes. La posibilidad de ajustar los parámetros de rehabilitación a las necesidades específicas de cada paciente no solo mejora la experiencia terapéutica, sino que también fomenta una mayor adherencia al tratamiento. Esto fomenta un compromiso sostenido por parte del paciente, aumentando su motivación y constancia, factores clave para el éxito del proceso de recuperación ^[4].

Además de la personalización del tratamiento, la implementación de tecnologías incrementa la precisión y eficiencia en la ejecución de las sesiones terapéuticas, los sistemas de control automático y las metodologías de monitoreo han evolucionado para ofrecer mediciones cada vez más exactas en tiempo real, lo que permite evaluar de manera objetiva el desempeño del paciente. La retroalimentación optimiza la toma de decisiones clínicas, además de facilitar la detección temprana de posibles complicaciones o desviaciones en el proceso de rehabilitación ^[5].

Desde una perspectiva operativa, la automatización de ciertos procedimientos terapéuticos maximiza la productividad de los profesionales de la salud al reducir la carga de trabajo repetitivo y optimizar el tiempo de terapia efectiva. Esto no solo mejora la eficiencia en la atención clínica, sino que también contribuye a una reducción de costos a largo plazo, al disminuir la necesidad de sesiones prolongadas o intervenciones adicionales ^[6].

Finalmente, el desarrollo de tecnologías accesibles y de fácil implementación ha permitido que un mayor número de personas pueda beneficiarse de tratamientos avanzados, mejorando la calidad de vida de los pacientes ^{[4],[5]}. Con estos avances, la rehabilitación asistida por tecnología se posiciona como un campo en constante evolución, con el potencial de transformar significativamente la manera en que se abordan los procesos de recuperación funcional.

Robótica para la rehabilitación de cadera

El uso de robots en el ámbito de la rehabilitación ha tenido un incremento en su aplicación como herramienta para mejorar los tratamientos dirigidos a pacientes con afecciones de la cadera. Estos sistemas permiten realizar ejercicios controlados, personalizados y repetitivos, facilitando la recuperación motriz y reduciendo la carga física del terapeuta. Diversos desarrollos han abordado esta problemática desde distintas perspectivas, diseñando dispositivos adaptados a las necesidades específicas de cada paciente.

Uno de los enfoques destacados es el diseño de plataformas robóticas que asisten en la movilidad de las extremidades inferiores. Un ejemplo de ello es la propuesta de una plataforma robótica para niños con parálisis cerebral ^[7], diseñada para ayudar en el descubrimiento del proceso de caminar. Aunque su aplicación no está enfocada específicamente en la cadera, demuestra la viabilidad del uso de robots en la rehabilitación motriz y su impacto en la recuperación funcional.

Por otro lado, algunos trabajos han centrado su atención en la rehabilitación de fracturas de cadera en adultos y adultos mayores. En ^[8] se presenta el rediseño de un andador robótico, tomando como referencia la experiencia clínica, de esta forma, se optimiza la estructura y funcionalidad para mejorar la recuperación tras una fractura de cadera. De manera complementaria, en ^[9], se desarrolla una plataforma específica para rehabilitación del mismo tipo de fractura, especificando su uso en adultos mayores, lo que permite generar ejercicios específicos precisos y adaptativos para este grupo poblacional.

Otro enfoque relevante dentro de la rehabilitación robótica es el uso de exoesqueletos para asistencia en la movilidad. En ^[10], se detalla el diseño y control de un prototipo de exoesqueleto orientado a la realización de movimientos de forma fácil y natural para personas con movilidad de cadera reducida. Este tipo de dispositivos facilita la readaptación motriz y ofrece una mayor precisión en el monitoreo del progreso del paciente.

Estos avances evidencian la creciente aplicación de la robótica en la rehabilitación de cadera y la movilidad en

general, lo que respalda la importancia de continuar desarrollando sistemas innovadores que permitan una recuperación más efectiva y accesible para los pacientes.

Aplicación de IoT en rehabilitación

El Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado el sector de la salud al permitir la conexión y el monitoreo remoto de dispositivos médicos, facilitando la recopilación y análisis de datos en tiempo real. En el ámbito de la rehabilitación. La integración de sistemas IoT con dispositivos robóticos y sensores ha permitido el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de personalizar terapias, optimizar el seguimiento del progreso del paciente y mejorar la eficiencia de los tratamientos.

Uno de los enfoques más innovadores en este campo es la combinación de IoT con inteligencia artificial (IA) para el desarrollo de exoesqueletos inteligentes, como se describe en ^[11], donde se propone un sistema basado en estas tecnologías para la rehabilitación de personas con parálisis. Este tipo de soluciones permite adaptar la terapia a cada paciente mediante la recopilación de datos en tiempo real y el ajuste automático de los parámetros del dispositivo. Continuando con el trabajo ^[12], en el cual se diseña y desarrolla una solución robótica inteligente basada en IoT para la rehabilitación de muñeca. Este sistema permite a los especialistas monitorear, estimar y recabar información para determinar el estado de los músculos lesionados.

Desde una perspectiva más general, en el trabajo ^[13] se presenta una visión sobre el impacto de los sistemas IoT en la rehabilitación y la atención médica, destacando su papel en la automatización de tratamientos y la mejora en la recopilación de datos clínicos para la toma de decisiones basada en evidencia. Asimismo, en ^[14], se introduce un prototipo basado en IoT para el monitoreo de rehabilitación, evidenciando el avance que se logra con estas tecnologías puede optimizar la supervisión de los pacientes.

Estos estudios demuestran el potencial de las tecnologías IoT en la rehabilitación, permitiendo un seguimiento más preciso, una mayor personalización de las terapias y una optimización del tiempo y recursos de los profesionales de la salud. La integración de estas tecnologías en dispositivos de rehabilitación no solo mejora la calidad del tratamiento, sino que también promueve el acceso a terapias más efectivas y accesibles para los pacientes.

Control de actuadores para dispositivos de rehabilitación

El uso de actuadores, como motores paso a paso (*stepermotors*) y servomotores, es fundamental en la robótica de rehabilitación, ya que permite controlar de manera precisa los movimientos y esfuerzos aplicados en el paciente. A diferencia de otros tipos de actuadores, estos dispositivos ofrecen una respuesta rápida, estabilidad y capacidad de repetición, características esenciales en terapias asistidas por robots.

En ^[15], se realiza un análisis de dispositivos robóticos utilizados en rehabilitación pediátrica, destacando la importancia de los actuadores en el diseño de estos sistemas. Los motores de precisión permiten desarrollar dispositivos capaces de asistir en el movimiento del paciente sin comprometer su seguridad, ajustando dinámicamente la intensidad y el rango de movimiento según las necesidades del usuario.

Desde un enfoque más técnico, en ^[16], se presenta el modelo y control de un actuador electroadhesivo inteligente, con aplicaciones potenciales en rehabilitación. Este estudio demuestra la manera en que el uso de técnicas avanza-

das de control puede optimizar la interacción entre el dispositivo y el usuario, mejorando la precisión y la adaptabilidad del sistema.

Por otro lado, en ^[17], se describe el diseño de un actuador con dos grados de libertad para aplicaciones en robótica de rehabilitación. Este tipo de desarrollos es crucial para la creación de dispositivos que requieran movimientos complejos y coordinados, como los necesarios en la rehabilitación de cadera. De manera complementaria, en ^[18], se aborda el impacto de la pandemia en el desarrollo de actuadores y sensores para rehabilitación robótica, resaltando los avances recientes en el control y la eficiencia de estos sistemas.

Estos estudios evidencian la relevancia de los motores de alta precisión en la rehabilitación robótica, proporcionando soluciones más eficaces y seguras para los pacientes. La integración de técnicas de control avanzadas en estos actuadores representa un paso clave hacia la mejora de los dispositivos de asistencia, permitiendo terapias más eficientes y adaptativas.

Sistemas embebidos dentro de rehabilitadores

Los sistemas embebidos han tenido un crecimiento exponencial en múltiples áreas de la tecnología, desempeñando un papel crucial en aplicaciones como lo es el área de rehabilitación, permitiendo la creación de dispositivos con alta capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y gran versatilidad en los entornos que se pueden presentar (clínicos) o terapéuticos ^[19,20]. Estos sistemas integran *hardware* y *software* en plataformas diseñadas específicamente para funciones dedicadas, optimizando la automatización y el control en distintos procedimientos.

En el ámbito de la rehabilitación física, los sistemas embebidos permiten el diseñar e implementar dispositivos robóticos avanzados que asisten y supervisan al paciente durante la terapia. A través de la incorporación de sensores y actuadores, estos sistemas facilitan la captura y procesamiento de datos en tiempo real, lo que posibilita una evaluación cuantitativa de parámetros biomecánicos, como lo son el rango de movimiento, fuerza ejercida o coordinación motriz ^[20,21]. Esta capacidad de monitoreo continuo permite la adaptación dinámica de los protocolos de rehabilitación, ajustando la terapia de acuerdo a las necesidades individuales en cada paciente, optimizando así los resultados clínicos ^[22].

Añadiendo que, el empleo de algoritmos de control y tecnologías emergentes, como lo es la inteligencia artificial, ha favorecido el desarrollo de estrategias de rehabilitación más precisas y personalizadas. La implementación de modelos basados en aprendizaje automático ha permitido mejorar la eficacia de los tratamientos, proporcionando a los profesionales de la salud herramientas avanzadas para la toma de decisiones fundamentadas en datos objetivos ^[23].

Este tipo de tecnologías no solo mejoran la adherencia al tratamiento y la motivación del paciente, sino que también favorecen la recopilación de información clínica de alta precisión, contribuyendo al desarrollo de enfoques terapéuticos basados en evidencia científica ^[24].

Dentro de los avances que se han logrado con los sistemas embebidos es su capacidad para implementar controles biocooperativos en dispositivos médicos. En ^[25], se presenta una plataforma embebida versátil diseñada para la rehabilitación neuromotora del miembro superior, la cual permite la implementación de algoritmos de control avan-

zados que se adaptan a la respuesta del paciente en tiempo real. Este enfoque no solo mejora la precisión del dispositivo, sino que también optimiza la interacción entre el paciente y la máquina, aumentando la efectividad del tratamiento.

La capacidad de los sistemas embebidos para realizar procesamiento de datos en tiempo real también ha sido aplicada en dispositivos de rehabilitación, como en ^[26], donde se describe un exoesqueleto de mano, con un control embebido basado en señales electromiográficas (EMG), lo que permite reconocer gestos y movimientos en tiempo real para mejorar la rehabilitación bilateral; este estudio demuestra la integración entre sensores avanzados y sistemas embebidos para interpretar señales musculares y ajustar dinámicamente la terapia según la necesidad del paciente.

Centrándose en el campo de la rehabilitación de miembros inferiores, los sistemas embebidos han sido utilizados en combinación con sensores de movimiento para mejorar la precisión en la evaluación de la terapia. Según el trabajo ^[27], se estudia el uso de sensores para el reconocimiento del ángulo de la rodilla en soluciones de rehabilitación muscular, demostrando la efectividad de estas tecnologías para capturar y analizar datos biomecánicos con alta precisión. Este tipo de integración es clave para proporcionar retroalimentación en tiempo real y ajustar dinámicamente los ejercicios según la evolución del paciente.

Además de su aplicación en la recolección de datos y control de movimiento, los sistemas embebidos también han sido fundamentales para el desarrollo de robots de rehabilitación de bajo costo, como se menciona en ^[28], donde se propone un robot de muñeca de tres grados de libertad basado en una arquitectura embebida que permite un alto nivel de interacción humano robot, facilitando ejercicios de terapia con un diseño accesible. De esta manera, se evidencia la importancia de los sistemas embebidos para hacer que las tecnologías de rehabilitación sean más asequibles y escalables.

Trabajos relacionados

a) Dentro de los trabajos relacionados podemos mencionar publicaciones como ^[29] de título “*Compliant actuation of rehabilitation robots*” donde se aborda la actuación de dispositivos de componente elástico, donde se aborda el robot LOPES para encontrar sus ventajas y contras, aplicando controladores de impedancia para una relación fuerza - posición, así como control basado en pasividad, además de como son los resultados experimentales frente a sujetos de prueba, obteniendo una revisión y descripción de mapeos de mejora para este tipo de dispositivos.

Entre las limitaciones identificadas se encuentra la dificultad de adaptabilidad entre sujetos de prueba y restricciones en la elasticidad de los componentes, encontrando esto último como la mayor afectación para su controlador y con ello, el resultado de la terapia.

b) Como segundo trabajo a mencionar, encontramos la publicación ^[30], bajo el nombre de “*Soft Actuators and Robotic Devices for Rehabilitation and Assistance*” en donde se abordan temas de dispositivos de adquisición de datos, así como actuadores que han sido incorporados a este tipo de tecnologías, agregando elementos que podrían ser incorporados generando avances dentro del campo.

El trabajo mencionado aborda sistemas neumáticos y sistemas hidráulicos para la actuación, control y aplicación de

fuerzas, excluyendo sistemas electromecánicos, embebidos e IoT, que son el foco de este artículo.

c) Otra literatura que también abarca los sistemas de rehabilitación desde un punto de vista tecnológico es [31], en el capítulo titulado “*Actuation for robot-aided rehabilitation: Design and control strategies*”, donde se encargan de mencionar y presentar distintas opciones de motores y actuadores que podrían ser utilizadas dentro de este tipo de dispositivos, así como la implementación de controladores para el manejo de los mismos, aunque también se centran en el control de impedancia y una revisión a manera matemática para su comprensión basada en modelos no lineales, lo que puede complicar la lectura si no se cuentan con conocimientos o bases en ello. Debido a esto, se plantea el cuerpo de este artículo con una finalidad de aplicación mediante tecnologías IoT y actuadores electrónicos, separándonos de la actual literatura mencionada.

Justificación

A partir de las observaciones y comentarios recopilados en centros de terapia física, así como de experiencias reportadas por pacientes con afecciones en la cadera, se ha identificado que, a pesar de la experiencia del personal terapéutico, persisten ciertas limitaciones en la rehabilitación manual. Entre estas, destacan la falta de un control preciso y de retroalimentación en tiempo real durante las sesiones, lo que puede derivar en esfuerzos inadecuados y potenciales riesgos para el paciente. Asimismo, la fatiga física del terapeuta, producto de la repetición constante de movimientos, puede comprometer la calidad y uniformidad del tratamiento.

Por otro lado, los dispositivos de rehabilitación asistida disponibles en el mercado presentan costos de adquisición y mantenimiento muy elevados, lo que representa una barrera significativa para muchos centros de rehabilitación, limitando el acceso a este tipo de tecnologías. Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas más accesibles, eficientes y seguras, que contribuyan a mejorar la calidad del tratamiento y optimicen los recursos disponibles en las instituciones de salud.

El objetivo general de este proyecto es el desarrollo de un dispositivo rehabilitador de cadera mediante sistemas embebidos, apoyados de las herramientas IoT y sistemas *Open Source* para poder manipular y contener un control en todo momento de la terapia, junto con la utilización de actuadores de torque con sistemas de retroalimentación para poder confiar en una terapia segura y confiable. Además de ser motivados gracias a lo revisado en estados de arte y mencionado en la introducción del presente documento, donde se menciona que la utilización de la tecnología en etapas de rehabilitación genera una mayor adherencia al proceso, lo cual genera un mayor ímpetu por parte del paciente y con ello, un mejor resultado de recuperación, así como apoyarlo a sobrellevar este tipo de situaciones difíciles.

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un sistema robótico elevado con tres grados de libertad para la rehabilitación de cadera, basado en sistemas embebidos e integrado con herramientas de Internet de las Cosas (IoT) y software de código abierto (*Open Source*). La implementación de actuadores de torque con sistemas de retroalimentación permitirá garantizar un control preciso y seguro de la terapia, minimizando el riesgo de lesiones y maximizando la efectividad del tratamiento.

El diseño y programación del dispositivo se llevará a cabo mediante lenguajes y plataformas *Open Source*, lo que no solo reducirá significativamente costos asociados al desarrollo y mantenimiento del sistema, sino que también

evitará la dependencia de licencias comerciales. Adicionalmente, la compatibilidad con protocolos de comunicación inalámbrica (*Wifi* y *Bluetooth Low Energy*) permitirá la interoperabilidad con otros dispositivos, asegurando una trasmisión de datos eficiente, confiable y sin perdidas, lo cual es fundamental para el monitoreo y seguridad tanto del usuario como del operador.

Finalmente, este enfoque tecnológico favorecerá la escalabilidad del sistema sin depender de terceros, permitiendo futuras actualizaciones y adaptaciones conforme a las necesidades clínicas y tecnológicas. De acuerdo con el estado del arte y los antecedentes expuestos en la introducción, la incorporación de tecnología en los procesos de rehabilitación no solo mejora la adherencia del paciente al tratamiento, sino que también incrementa su motivación y compromiso, obteniendo una recuperación más efectiva y en una mejor calidad de vida.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta una descripción de cada etapa del dispositivo, en el orden en que se realiza la especificación de datos, envío, interpretación y actuación de elementos electromecánicos, para poder llevar a cabo el proceso de la rehabilitación en la persona. Se muestra un diagrama para hacer más entendible el proceso (Ver Figura 1).

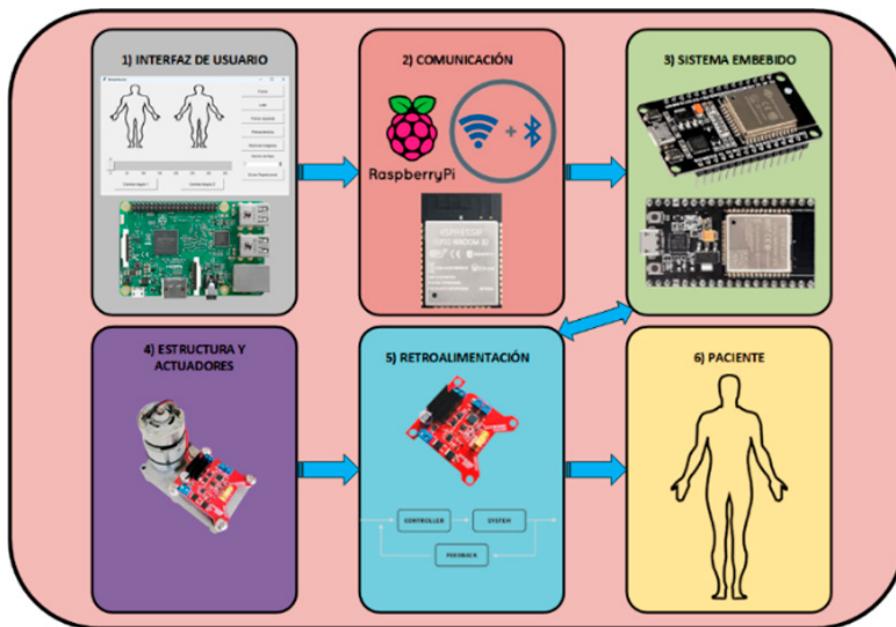


FIGURA 1. Diagrama de bloques del dispositivo.

Interfaz de Usuario

La estructuración, funcionamiento y visualización de una interfaz para poder manipular el dispositivo de manera sencilla, se encuentra completamente en el lenguaje *Python*, desarrollada con ayuda de la librería *Tkinter* (Ver Figura 2), nos habilita la creación de elementos interactivos que permiten un control táctil, gracias a la pantalla *touch* con la que se cuenta, reduciendo la utilización de elementos como un *mouse*, y dándonos la accesibilidad a manipular el dispositivo para que al encender, directamente se ejecute el programa. Detrás de la interfaz, se encuentra un intérprete para las interacciones en cada botón, mediante rutinas, nos permite generar un conjunto de acciones para automatizar las actividades durante la terapia, según se requiera, manteniendo una gestión de instruccio-

nes secuencial.

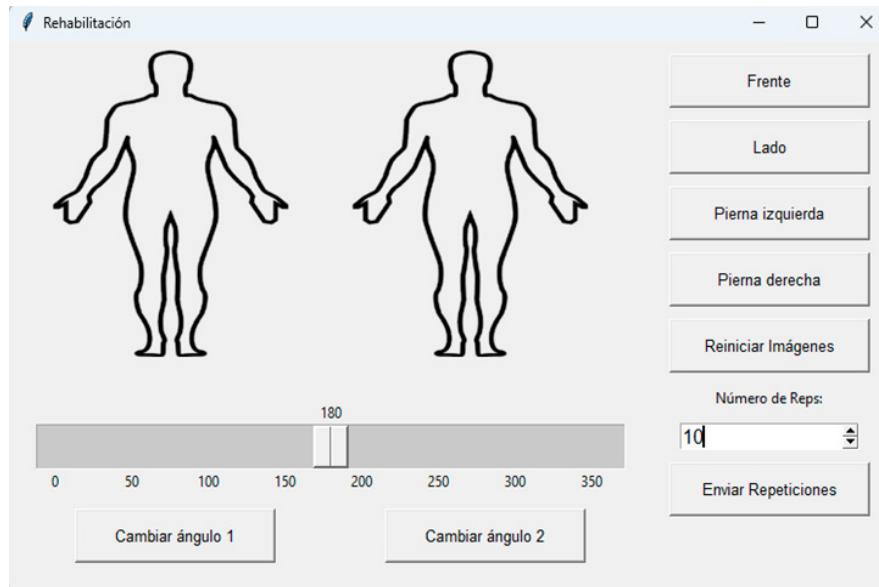


FIGURA 2. Interfaz para interactuar.

Comunicación

Para esta división del proyecto, gracias a los sistemas embebidos con los que contamos, podemos comunicarlos con interoperabilidad mediante dos elementos fiables, según sea el entorno a realizarse la terapia, como lo son TCP - IP y conexión *Bluetooth* de Bajo Consumo (Ver Figura 3).

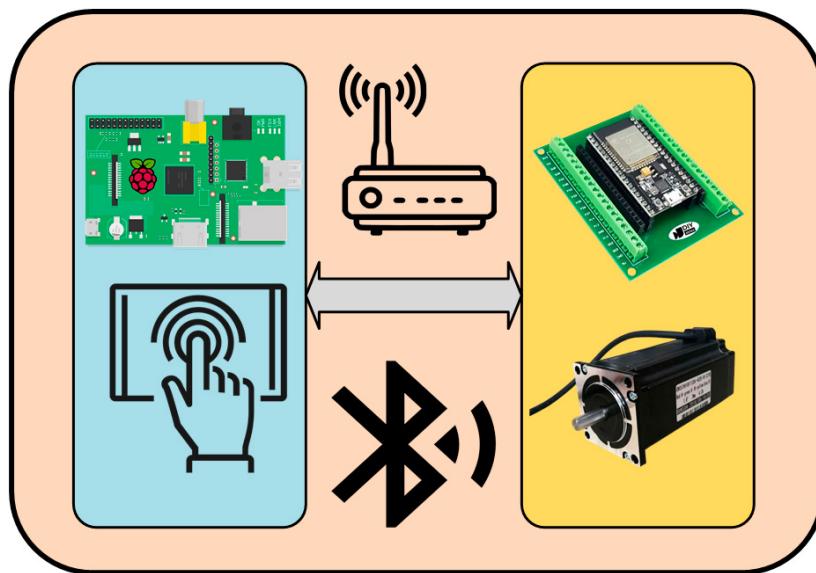


FIGURA 3. Diagrama de bloques de la comunicación.

La elección de TCP/IP y *Bluetooth Low Energy* (BLE) sobre otros protocolos de comunicación responde a la necesidad de garantizar fiabilidad, seguridad y eficiencia en la transmisión de datos.

El protocolo TCP/IP permite una comunicación directa y estructurada, asegurando que cada paquete de datos llegue a su destino con integridad, gracias a su mecanismo de confirmación y reenvío. Al establecer una IP y puerto específicos, se logra un canal de comunicación seguro y direccionado, reduciendo la vulnerabilidad ante interferencias o accesos no autorizados.

Por otro lado, BLE se eligió por su bajo consumo energético y su capacidad para mantener una conexión estable y segura, mediante el uso de identificadores únicos (UUIDs) para cada dispositivo. Además, ambos protocolos manejan mecanismo de cifrado y autenticación, lo que minimiza el riesgo de ataques como el secuestro de sesión o la corrupción de datos.

Un beneficio adicional de estos protocolos es su capacidad de empaquetado y validación de datos, lo que previene pérdidas de información y asegura que la transmisión sea eficiente incluso en entornos con ruido electromagnético. Esta combinación garantiza una comunicación robusta, segura y adaptable a los requerimientos del sistema.

Sistema embebido

Para la elección de la plataforma embebida, se comenzó con la idea de un elemento de bajo costo, con capacidad de producir salidas de modulación por ancho de pulso, una velocidad de trabajo alta para mantener una comunicación y manipulación de datos eficiente, además de poder procesar controladores discretizados para una ejecución segura.

Dado estos puntos, se optó por el sistema embebido ESP32, fundamentado en un balance óptimo entre rendimiento, costo y capacidades de conectividad, en comparación con alternativas como *Raspberry Pi* o *Jetson Nano*. Aunque estas últimas ofrecen mayor poder de cómputo, su costo significativamente más alto las vuelve menos accesibles para aplicaciones donde la eficiencia y la integración embebida son primordiales.

El ESP32 cuenta con un procesador de doble núcleo a 240MHz, lo que proporciona suficiente capacidad de procesamiento para manejar tareas en tiempo real, control de motores y adquisición de datos sin necesidad de un sistema operativo robusto. Además, destaca por su versatilidad de los GPIOs, permitiendo el uso de múltiples pines PWM, ADC y DAC, lo cual es esencial para controlar actuadores y sensores de manera eficiente.

Otro factor clave es su conectividad integrada WiFi y Bluetooth Low Energy (BLE), eliminando la necesidad de módulos externos y simplificando la arquitectura del sistema. Esta combinación de características hace del ESP32 una opción ideal para aplicaciones embebidas donde se requiere bajo consumo de energía, conectividad inalámbrica confiable y un costo reducido.

Una vez recibida la instrucción desde la interfaz, la placa se encarga de realizar una inspección de tamaño del dato, para manejo de errores, una vez confirmada la longitud adecuada, se procede a interpretar mediante una segmentación de los caracteres dentro del mensaje, y estos proceden a ser asignados a funciones, selección del motor a mover, velocidades, posiciones o ancho de pulso. Agregando la parte de rutinas preestablecidas con interpretación del código G, en donde, mediante la interpretación por extracción de subcadenas y operaciones matemáticas simples, podemos lograr llegar a la posición deseada siguiendo el formato ocupado por otras máquinas tipo CNC o impresoras, logrando movimientos precisos, añadiéndole un sistema PID Discretizado para poder generar un mejor control dentro de la suavidad del movimiento, siendo este escalable a sistemas *anti-windup* e inclusive, a ganancias adap-

tativas según sea el paciente.

Estructura y Actuadores

El dispositivo mantiene una estructura adaptable a las camillas de fisioterapia, donde se realiza el montaje de los actuadores, asegurando la robustez y seguridad de las personas en sesión mediante este tipo de soporte. La estructura conformada de perfil de aluminio ionizado ranurado de uso industrial nos proporciona ventajas del tipo, resistencia y durabilidad, pero manteniendo un peso bajo frente a otros dispositivos del mismo campo, así como soportar el estrés mecánico, generado entre el paciente y los actuadores, sin inconvenientes al momento de realizar las sesiones de rehabilitación (Ver Figura 4). La robustez y rigidez de la misma, hace que se mantenga una estabilidad óptima al realizarse movimientos, para asegurar su consistencia.

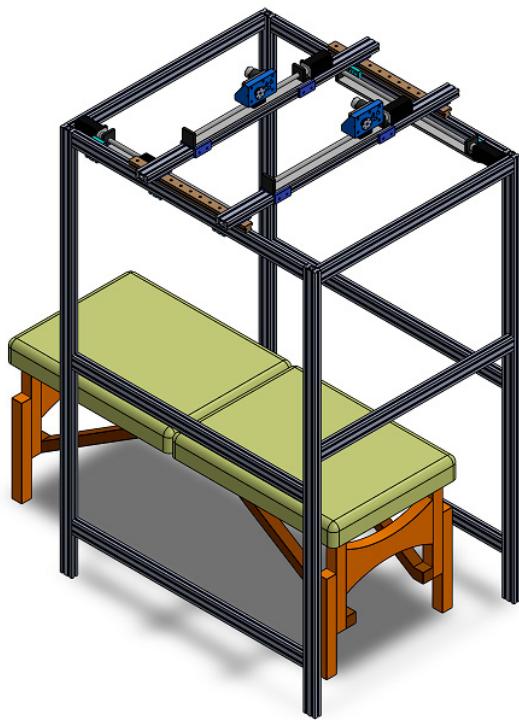


FIGURA 4. Estructura del dispositivo.

En acuerdo con la revisión de bibliografías, se optó por la implementación de actuadores electromecánicos de alto torque, debido a que este tipo de procesos, así como requieren una alta precisión, también se ven enfrentados al peso de la persona, por lo que se debe de mantener un esfuerzo constante y generar fuerzas significativas, manteniendo el control según el estrés de carga que se tenga. Añadiendo que, para la fisioterapia, se requiere mantener movimientos naturales, para priorizar la seguridad del paciente, así que, mediante actuadores de este tipo, podemos manipular tanto la velocidad como el estilo del movimiento, teniendo la capacidad de realizar una versatilidad de movimientos según el paciente necesite.

Otro motivo por el cual se implementó mediante estos actuadores, es su alta facilidad de implementación en la automatización y la coordinación entre ellos, siendo esto vital para la realización de rutinas que se propongan por el

personal de salud especializado, así pudiendo manejar movimientos individuales, repeticiones o conjuntos de movimientos más complejos. En la Figura 5 se observa el prototipo ensamblado.

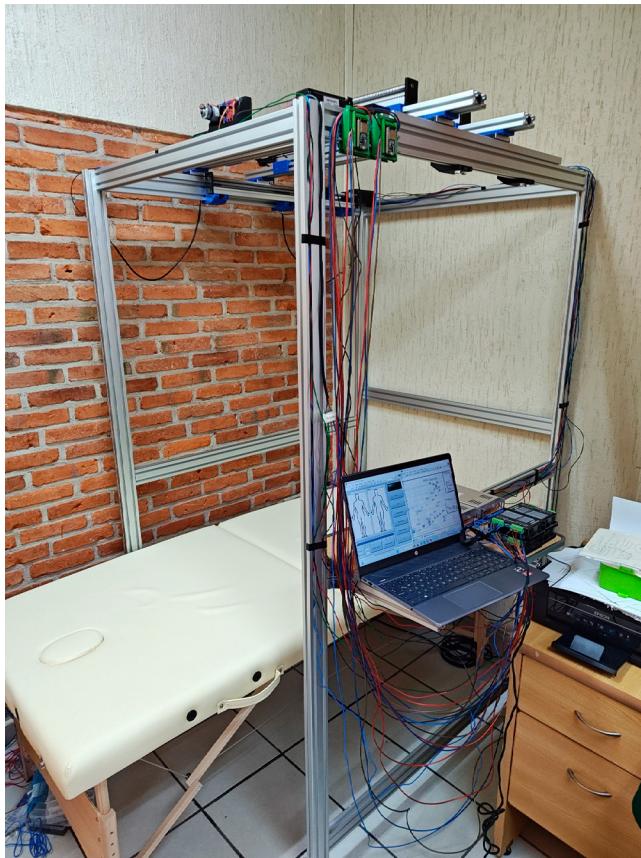


FIGURA 5. Actuadores ensamblados en la estructura.

Esta propuesta permite la ejecución de movimientos tridimensionales (X, Y, Z), lo que facilita la realización de movimientos coordinados, dando pie a poder continuar trabajando con movimientos naturales del cuerpo y permitiendo ejercicios clave para la rehabilitación de pacientes. Para validar la precisión y versatilidad del sistema, se llevaron a cabo distintas pruebas experimentales, las cuales incluyeron:

- Movimientos lineales en un solo eje, los cuales podrían ser empleados en ejercicios donde se requieran desplazamientos en una única dirección, como en ciertos tipos de movimientos de flexión o extensión.
- Movimientos coordinados entre dos motores a pasos en trayectoria circular, los cuales pueden facilitar la generación de trayectorias en movimientos rotacionales o combinados, dependiendo del esquema terapéutico requerido.
- Movimientos secuenciales programados (rutinas), donde se establece una serie de desplazamientos que pueden ser configurados para emular patrones de movimientos repetitivos, lo cual podría ser útil en ejercicios de movilidad progresiva.
- Combinación de desplazamientos XY con ajustes en Z mediante servomotores, lo que permite variar la altura del sistema mientras se mantiene una trayectoria en el plano XY, característica relevante en ejercicios que requieran ajustes en la elevación de la o las extremidades.

- Ejecución de movimientos intercalados, donde el sistema puede realizar desplazamientos en X, luego en Y y posteriormente modificar la altura en Z, o bien reubicar la posición XY antes de realizar ajustes en Z, lo que brinda flexibilidad para diferentes configuraciones de terapia.

Estas pruebas demostraron que el sistema no solo es capaz de realizar movimientos básicos en los ejes cartesianos, sino que también puede coordinar desplazamientos complejos, replicando patrones de movimiento que podrían ser adaptados a distintas terapias de rehabilitación según la evaluación clínica correspondiente.

Retroalimentación

Uno de los aspectos más importantes que se ha visto en este proyecto, ha sido la necesidad de mantener una retroalimentación constante para obtener datos tanto del dispositivo como del paciente. Dado esto, es por lo que además de manejar un sistema de coordenadas, se tienen colocados *encoders* o elementos que nos habiliten saber estos parámetros para no permitir puntos de error que comprometan la seguridad de la persona (Ver Figura 6). Logrando esto gracias a sistemas de control clásico discretizados para poder realizarse en tiempo real y mantener las señales de salida adecuadas.

Gracias a que el controlador de los servomotores de alto torque contiene integrado una salida de retroalimentación mediante señalización de voltaje, podemos interpretarlo dentro de nuestra placa de adquisición de datos, realizando un mapeo del voltaje mínimo y máximo recibidos para así poder conocer e interpretar la posición en la que se encuentra, gestionando su salida por PWM.

Para conocer el estado de los motores a pasos, por si solos, no contienen retroalimentación, así que se les agregó un sensor óptico de alta precisión para poder obtener su información y posición, así pudiendo verificar que se está posicionando en la coordenada adecuada sin comprometer demás elementos y limitando el error en caso de enfrentarse a altas cargas que generen estrés en su movilidad.

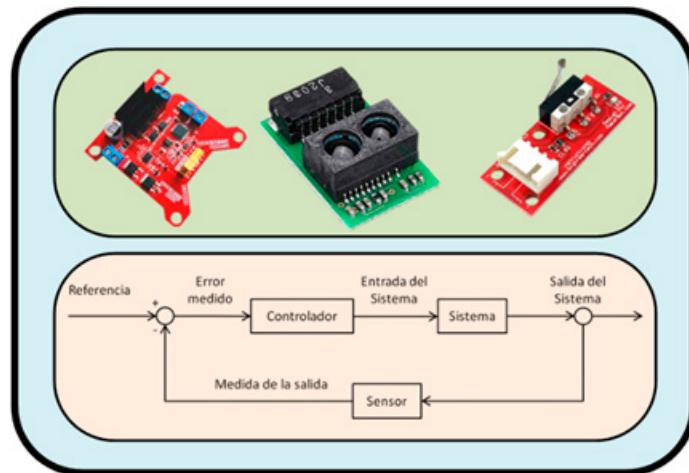


FIGURA 6. Encoders y sensores utilizados.

Gracias a la incorporación de estos sensores, el sistema embebido gestiona la arquitectura de un controlador discreto con estas retroalimentaciones. Debido a la implementación de estos, se presenta la implementación de algoritmos de interpolación de trayectorias, similares al código G, logrando una gestión eficiente del control de posición,

permitiendo que los desplazamientos del sistema se ejecuten con alta precisión. Este esquema de control, permite detectar y corregir posibles desviaciones en tiempo real, mejorando la fiabilidad del sistema durante la rehabilitación.

Con estas capacidades, el sistema tiene el potencial de adaptarse a diversas rutinas terapéuticas y evolucionar en función de los requerimientos clínicos específicos, brindando una plataforma flexible para la rehabilitación de cadera.

Paciente

Como último punto en este proceso, se encuentra el paciente que recibirá la rehabilitación por parte del dispositivo, y como usuario final, todos los puntos anteriormente mencionados se ven obligados a cumplir en total efectividad sus funciones, conteniendo una sinergia, comunicación y coordinación que permitan una terapia completa, sin errores, en pro de la salud y bienestar de la persona. Manteniendo siempre la priorización por la seguridad tanto de la persona en rehabilitación, como el operador. La Figura 7 emula a un paciente en el dispositivo.



FIGURA 7. Paciente simulando ocupar el dispositivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos hasta ahora evidencian el correcto funcionamiento del sistema, destacando la integración efectiva entre actuadores y receptores de datos. Las mediciones en tiempo real han permitido una retroalimentación

precisa, lo que contribuye a la correcta ejecución de la terapia de rehabilitación. Los motores han demostrado estabilidad y precisión, mientras que el sistema de comunicación garantiza una transmisión de datos confiable, facilitando la interpretación clara y eficiente de las acciones.

Asimismo, el diseño del sistema ha demostrado ser escalable, permitiendo la integración de un mayor número de sensores y actuadores para mejorar la seguridad y personalización de las terapias según las necesidades específicas de cada paciente. Este enfoque posibilita la optimización del desempeño del profesional de salud, reduciendo el desgaste físico derivado de actividades repetitivas y permitiendo la ejecución de procesos paralelos con múltiples pacientes, lo que incrementa la eficiencia en la administración de las sesiones de rehabilitación.

Dentro de las pruebas realizadas en el prototipo, se enfocaron en evaluar el movimiento en ejes XYZ, la precisión del sistema, la latencia en la comunicación y la fiabilidad de la transmisión de datos. A continuación, se detallan los hallazgos obtenidos en cada una de estas áreas.

- Precisión del movimiento

Para determinar la precisión del sistema, apoyados de la retroalimentación y controladores donde se involucra el sensor óptico, se mantiene la comunicación mediante una transmisión de datos I2C, esto debido a que se reduce el ruido en la información recibida, lo que resulta en mediciones más estables y menos propensas a variaciones. Además, se incorporó un filtro exponencial móvil (EMA) para suavizar posibles fluctuaciones bruscas en las lecturas.

En las pruebas realizadas del movimiento de los ejes, se configuraron los motores a pasos a 400 pasos por revolución, manteniendo una pausa de 500 microsegundos entre cada paso, lo que permite prever una resolución adecuada para aplicaciones de control de precisión. Sin embargo, el sistema permite aumentar el número de pasos por revolución para movimientos más suaves, lo que se explorará en futuras pruebas.

- Estabilidad del sistema

Los motores a pasos utilizados dentro del dispositivo, según su hoja de especificaciones, soportan un torque de hasta 30 kg cm (3Nm). Esto garantiza una operación confiable en aplicaciones que requieren alta precisión de posicionamiento. Sin embargo, al tratarse de motores sin retroalimentación de posición nativa, se incorpora el sensor óptico, lo que permite verificar la correcta ejecución de los movimientos y mitigar desviaciones en condiciones de alta carga.

Por otro lado, los servomotores implementados en el sistema cuentan con una capacidad de 500 kg cm, lo que les permite manejar esfuerzos significativamente mayores sin comprometer la estabilidad del sistema. Gracias a su sistema de retroalimentación interna y control mediante PWM, estos motores pueden ajustar dinámicamente su respuesta ante variaciones de carga, mejorando la fiabilidad del dispositivo.

Si bien, hasta el momento no se han realizado pruebas con cargas activas, la capacidad de torque de los actuadores sugiere que el sistema es capaz de operar bajo condiciones exigentes sin comprometer la seguridad o precisión del movimiento. En pruebas futuras, se evaluará el impacto del estrés mecánico en el desempeño del sistema.

- Latencia en comunicación

Se realizaron pruebas preliminares con los protocolos de comunicación seleccionados:

TCP/IP: La evaluación se llevó a cabo en una red LAN, asegurando que la transmisión de datos ocurriera de manera confiable y sin interferencias externas, apoyados de la función de *Access Point* de la ESP32.

Bluetooth Low Energy: Se realizaron las pruebas en un entorno cerrado (misma habitación), con emisor y receptor en la misma área, permitiendo verificar la integridad de los paquetes de datos en condiciones controladas.

No se tiene una medición numérica exacta de latencia en cada caso, la experiencia de uso sugiere que ambos protocolos son adecuados para la aplicación propuesta. En ensayos futuros, se realizará una medición más detallada utilizando herramientas de análisis de tráfico de red y registros de tiempos de respuesta.

Durante la implementación, se han identificado áreas de mejora y oportunidades de expansión del sistema. La adaptabilidad de la arquitectura utilizada facilita la incorporación de tecnologías emergentes, tales como el aprendizaje automático para la personalización de rutinas de rehabilitación y la visión computacional para un monitoreo más preciso de la actividad del paciente. Estas mejoras podrían contribuir a una mayor precisión en la detección de patrones de movimiento, la evaluación de riesgos y la recopilación de datos antropométricos relevantes para la terapia.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra el potencial de los sistemas embebidos en rehabilitación, ofreciendo una alternativa eficiente y accesible para la terapia de cadera. La combinación de actuadores de torque, comunicación en tiempo real y un sistema de retroalimentación robusto ha permitido el desarrollo de un dispositivo funcional que optimiza la labor del profesional de la salud y mejora la experiencia del paciente.

El uso de tecnologías de código abierto y protocolos de comunicación inalámbrica ha demostrado ser una estrategia efectiva para garantizar la interoperabilidad del sistema, reducir costos y favorecer la escalabilidad del dispositivo. Además, la implementación de un control preciso y la posibilidad de personalización de las terapias refuerzan la adherencia del paciente al tratamiento, promoviendo una recuperación más eficiente y efectiva.

A futuro, la integración de inteligencia artificial y visión computacional representa un camino prometedor para mejorar la autonomía y precisión del sistema. Estas tecnologías podrían permitir un monitoreo más detallado del progreso del paciente, la detección temprana de irregularidades en la terapia y la optimización de las rutinas de rehabilitación.

Dentro de las técnicas que pudieran implementarse a futuro, se plantea la visión computacional para la realización de monitoreo del paciente durante las terapias, específicamente técnicas de estimación de poses en tiempo real, capturando y analizando los movimientos del paciente, detectando desviaciones de postura, rangos de movilidad o la calidad de la ejecución.

Para el caso de la personalización del tratamiento, se sugiere la integración de modelos de aprendizaje automático supervisado, los cuales pueden aprender de patrones de movimiento previamente etiquetados por especialistas en fisioterapia. Con esta tecnología, es posible desarrollar un sistema que no solo guíe al paciente en la realización correcta de los ejercicios, sino que también ajuste activamente la terapia según el progreso registrado. Además, la incorporación de ciencia de datos permite la recopilación y análisis de métricas clave, como la precisión del movimiento, velocidad de ejecución o nivel de esfuerzo del paciente. Al aplicar técnicas de análisis de datos y visualización de los mismos, se pueden generar reportes detallados sobre la evolución de cada paciente, facilitando el monitoreo por parte de los especialistas y permitiendo ajustes en el tratamiento de manera objetiva y basada en evidencia.

Si bien el prototipo propuesto muestra un gran potencial para su aplicación en rehabilitación física, su implementación en entornos clínicos enfrenta diversos desafíos tanto tecnológicos como operativos y normativos, como lo puede ser la validación clínica y cumplimiento normativo, puesto que se requiere de la certificación de agencias o normativas locales, nacionales e internacionales para poder llevarse a la aplicación con pacientes, además de regulaciones de privacidad dado el manejo de datos sensibles del paciente.

El éxito de la implementación no solo depende de la tecnología, optimización de algoritmos y adaptabilidad, sino también de su aceptación por parte del personal de salud. Es esencial diseñar una interfaz intuitiva y proporcionar herramientas para que los especialistas puedan supervisar, modificar y personalizar las terapias según su criterio. Además, se requiere cierta capacitación para que los profesionales puedan interpretar correctamente los datos y recomendaciones generados por el sistema.

Este estudio destaca la importancia de la ingeniería y la tecnología en la rehabilitación, ofreciendo herramientas innovadoras que optimizan los procesos clínicos y mejoran la calidad de vida de los pacientes. La futura optimización del sistema, junto con pruebas clínicas rigurosas y la colaboración con profesionales de la salud, serán clave para su validación y adopción en entornos médicos reales.

DECLARACIÓN ÉTICA

Este estudio no involucra la participación de seres humanos ni la recopilación de datos personales, médicos o clínicos, por lo que no fue necesario someterlo a la evaluación de un comité de ética en investigación. El desarrollo del sistema robótico para rehabilitación de cadera se realizó exclusivamente mediante sistemas embebidos y pruebas de actuadores con retroalimentación, garantizando que su implementación no compromete la seguridad ni el bienestar de los usuarios.

El prototipo tiene como finalidad servir como una herramienta de apoyo en el ámbito de la rehabilitación, facilitando la asistencia en terapias físicas mediante la automatización de ciertos procesos, sin reemplazar la intervención y el juicio profesional del personal médico y fisioterapéutico. No se han realizado pruebas con sujetos humanos en esta etapa de desarrollo, y el sistema está destinado a ser evaluado en entornos de prueba controlados antes de cualquier aplicación clínica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el respaldo brindado en la realización de este proyecto. Asimismo, se reconoce la valiosa contribución del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) y el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), cuya infraestructura, recursos académicos y entorno de investigación fueron esenciales para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] J. Laut, M. Porfiri, y P. Raghavan, "The Present and Future of Robotic Technology in Rehabilitation," *Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports*, vol. 4, no. 4, pp. 312-319, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s40141-016-0139-0>
- [2] H. Krebs, L. Dipietro, S. Levy-Tzedek, S. Fasoli, A. Rykman-Berland, J. Zipse, y N. Hogan, "A paradigm shift for rehabilitation robotics," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 27, no. 4, pp. 61-70, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/EMB.2008.919498>
- [3] F. Yakub, A. Z. Md. Khudzari, y Y. Mori, "Recent trends for practical rehabilitation robotics, current challenges and the future," *Int. J. Rehabil. Res.*, vol. 37, no. 1, pp. 9-21, 2014, doi: <https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000035>
- [4] Y. Wang, X. Liu, W. Wang, Y. Shi, X. Ji, L. Hu, et al., "Adherence, efficacy, and safety of wearable technology-assisted combined home-based exercise in Chinese patients with ankylosing spondylitis: Randomized pilot controlled clinical trial," *J. Med. Internet Res.*, vol. 24, no. 1, p. e29703, 2022.
- [5] K. S. G. Chua y C. W. K. Kuah, "Innovating with rehabilitation technology in the real world: promises, potentials, and perspectives," *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, vol. 96, no. 10, pp. S150-S156, 2017.
- [6] N. Ouendi, R. Hubaut, S. Pelayo, F. Anceaux, y L. Wallard, "The rehabilitation robot: factors influencing its use, advantages and limitations in clinical rehabilitation," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 546-557, 2024.
- [7] V. Palomino-Díaz, P. Romero-Sorozábal, G. Delgado-Oleas, C. Martín, I. Martínez, D. Blanco, y E. Rocon, "Diseño conceptual de una plataforma robótica para ayudar a que los niños con parálisis cerebral descubran cómo caminar," in *XII Simposio CEA de Bioingeniería*, vol. 83, 2021.
- [8] V. Costa, C. Sánchez, L. Perea, E. Rocon, A. Otero, y R. Raya, "Rediseño basado en la experiencia clínica de un andador robótico para la rehabilitación de fractura de cadera," *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 20, no. 3, pp. 247-258, 2023.
- [9] V. A. C. Cortez, Desarrollo y validación de una plataforma de rehabilitación para fractura de cadera en personas mayores, Tesis doctoral, Univ. San Pablo, 2023.
- [10] J. X. Romero, M. A. Taco, H. C. Terán, W. Y. Romero, y D. A. Pazmiño, "Exoesqueleto robótico de cadera para movilidad coxo-femoral," *Energía Mecánica, Innovación y Futuro*, vol. 11, no. 1, pp. 48-55, 2022.
- [11] S. Jacob, M. Alagirisamy, C. Xi, V. Balasubramanian, R. Srinivasan, N. Z. Jhanjhi, y S. M. Islam, "AI and IoT-enabled smart exoskeleton system for rehabilitation of paralyzed people in connected communities" *IEEE Access*, vol. 9, pp. 80340-80350, 2021.
- [12] S. Jacob, M. Alagirisamy, C. Xi, V. Balasubramanian, R. Srinivasan, N. Z. Jhanjhi, y S. M. Islam, "AI and IoT-enabled smart exoskeleton system for rehabilitation of paralyzed people in connected communities" *IEEE Access*, vol. 9, pp. 80340-80350, 2021.
- [13] J. Q. Ai, W. Meng, F. Bensaali, X. Zhai, L. Liu, y N. Alaraje, "Editorial for FGCS special issue: intelligent IoT systems for healthcare and rehabilitation," *Future Generation Computer Systems*, vol. 125, pp. 770-773, 2021.
- [14] M. A. M. Izhar, N. Ahmad, R. A. Dzyiauddin, S. Sarip, N. A. Mashudi, J. SZA, y M. A. Alam Khan, "A smart IoT-based prototype system for rehabilitation monitoring," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 104-111, 2023.
- [15] A. Gonzalez, L. Garcia, J. Kilby, y P. McNair, "Robotic devices for paediatric rehabilitation: a review of design features," *Biomedical Engineering Online*, vol. 20, pp. 1-33, 2021.
- [16] N. Feizi, S. F. Atashzar, M. R. Kermani, y R. V. Patel, "Modeling and high-definition control of a smart electroadhesive actuator: Toward application in rehabilitation," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 4, no. 4, pp. 1057-1067, 2022.
- [17] S. K. Dutta, B. Sandeep Reddy, y S. K. Dwivedy, "Design of a two degrees of freedom actuator for rehabilitation robotic applications," in *Machines, Mechanism and Robotics: Proceedings of iNaCoMM 2019*, Springer Singapore, pp. 1189-1196, 2022.
- [18] JR. Chaichaowarat, S. Nishimura, T. Nozaki, y H. I. Krebs, "Work in the time of COVID-19: actuators and sensors for rehabilitation robotics," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 256-265, 2022.
- [19] G. I. N. Ordóñez, "Diseño de un sistema embebido de sensores iniciales para rehabilitación de personas con discapacidad visual grave" 2023.
- [20] E. García, J. Orozco, G. Miño, C. Santillán, y C. Serrano, "Señales EEG integradas a sistemas embebidos para el control de un exoesqueleto de mano para rehabilitación motora," en *Memorias del I Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación*.
- [21] E. N. Osella, L. Schiaffino, C. Tabernig, y S. Escobar, "Estrategias de control eficiente en sistemas de rehabilitación motora," *Ciencia, Docencia y Tecnología*

Suplemento, vol. 13, no. 15, 2023.

- [22] D. N. Abril Almonacid y F. M. Hernández Hernández, "Tecnologías digitales en las modalidades terapéuticas y su relación en la educación de la fisioterapia: una revisión integrativa," Bachelor's thesis, Universidad de La Sabana, 2023.
- [23] O. I. Zambrano Orejuela, J. A. Rosales Acosta, W. R. Venegas Toro, P. J. Cruz Dávalos, M. G. Granja Ramírez, y L. R. Soto Aymar, "PIMI-15-04-Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación," 2015.
- [24] C. Herrera-Ligero, I. Bermejo Bosch, y J. L. Chaler Vilaseca, "La medida de resultados en Rehabilitación. Necesidad formativa clave en el siglo XXI," Rehabilitación, vol. 56, no. 3, pp. 169-172, 2022.
- [25] A. Cisnal, D. Antolínez, J. P. Turiel, J. C. Fraile, y E. De La Fuente, "A versatile embedded platform for implementation of biocooperative control in upper-limb neuromotor rehabilitation scenarios," IEEE Access, vol. 11, pp. 35726-35736, 2023.
- [26] A. Cisnal, J. Pérez-Turiel, J. C. Fraile, D. Sierra, y E. de la Fuente, "RobHand: A hand exoskeleton with real-time EMG-driven embedded control. Quantifying hand gesture recognition delays for bilateral rehabilitation," IEEE Access, vol. 9, pp. 137809-137823, 2021.
- [27] T. Franco et al., "Motion sensors for knee angle recognition in muscle rehabilitation solutions," Sensors, vol. 22, no. 19, p. 7605, 2022.
- [28] U. Mayetin y S. Kucuk, "Design and experimental evaluation of a low-cost, portable, 3-DOF wrist rehabilitation robot with high physical human-robot interaction," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 106, no. 3, p. 65, 2022.
- [29] H. Vallery, J. Veneman, E. van Asseldonk, R. Ekkelenkamp, M. Buss, and H. y Der Kooij, "Compliant actuation of rehabilitation robots," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 15, no. 3, pp. 60-69, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/MRA.2008.927689>
- [30] M. Pan, C. Yuan, X. Liang, T. Dong, T. Liu, J. Zhang, et al., "Soft actuators and robotic devices for rehabilitation and assistance," Adv. Intell. Syst., vol. 4, no. 4, p. 2100140, 2022.
- [31] L. Masia, M. Xiloyannis, D. B. Khanh, A. C. Wilson, S. Contu, y K. G. Yongtae, "Actuation for robot-aided rehabilitation: Design and control strategies," in Rehabilitation Robotics, pp. 47-61, Academic Press, 2018.

Consideraciones:

Los autores de este estudio declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza financiera, personal o profesional que puedan influir en los resultados obtenidos o en la interpretación de los datos presentados en este trabajo. Además, no se ha recibido financiamiento externo ni apoyo material de entidades que pudieran estar vinculadas con la temática de la investigación.

Se garantiza que el desarrollo de este estudio se llevó a cabo con total imparcialidad, asegurando la integridad de los procedimientos y el cumplimiento de los más altos estándares éticos y científicos en cada una de sus etapas.