

Optimización de MoveLeg:

Mantenimiento preventivo, adaptativo y perfectivo en sistema embebido para terapia espejo asistida por robots en extremidades inferiores.

MoveLeg Optimization

Preventive, adaptative and perfective maintenance in embedded system for Robotic-Assisted mirror therapy in lower limb.

Ing. Mariana Zamudio Ayala, Dr. Gilberto Borrego
Soto, Dra. Erica Cecilia Ruiz Ibarra

Instituto Tecnológico de Sonora
Ciudad Obregón, México.

mariana.zamudio@potros.itson.edu.mx,
gborrego@potros.itson.edu.mx,
erica.ruiz@potros.itson.edu.mx.

Dra. Cristina Ramírez-Fernandez, Dr. Ismael
Hernández-Capuchin.

Instituto Tecnológico de Ensenada
Ensenada, México.

cramirez@ite.edu.mx, ihernandez@ite.edu.mx

Resumo —El sistema “MoveLeg” es un dispositivo de bajo costo diseñado para mejorar la rehabilitación física de extremidades inferiores mediante la automatización de la terapia pasiva y la integración de terapia espejo asistida por robots (RMT). Sin embargo, enfrenta desafíos en eficiencia de recursos, adaptabilidad en el proceso de prototipado y extensibilidad de funcionalidades. Este estudio propone una optimización integral de “MoveLeg” enfocada en mejorar su robustez, confiabilidad, eficiencia, portabilidad, escalabilidad y flexibilidad, características esenciales para su comercialización. Se realiza un proceso de mantenimiento en hardware y software con aspectos preventivos, adaptativos y perfectivos, identificando áreas de mejora abordadas mediante la elección del módulo de desarrollo ESP-32 DEVKIT1, la implementación de FreeRTOS y la organización del software en capas modulares. Estas mejoras permiten una fácil adaptación a cambios de sensores y actuadores, así como la preparación del sistema para la incorporación de nuevas funcionalidades como monitoreo para teleterapia, juegos serios, y análisis de datos en tiempo real mediante una interfaz gráfica alojada en un dispositivo móvil y conectada a través de BLE. La optimización del sistema permite su utilización en entornos clínicos, mejora su viabilidad comercial, facilita el mantenimiento, reduce costos de fabricación y el consumo energético.

Palabras Clave – *Sistemas Embebidos, Mantenimiento de Hardware y Software, Sistemas Operativos en Tiempo Real (RTOS), Código Flexible, Terapia Pasiva en Extremidades Inferiores, Máquina de Terapia Espejo Asistida por Robots (RMT), Teleterapia.*

Abstract — “MoveLeg” system is a low-cost device designed to improve physical rehabilitation in the lower limb by automating passive therapy and integrating robot-assisted mirror therapy (RMT) functionality. However, it needs help with resource efficiency, adaptability in the prototyping process, and extensibility of functionalities. This study proposes a comprehensive optimization of “MoveLeg” focused on improving its robustness, reliability, efficiency, portability, scalability, and flexibility, which are essential features for its commercialization. A hardware and software maintenance process is carried out with

preventive, adaptive, and perfective aspects, identifying areas of improvement addressed through the use of the ESP-32 DEVKIT1 development module, the implementation of FreeRTOS, and the organization of the software in modular layers. These improvements allow easy adaptation to sensor and actuator changes, as well as preparing the system for the incorporation of new functionalities such as monitoring for teletherapy, serious games, and real-time data analysis through a graphical interface hosted on a mobile device and connected via BLE. The optimization of the system allows its use in clinical environments, improves its commercial viability, facilitates maintenance, and reduces manufacturing costs and energy consumption.

Keywords – *Embedded Systems, Software and Hardware Maintenance, Real-Time Operative Systems, Passive Therapy in lower limb, Robotic-Assisted Mirror Therapy Machine (RMT), teletherapy.*

I. INTRODUCCIÓN

La terapia física es una disciplina que busca desarrollar, mantener y restablecer la capacidad de movimiento funcional en personas con afectaciones en el sistema musculoesquelético [1], [2]. Este tipo de afectaciones representan la principal causa de discapacidad a nivel mundial [3]. Los efectos de estas discapacidades trascienden del bienestar individual, impactando en aspectos económicos, sociales y en la comunidad general [1], [2], [4] por lo cual es de gran importancia atender la alta demanda de servicios de terapia física. Sin embargo, los recursos en los sistemas de salud y clínicas privadas son limitados y además se encuentran saturados, dificultando el acceso a tratamientos adecuados [5], [6], [7]. Ante esta situación, ha surgido la necesidad de buscar formas alternativas o complementos a la terapia convencional. En los últimos años, las tecnologías de la información y el Internet de las Cosas (IoT) han dado lugar al desarrollo de la “teleterapia”, una modalidad que permite ofrecer terapia de forma remota haciendo uso de estas tecnologías [4], lo que abre la oportunidad de contrarrestar las barreras logísticas, temporales, económicas y de adherencia al tratamiento que conlleva la terapia convencional [4], [6], [8].

Estudios sugieren que la teleterapia puede resultar comparable a la rehabilitación en persona, en el caso particular de condiciones como la osteoartritis y reemplazo de rodilla o cadera [2]. Además, existe una tendencia a añadir juegos serios a los sistemas teleterapia para mejorar la experiencia del usuario, teniendo un gran impacto para la realización correcta de ejercicios y la adherencia al tratamiento, lo que a su vez potencia los resultados de la terapia [9], [10], [11].

Otro desafío adicional en la terapia física es el esfuerzo al que se enfrentan los fisioterapeutas para movilizar las extremidades de los pacientes al brindar terapia física pasiva [1]. Un estudio de Asia del Este reporta que el 58.6% de terapeutas participantes sufrió alguna lesión musculoesquelética en el último año debido a la realización de técnicas de terapia pasiva, siendo estas técnicas las que representan mayor riesgo de lesión [12].

A pesar de los riesgos, la terapia pasiva es crucial en las etapas iniciales de rehabilitación para condiciones como el accidente cerebro vascular (ACV), la osteoartritis, y la recuperación postquirúrgica [7], [13], [14]. Estas técnicas han demostrado mejorar del rango de movimiento pasivo y reducir la espasticidad en las articulaciones [1], [7], [13]. Es fundamental alcanzar estos objetivos antes de iniciar tratamientos adicionales, ya que su ausencia compromete la efectividad de los tratamientos subsecuentes [7]. Por otro lado, este tipo de terapias son cansadas para el fisioterapeuta, y por lo tanto la intensidad con la que moviliza al paciente podría no ser uniforme durante toda la sesión, reduciendo la efectividad de la terapia [7].

Ante los desafíos expuestos, existen diferentes estudios que han abordado parcialmente los problemas de accesibilidad, eficacia y seguridad en la terapia física [1], [7], [15]. Sin embargo, muchos de ellos están en fases de desarrollo o prototipo, y no ofrecen una solución integral, escalable y comercializable a bajo costo. Por lo tanto, existe una necesidad clara de sistemas que no sólo proporcionen una terapia efectiva, sino que también sean accesibles y permitan la mejora y personalización continua del tratamiento a través de la incorporación de nuevas tecnologías.

“MoveLeg” es un sistema mecatrónico de bajo costo desarrollado para optimizar la terapia pasiva en extremidades inferiores, mediante su automatización y la integración de tecnologías de la información [12]. Este sistema no sólo mejora la experiencia terapéutica, sino que también permite ofrecer servicios de terapia desde el hogar. Sin embargo, este sistema presenta áreas de oportunidad en términos de eficiencia de cómputo y energía, costo, escalabilidad, robustez y flexibilidad. Mejorar el sistema en estas áreas permitirá su continua optimización y comercialización a bajo costo.

Este artículo responde a las necesidades técnicas del sistema MoveLeg [12], presentando mejoras de hardware y software basado en un proceso de mantenimiento de software que incorpora aspectos adaptativos, preventivos y perfectivos, con la finalidad de obtener un sistema más robusto, escalable, flexible y confiable, con menores costos de fabricación y mantenimiento. Estas mejoras permitirán la integración de MoveLeg en un ecosistema IoT y facilitarán la incorporación de nuevas funcionalidades como los juegos serios. El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección de

trabajo relacionado presenta proyectos relevantes de tecnología aplicada para mejorar la terapia física y los avances en el desarrollo del sistema “MoveLeg”. Luego se describe la metodología empleada, que se enfoca en el mantenimiento continuo de sistemas embebidos. La sección de desarrollo muestra la aplicación de esta metodología y los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones ofrecen un resumen de los logros alcanzados y las direcciones para futuras investigaciones.

II. TRABAJO RELACIONADO

En esta sección se exploran enfoques y tecnologías actuales en el desarrollo de dispositivos de rehabilitación física pasiva, incluyendo máquinas de Movimiento Pasivo Continuo (CPM por sus siglas en inglés) y máquinas de Terapia Espejo Asistidas por Robots (RMT por sus siglas en inglés). Se discute la integración de funcionalidades adicionales a estas máquinas como: teleterapia, juegos serios y análisis de datos en tiempo real. Se enfatizan las necesidades técnicas y de comunicación para su integración y por último se describe la arquitectura de MoveLeg previa a las modificaciones, resaltando sus características y limitaciones.

A. Sistemas de Rehabilitación Automatizados

Las máquinas CPM ofrecen una forma efectiva de movilizar de manera continua y controlada una articulación dentro de su rango de movimiento fisiológico, como parte de un tratamiento de rehabilitación. Estas máquinas pueden configurarse para un número específico de repeticiones y un rango de movimiento limitado, determinado por un fisioterapeuta [13]. Aunque estas máquinas están ampliamente disponibles en el mercado, su acceso es limitado debido a su costo. Sin embargo, a largo plazo, la adquisición de una máquina de este tipo resulta más económica que optar por la terapia convencional [14].

El avance tecnológico junto con la reducción de costos de los dispositivos electrónicos ha influido significativamente en el precio y calidad de las máquinas CPM [15]. Actualmente, una máquina CPM puede adquirirse por \$2,000 (USD), o rentarse por \$425 (USD) durante un periodo de 3 semanas [16]. Este progreso también ha facilitado la integración de nuevas funcionalidades, como en el caso de “MoveLeg” [17], una máquina CPM con funcionalidades de teleterapia y terapia espejo robótica a un costo de fabricación aproximado de \$1100 (USD), lo cual mejora la accesibilidad de estos dispositivos para más personas. MoveLeg, y otros dispositivos presentados en la literatura, exploran la adición de funcionalidades de terapia espejo robótica en máquinas CPM, conocidas como CPM-MT (CPM Mirror Therapy) o RMT [12], [18], [19]. La terapia espejo es una intervención terapéutica que genera una ilusión visual de movimiento en la extremidad afectada mediante el reflejo del movimiento de la extremidad sana en un espejo [19]. Este concepto se ha extendido con la incorporación de sistemas robóticos, que miden el movimiento de la extremidad sana y lo replican en la extremidad afectada a través de un exoesqueleto, de manera síncrona o asíncrona [17], [19]. Estas intervenciones aplicadas en extremidades inferiores suelen implementarse en máquinas CPM ya existentes, lo cual es conveniente por su

capacidad para utilizarse en distintos tratamientos y a la familiaridad de los fisioterapeutas hacia estas máquinas [19].

B. Integración de nuevas funcionalidades en sistemas de rehabilitación.

Existen varios estudios que abordan el monitoreo remoto de programas de ejercicios para realizar en casa, como parte del tratamiento de distintas afectaciones musculoesqueléticas. Por ejemplo, el estudio [20] presenta un sistema cyber-físico para el seguimiento del rango de movimiento en la articulación de la rodilla desde el hogar del paciente. Este sistema utiliza un dispositivo embebido para recolectar datos de sensores, los cuales son transmitidos a servicios en la nube que incluyen una base de datos y una aplicación web para monitorización por parte de los profesionales de salud. Además, incorpora una pantalla OLED para que el paciente pueda visualizar datos básicos de la terapia.

La mayoría de los sistemas revisados comparten una arquitectura similar mostrada en la Fig. 1, la cual se diferencia de la descrita anteriormente por el uso de dispositivos inteligentes (tabletas, celulares o computadoras) conectados inalámbricamente al sistema embebido por medio de Wi-Fi o BLE (Bluetooth Low Energy). Esto permite la visualización de un mayor volumen de datos y la incorporación de otras funcionalidades como el control y configuración del sistema, implementación de juegos serios y de algoritmos para el análisis de datos en tiempo real, así como la conexión a la nube [6], [10], [15], [24], [25], [26], [27], [28].

Sin embargo, el estudio [21] compara el uso de Wi-Fi y BLE en estos enlaces y concluye que usar BLE es más apropiado, debido a su menor consumo de energía y sus implicaciones de usabilidad para los usuarios. Aunque Wi-Fi ofrece una mayor velocidad de transmisión, su uso está asociado a una infraestructura preexistente y requiere de conocimientos técnicos por parte de los usuarios para el emparejamiento de dispositivos. Además, en [22] también se recomienda el uso de una conexión mediante BLE entre el sistema embebido médico y un dispositivo móvil, por las siguientes razones: (1) la accesibilidad de la población a estos dispositivos y (2) la

flexibilidad que brinda al sistema, ya que se pueden hacer mejoras desde la aplicación móvil alojada en el dispositivo sin necesidad de cambios sustanciales en el sistema embebido.

El uso de dispositivos móviles en estos sistemas puede ofrecer operaciones de datos complejas que no son sostenibles para un sistema embebido, pero que tampoco sería confiable que se realicen en la nube debido a la latencia asociada, por lo que fungen como nodos de niebla [22], [23]. La arquitectura IoT presentada en la Fig. 1, ha demostrado ser efectiva para la incorporación de juegos serios inteligentes en sistemas de terapia [10], [24]. Estos juegos automáticamente recolectan datos del entorno y del usuario, los procesan y luego interactúan según el contexto [24]. Para implementar estos juegos en un sistema de terapia es necesario utilizar los sensores y actuadores del sistema embebido terapéutico, requiriendo interfaces de comunicación IoT bidireccionales entre la capa física y nodos de procesamiento (borde y niebla). De esta manera, el juego alojado en un dispositivo móvil puede utilizar datos de sensores, procesarlos y provocar cambios en la dinámica del juego o enviar instrucciones al nodo de borde para el control de actuadores que interactúan con el usuario. Por lo tanto, los juegos serios se vuelven ubicuos e inteligentes, mejorando la experiencia del usuario [25]. Los juegos serios aportan varios beneficios a los sistemas de terapia, como mostrar la forma correcta de hacer los ejercicios [10]. Además, se crean resultados cuantitativos que motivan al paciente a mejorar su desempeño, a su vez estos resultados permiten monitorear su progreso [24]. También se ha demostrado que la incorporación de estos juegos ayuda a la mejora de la concentración del paciente durante su sesión terapéutica, incluso si el paciente presenta deficiencias cognitivas [9]. Estos factores influyen para que el paciente pueda realizar sesiones terapéuticas más largas y eficaces, reduciendo la percepción de monotonía y disminuyendo las posibilidades de que el paciente abandone su tratamiento [26].

A pesar de los beneficios de los juegos serios, no son muy utilizados en sistemas de terapia pasiva; hasta nuestro conocimiento solo el proyecto [9] los ha incorporado para terapia pasiva en extremidades inferiores obteniendo resultados favorables. Sin embargo, su diseño no contempla la portabilidad del juego dentro de un dispositivo móvil, ni el uso del sistema para teleterapia. Por otro lado, otras investigaciones sobre terapia pasiva se centran solo en funcionalidad de teleterapia [16], [30], [34]. Por lo tanto, no existe hasta el momento un sistema de terapia pasiva que integre ambas o más soluciones tecnológicas que mejoren la experiencia de terapia.

Diseñar un sistema escalable para terapia física, capaz de incorporar una serie de nuevas tecnologías como juegos serios y teleterapia, plantea una serie de desafíos significativos. En primer lugar, se requiere un intercambio de datos confiable y seguro en tiempo real, lo que implica una carga computacional mayor. Por lo cual es importante un diseño que optimice el uso de poder computacional y ancho de banda, de manera que sea posible alojar la mayor cantidad de funcionalidades al menor costo y sin comprometer la confiabilidad del sistema. Finalmente, es fundamental que el sistema sea adaptable a

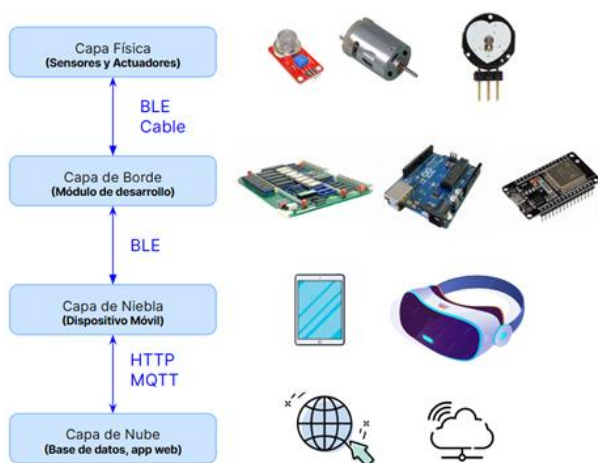


Figura 1. Arquitectura general de los sistemas de terapia física que integran internet de las cosas.

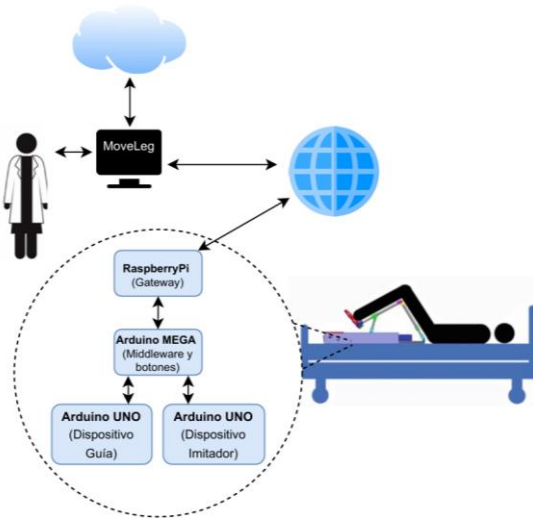


Figura 2. Arquitectura de “MoveLeg” (modificada de [15]).

diferentes contextos clínicos y fácil de usar tanto para profesionales de salud y pacientes.

C. MoveLeg

El sistema MoveLeg consiste en una máquina CPM-MT para telerehabilitación de extremidades inferiores, diseñado para pacientes con secuelas de hemiplejía tras sufrir un accidente cerebro vascular (ACV). Consta de dos componentes principales: (1) el dispositivo guía y (2) el dispositivo imitador. El dispositivo guía permite medir la capacidad de flexión y extensión de rodilla, así como la capacidad de dorsiflexión y plantiflexión en el tobillo de la extremidad sana del paciente. Mientras que el dispositivo imitador permite replicar los movimientos realizados por la extremidad sana en la extremidad afectada, pero con la opción de realizarlos en un rango de movimiento y velocidad menor [12], [17].

El control del sistema embebido se encuentra distribuido entre distintos módulos de desarrollo: una Raspberry-Pi, un Arduino MEGA y 2 Arduino UNO [20]. El sistema embebido se conecta con una aplicación de escritorio y a un servidor web, tal como se muestra en la Fig. 2. Esta arquitectura permite que los especialistas registren a los pacientes y configuren su plan de terapia personalizado. Durante la sesión de terapia, el especialista puede ajustar los parámetros de movimiento del paciente y monitorear la ejecución de la terapia en tiempo real. Además, este sistema tiene el potencial de proporcionar terapia pasiva en extremidades inferiores efectiva, segura y personalizada de manera remota, mejorando además la accesibilidad a la terapia debido a su bajo costo [15]. Sin embargo, existe la posibilidad de optimizar “MoveLeg” en software y hardware, de manera que se unifiquen sus funcionalidades dentro de un solo módulo de desarrollo y para que sea extensible fácilmente. Esto impactaría positivamente en su robustez, precio y capacidad de comerciabilidad.

Los dispositivos mencionados en esta sección ofrecen ventajas significativas, pero aún están en fase de desarrollo, prototipado o prueba, y no tienen presencia en el mercado. Además, hasta la fecha, no se ha encontrado un sistema de

terapia física integral y escalable capaz de soportar diferentes elementos avanzados del estado del arte como telerehabilitación, juegos serios, sensores vestibles y análisis de datos en tiempo real para la monitorización del paciente, entre otras tendencias que puedan surgir en el futuro. El desarrollo de un sistema de este tipo necesita un diseño optimizado del sistema embebido y de su arquitectura IoT. Dichas mejoras son esenciales para avanzar a una fase comercial de los dispositivos a bajo costo, alta fiabilidad para su uso en entornos clínicos y así como su mejora continua de manera sencilla y a bajo costo.

III. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología empleada para mejorar el dispositivo “MoveLeg”. La metodología está planteada desde el punto de vista de un mantenimiento de software de tipo preventivo, adaptativo y perfectivo del sistema “MoveLeg”. Para ello, se hizo una adaptación a una metodología para gestionar la evolución de sistemas embebidos complejos [27], incorporando fases del modelo de desarrollo en espiral [28], la cual es ideal para la mejora continua de productos de software. Esta combinación permite tener un enfoque iterativo y fundamentado para la mejora continua del sistema, facilitando las tareas actuales y futuras de mantenimiento. Las fases del mantenimiento se muestran en la Fig. 3. A continuación, se describen cada una de las fases de la metodología iterativa para la mejora continua de sistemas embebidos complejos:

- A. Descripción de las unidades que componen al sistema, con sus dependencias y funcionalidades:
 - 1) Definición del sistema: Análisis del estado actual del sistema, identificando las distintas funcionalidades del sistema y las dependencias entre ellas, así como con el uso de puntos de conexión externos (dispositivos de entrada y salida).
 - 2) Definición de las modificaciones: Determinación de las mejoras a implementar y su impacto en el diseño actual: nulo, parcial o total.
 - 3) Descripción de dependencias: Segmentación del diseño por niveles o capas.
- B. Creación de planes de lanzamiento: Elaboración de un plan de versiones que detalle las mejoras a ser añadidas de

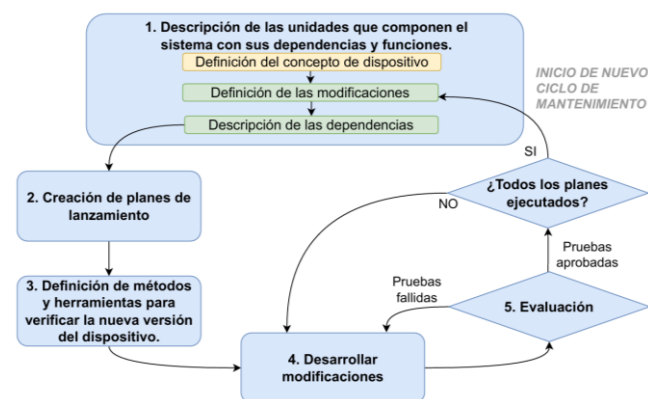


Figura 3. Metodología iterativa para el mantenimiento continuo de sistemas embebidos.

manera cronológica y de manera escalonada por medio de la metodología “Mapa de Historias de Usuario” [28].

- Generación de columna vertebral: Listado cronológico y en forma horizontal de las actividades que conforman un caso de uso del sistema.
 - Incorporación detalles: Inclusión de detalles para cada actividad de la columna vertebral que se planea dar mantenimiento. Estos detalles se enlistan verticalmente debajo de la actividad correspondientes, se recomienda incluir excepciones y casos especiales.
 - Establecer prioridades: Organización de los detalles de cada actividad según su importancia, situando los de mayor prioridad para implementar en la parte superior de la lista.
 - División de detalles por lanzamiento: Separación de los detalles mediante líneas horizontales que delimitan las funcionalidades a implementar en cada lanzamiento, asegurando un manejo controlable del desarrollo. La primera versión debe ser un esqueleto funcional del sistema, a la que se vayan implementando detalles perfectivos en lanzamientos posteriores.
 - Diagramas de Kanban: Creación de diagramas de Kanban basados en los detalles de cada lanzamiento, para dar seguimiento al progreso del desarrollo de manera efectiva.
- C. Definición de los métodos y herramientas para evaluar la nueva versión del sistema: Definición de variables, métricas y casos de uso para la validación del sistema tras las modificaciones.
- D. Desarrollo de las mejoras: Implementación de las mejoras de diseño de acuerdo con la planeación establecida.
- E. Evaluación: Aplicación de los métodos y herramientas de verificación previamente definidos para evaluar la eficacia de las mejoras realizadas.

IV. DESARROLLO

En esta sección se expone como se aplicó la metodología planteada para el mantenimiento preventivo, perfectivo y adaptativo del sistema MoveLeg.

A. Descripción de las unidades que componen al sistema con sus dependencias y funcionalidades.

Implica el análisis detallado del sistema para identificar áreas de oportunidad y proponer mejoras, considerando las necesidades de dispositivos externos como sensores y controladores de actuadores. Además, se determinan los niveles o capas del sistema que serán impactados por las modificaciones propuestas.

1) Definición del sistema

Se realizó un análisis del sistema para comprender su funcionamiento y la distribución de sus funcionalidades. El diseño original del sistema embebido distribuye sus funcionalidades a través de tres módulos de desarrollo, cada uno se considera un dispositivo. Posteriormente, se estudió cada módulo para identificar y separar sus funcionalidades, definiendo cada sub-dispositivo. La distribución de funcionalidades del sistema se muestra en la Fig. 4. La Tabla I proporciona una descripción de los dispositivos y sub-dispositivos planteados como parte de la definición del sistema. El análisis del sistema identifica áreas críticas para mejorar, que se presentan a continuación.

- Baja robustez: Se requiere de una coordinación precisa entre módulos para evitar fallos. La comunicación cableada entre módulos aumenta el riesgo de fallos, ya que cualquier interrupción de la comunicación incide en el funcionamiento completo del sistema. La unificación del sistema en un solo dispositivo aumentaría la confiabilidad del sistema.
- Baja eficiencia energética y computacional: El diseño actual con múltiples módulos lleva a una subutilización de recursos. Unificar en un solo módulo con mayores capacidades podría reducir el consumo energético y los costos de fabricación.
- Baja escalabilidad: La distribución actual dificulta la expansión y dificulta el intercambio de mensajes entre

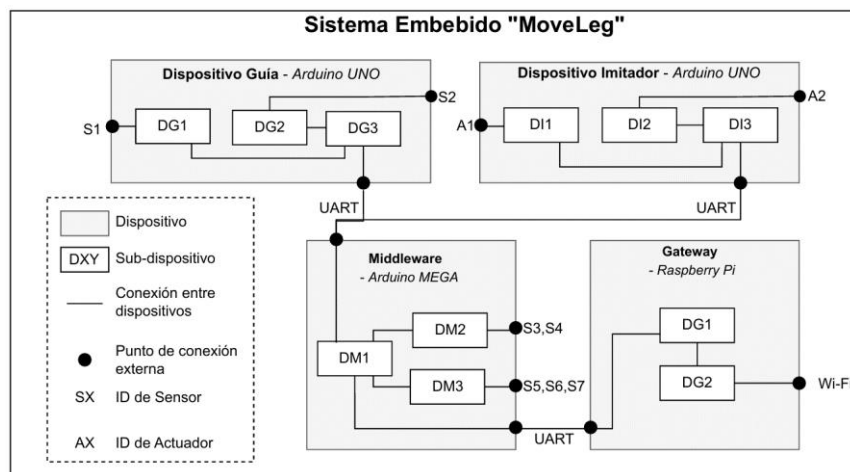


Figura 2. Definición del sistema embebido “MoveLeg”.

TABLA I. DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS QUE CONFORMAN MOVELEG.

Dispositivo	Sub-dispositivos	Descripción
DG- Dispositivo Guía Lee la velocidad y el rango de movimiento las articulaciones.	DG.1	Lee el movimiento de la articulación de la rodilla
	DG.2	Lee el movimiento de la articulación del tobillo.
	DG.3	Gestiona la comunicación con el dispositivo middleware.
DI – Dispositivo Imitador Moviliza las articulaciones basándose en el movimiento leído por el dispositivo de guía y la información recibida del médico.	DI.1	Controla el motor paso a paso para movilizar la articulación de la rodilla.
	DI.2	Controla el motor de corriente continua para movilizar la articulación del tobillo.
	DI.3	Gestiona la comunicación con el dispositivo middleware.
DM – Middleware Actúa como puente entre la funcionalidad básica de MoveLeg y los servicios externos, también gestiona los botones y los sensores de límite.	DM.1	Coordina las acciones de servicios externos, y los dispositivos guía e imitador.
	DM.2	Comunica los eventos de botones con los dispositivos guía e imitador.
	DM.3	Comunica los eventos de los sensores de límite con el dispositivo imitador.
DG - Gateway Comunica MoveLeg con un PC externo de forma local o con servicios web a través de Internet.	DG.1	Gestiona los mensajes provenientes y hacia el middleware.
	DG.2	Gestiona los mensajes provenientes y hacia la PC o servicios web externos.

módulos, aumentando los costos de desarrollo. Se necesitan mejoras estructurales para permitir una mejora continua a bajo costo.

2) Definición de las modificaciones

El objetivo del proceso de mantenimiento es obtener un sistema de mayor robustez, confiabilidad, escalabilidad y eficiencia a un menor costo, así como su emparejamiento con un dispositivo móvil por medio de BLE, permitiéndole expandir sus funcionalidades y brindar una mejor experiencia de uso. Por lo cual, se propone un nuevo diseño implementado en un solo módulo de desarrollo, y modularizado seis dispositivos internos principales. La Fig. 5 muestra la nueva distribución del sistema y las interacciones entre los dispositivos internos y externos. La Tabla II presenta una descripción de las tareas que realiza cada dispositivo y sub-dispositivo. Asimismo, se definió el

TABLA II. DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EN EL NUEVO DISEÑO UNIFICADO DE MOVELEG.

Dispositivo	Sub-dispositivos	Descripción
D1 Iniciador del sistema	D1.1	Inicializa los motores paso a paso y de corriente directa.
	D1.2	Establece conexión con el dispositivo móvil.
D2 Interfaz de comunicación	D2.1	Gestiona los mensajes entrantes del dispositivo móvil.
	D2.2	Gestiona los mensajes salientes al dispositivo móvil.
D3 Dispositivo Guía	D3.1	Lee el movimiento de la articulación de rodilla y los envía al dispositivo móvil
	D3.2	Lee el movimiento de la articulación del tobillo y los envía al dispositivo móvil
	D3.3	Configura el motor a pasos respecto al rango de movimiento recibido a través del dispositivo móvil.
D4 Dispositivo Imitador	D4.1	Controla el motor paso a paso para movilizar la articulación de la rodilla del paciente.
	D4.2	Configura el motor de corriente directa respecto al rango de movimiento recibido a través del dispositivo móvil.
	D4.3	Controla el motor de corriente directa para movilizar la articulación del tobillo del paciente.
	D4.4	Controla el motor de corriente directa para movilizar la articulación del tobillo del paciente.
D5 Reinicio del sistema	D5.1	Gestiona la construcción y envío de archivo que reporta los resultados de terapia.
	D5.2	Gestiona el envío de datos de terapia en tiempo real.
	D5.3	Reinicia el sistema para una nueva sesión de terapia.
D6 Manejo de Botones	D6	Maneja el uso del botones de inicio, paro y sensibilidad por medio de interrupciones.

funcionamiento del sistema mejorado a partir de un diagrama de flujo de tareas, mostrado en la Fig. 6. Este diagrama ofrece una representación visual del orden secuencial en el que operan los sub-dispositivos. Se observa que es necesario que algunos de ellos operen de manera simultánea para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema. Además, algunos sub-dispositivos accionan o desactivan a otros como parte de sus actividades o, por otro lado, necesita intercambiar datos para realizar sus funciones.

En el diagrama de flujo se observa la necesidad de atender la concurrencia de tareas de manera efectiva y segura. Por ello, se propone implementar el sistema usando un Sistema Operativo en Tiempo Real (RTOS) y, por consiguiente, adoptar un enfoque de programación basada en tareas. Este enfoque

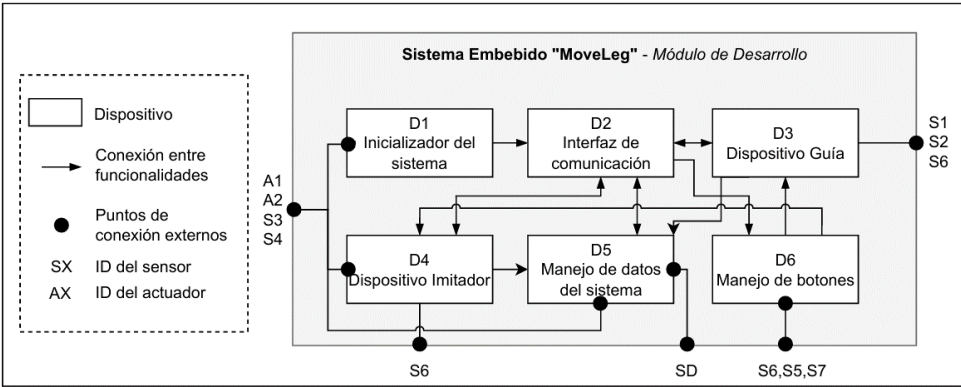


Figura 3. Definición de modificaciones de MoveLeg unificando el Sistema en un solo módulo de desarrollo.

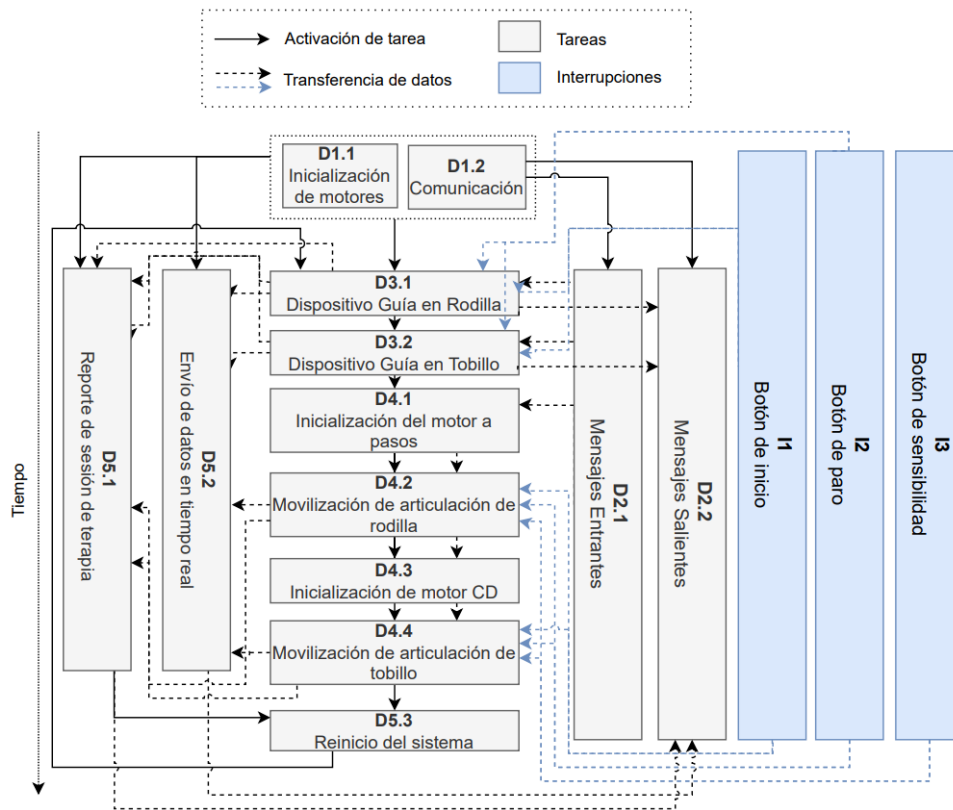


Figura 4. Diagrama de flujo de tareas definidas que representan el funcionamiento de MoveLeg.

permite obtener beneficios que se alinean con los objetivos de diseño [29]:

- **Eficiencia:** El RTOS gestiona eficientemente las tareas y recursos del sistema, asignando tiempos de CPU, prioridades y recursos de manera ordenada. Esto garantiza el cumplimiento de restricciones temporales y permite un sistema confiable y robusto.
- **Escalabilidad:** El uso de un RTOS facilita una arquitectura de software modular, donde cada tarea se desarrolla de forma independiente y se integra sin afectar al resto del sistema. Esto simplifica la adición o modificación de tareas según las necesidades del proyecto.
- **Flexibilidad:** La implementación en RTOS utiliza una capa de abstracción que asegura la portabilidad del código entre diferentes módulos de desarrollo con mínimas modificaciones, manteniendo la misma funcionalidad en distintos entornos.
- **Confiabilidad:** Los RTOS están diseñados para ser altamente confiables, minimizando riesgos de fallas en tiempo real que puedan tener consecuencias críticas en aplicaciones específicas.

Como parte de la definición del nuevo diseño de MoveLeg, fue necesaria la selección de un módulo de desarrollo para implementar el sistema. Se evaluaron varios módulos de desarrollo basados en un estudio comparativo para prototipos IoT [29]. Se investigaron alternativas actualizadas de los módulos mencionados en el artículo y se filtraron considerando criterios como capacidad de comunicación BLE, soporte para

RTOS y periféricos necesarios para sensores y actuadores de MoveLeg. Los módulos evaluados incluyeron Arduino Nano 33 Rev2, Raspberry Pi Pico, ESP32 DEVKIT1 y Particle Photon 2. Tras un análisis detallado, se seleccionó el ESP32 DEVKIT1 por su alta capacidad computacional, amplia compatibilidad con periféricos a un costo competitivo, y su soporte para el RTOS líder en la industria, FreeRTOS [30], con gran soporte por parte de la comunidad y su alta compatibilidad con dispositivos de distintos fabricantes y características.

3) Descripción de las Capas de Abstracción del Sistema

Se dividió el sistema en capas (ver Fig. 7), de manera que se abstraiera la complejidad del sistema y se facilite el desarrollo y futuros mantenimientos. Las capas de software propuestos dan la base para estructurar el software modularmente. A continuación se describen las capas propuestas.

- **Plataforma de Hardware:** Incluye el módulo de desarrollo que se conecta directamente con dispositivos externos como sensores, drivers de actuadores, módulo de memoria SD y dispositivos móviles vía BLE.
- **RTOS (FreeRTOS):** Gestiona los tiempos de CPU para las tareas de las capas superiores y actúa como una capa de abstracción del hardware. Facilita el mantenimiento adaptativo y la escalabilidad del sistema, permitiendo su implementación en dispositivos con mayores capacidades de cómputo realizando cambios mínimos de configuración.
- **Configuración:** Configura sensores y actuadores, especificando los puertos utilizados y la elección entre diferentes tipos de dispositivos externos para cada una de las tareas del sistema. Brinda adaptabilidad al sistema, facilitando el prototipado y la mejora continua.

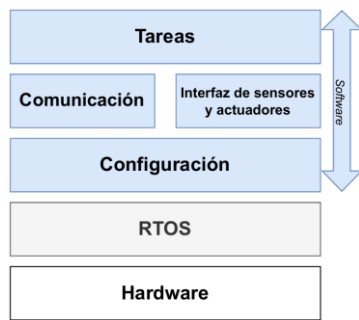


Figura 5. Niveles de Abstracción del sistema MoveLeg.

- **Interfaz de sensores y actuadores:** Define cómo se adquieren datos de los sensores y se manipulan actuadores, utilizando librerías personalizadas para cada dispositivo externo configurado, asegurando su correcto funcionamiento.
- **Comunicación:** Gestiona la comunicación vía Bluetooth entre MoveLeg y dispositivos externos, encargándose de la recepción, manejo y envío eficiente de datos necesarios para el control del sistema.
- **Tareas:** Implementa las funciones del sistema usando las capas de comunicación e interfaz de entradas y salidas. Cada tarea se desarrolla como una función independiente para facilitar el mantenimiento y mejorar la legibilidad del código.

B. Creación de planes de lanzamiento

La creación de planes de lanzamiento a través de la metodología “Mapas de Historias de Usuario”, permitió estructurar el desarrollo en tres etapas de lanzamiento.

- **Lanzamiento 1:** Adaptación de la funcionalidad básica de “MoveLeg” al nuevo entorno de desarrollo usando FreeRTOS. Incluye el dispositivo guía e imitador controlados por medio de botones físicos.
- **Lanzamiento 2:** Incorporación de un dispositivo móvil conectado por BLE, para el intercambio parámetros de terapia y resultados, así como el control del sistema embebido por medio de botones en la aplicación.
- **Lanzamiento 3:** Habilitar el envío de datos de terapia en tiempo real y la generación y almacenamiento de archivos con resultados de terapia en memoria SD local, para el respaldo de información en ausencia de conectividad a internet por parte del dispositivo móvil.

C. Definición de métodos y herramientas para evaluar la nueva versión del sistema.

Se definieron distintos métodos para garantizar los objetivos del proceso de mantenimiento:

- **Definición de casos de prueba:** Esta metodología simula escenarios reales basados en las historias de usuario, de manera que permite verificar el correcto funcionamiento de todas las funcionalidades del sistema, asegurando el cumplimiento de los requerimientos del usuario final.
- **Comparación con dispositivo de medición de referencia:** Comparación de las mediciones de movimiento y movilizaciones de extremidades realizadas por MoveLeg

con un dispositivo de medición estándar, asegurando que los datos recopilados mantengan una precisión dentro de un margen de error aceptable, no mayor al 5%.

- **Evaluación de eficiencia de recursos:** Se realizarán comparaciones de consumo energético y costos entre la versión anterior del sistema y el ESP32 DEVKIT1, determinando el impacto económico y energético de la actualización del sistema.
- **Evaluación cualitativa de robustez, escalabilidad y flexibilidad:** Se espera una mejora significativa en estos aspectos con el nuevo diseño del dispositivo, que incluye la unificación del sistema, el uso de RTOS y una estructura modular de librerías.

D. Desarrollo de Mejoras de Software y Evaluación

1) Lanzamiento 1:

El enfoque de programación por tareas permitió incluir las funcionalidades básicas del sistema (imitador y guía) de manera escalonada y sencilla. Además, durante esta etapa se construyó la base de las capas de software de configuración de entradas y salidas, así como la capa interfaz de sensores y actuadores. Esto permite abstraer la complejidad en la capa de tareas y facilita la lectura de datos y el control de los actuadores. Así como el reemplazo de los mismos por otro tipo, favoreciendo el proceso de mejora continua.

Una vez obtenido el esqueleto funcional del sistema, se realizaron evaluaciones de casos de uso normal, y con casos especiales para probar exhaustivamente la seguridad del dispositivo, tomando especial atención a los botones de paro de emergencia y sensibilidad, en caso de encontrar vulnerabilidades se realizaron ciclos de modificaciones y pruebas, hasta que quedaran resueltas.

También se validaron las mediciones realizadas por el dispositivo, comparándolas respecto a instrumentos de medición aplicados al sistema mecánico, obteniendo variaciones de 1.42% en el dispositivo guía y variaciones de 4.3% en el dispositivo imitador. La comparación de recursos energéticos y económicos entre la versión anterior y actual de MoveLeg toma en cuenta los módulos de desarrollo utilizados en cada versión. Por ello, para determinar el consumo energético de la versión anterior de MoveLeg, se consideró el consumo energético promedio de los módulos que lo

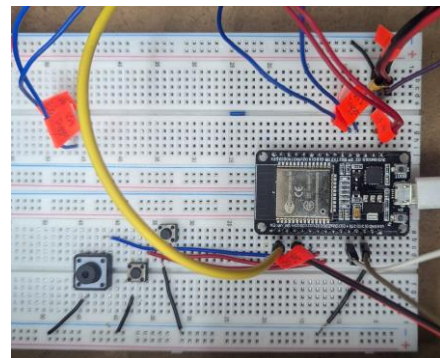


Figura 8. Circuito para implementar MoveLeg utilizando módulo de desarrollo ESP-32DEVKIT1.

componen: dos Arduino UNO (0.25 W), un Arduino MEGA (0.35 W), y un Raspberry Pi (6.7 W) dando un total de 7.3 W. Mientras que la nueva versión utiliza sólo una ESP-32 como se muestra en la Figura 8, la cual tiene un consumo máximo de 0.792 W. Dando una reducción de uso de 89.15% de energía. Por otro lado, el costo de los módulos de desarrollo de la versión anterior asciende a \$113 (USD), mientras que la ESP-32 tiene un costo de apenas \$16 (USD). En consecuencia, se ofrece un ahorro económico de 85.84%.

2) Lanzamiento 2:

Se enfocó en añadir una comunicación bidireccional entre MoveLeg y una aplicación móvil a través de BLE. Para ello, se definió un protocolo ligero de comunicación que permitiera operar las funcionalidades básicas del lanzamiento 1 desde la aplicación, además de la introducción de datos del paciente, la configuración de la terapia, así como la visualización de resultados.

Primero, se hizo una lista por separado de los mensajes salientes y entrantes de MoveLeg, detallando su contenido y tipo de variable necesaria para almacenar cada uno de los datos. Los mensajes salientes se clasificaron en tres categorías: control por medio de botones, envío de datos en tiempo real y envío de resultados. Los mensajes entrantes se dividieron en 2 categorías: notificación de control por medio de botones en app y configuración de terapia.

Se utilizó un protocolo con un byte de control concatenado con los datos correspondientes, donde el mensaje más largo a intercambiar, hasta el último lanzamiento, es de 35 bytes. Esto permite un intercambio ligero de información, previniendo la saturación del ancho de banda. Además, el uso de un byte de control en el protocolo se encuentra subutilizado por lo que permite añadir más tipos de mensajes para implementar nuevas funcionalidades IoT.

La implementación de este protocolo de comunicación bidireccional brinda la capacidad de expandir las funciones del sistema MoveLeg, sin cambios sustanciales en el diseño del sistema embebido y con la capacidad de delegar al dispositivo móvil el procesamiento computacional de tareas que implican una carga mayor, así como la conexión a internet. Por ejemplo: el envío de datos hacia un servidor, la interacción con una aplicación web de teleterapia, juegos serios, entre otros.

Para el usuario este lanzamiento implica una mejor experiencia de uso. La aplicación móvil facilita la interacción con el sistema embebido, permitiendo introducir datos de configuración como medidas del paciente, número de repeticiones a leer y replicar, ver resultados de las sesiones de terapia y controlar el sistema embebido de una manera intuitiva. Además, el emparejamiento de dispositivos por medio de BLE es intuitivo y no implica conocimiento técnico avanzado por parte de los usuarios. Por último, la utilización de un teléfono móvil reduce los costos de fabricación del dispositivo, al eliminar la instalación de tableros de control con interfaz gráfica como parte del sistema embebido.

3) Lanzamiento 3:

Se trató de un proceso perfectivo, añadiendo funcionalidad de envío de datos en tiempo real y creación de archivos. Este

lanzamiento prepara al dispositivo para aplicaciones de monitorización remota para teleterapia y juegos serios ya que se envían datos del estado actual del paciente como posición angular en tiempo real y velocidad promedio, necesarias para estas aplicaciones. Por otro lado, también se añade la creación y almacenamiento de archivos con resultados de la terapia, los cuales preparan al dispositivo para añadir funcionalidades de expediente médico y visualización de datos sobre el progreso del paciente. Así como el almacenamiento temporal de resultados de forma local hasta que haya conexión a la nube para enviar los archivos.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este estudio se ha optimizado el sistema MoveLeg logrando mejoras significativas en robustez, eficiencia, flexibilidad, escalabilidad y confiabilidad. La implementación del sistema en el módulo de desarrollo ESP32 DEVKIT V1 y la utilización de FreeRTOS ha dado como resultado un sistema más robusto y adaptable, capaz de reducir el consumo energético y los costos, además de simplificar el proceso de mantenimiento.

La nueva arquitectura del sistema embebido unifica el sistema, reduciendo las probabilidades de fallo y el gasto energético. Esto facilita la adaptación del sistema para ser alimentado por baterías en futuros estudios, brindando portabilidad y autonomía, e impactando directamente en la experiencia del usuario. Las mejoras en la estructura de software modular y basada en tareas permiten la incorporación sencilla de nuevas funcionalidades, como la interacción con dispositivos móviles por BLE, la integración de juegos serios y plataformas de teleterapia, así como la adaptación del sistema a diferentes configuraciones de hardware.

Estos avances benefician directamente a los desarrolladores, ya que el proceso de mantenimiento perfectivo y adaptativo del sistema se vuelve más sencillo e implica un impacto económico menor. A su vez, esto impacta positivamente a los pacientes y profesionales de la salud, ya que obtienen una plataforma de terapia pasiva de extremidades inferiores que evoluciona constantemente para mejorar la experiencia terapéutica de manera accesible.

A pesar de estos avances, persisten algunas limitaciones que deben abordarse en futuras investigaciones. Se sugiere explorar la integración de funcionalidades de teleterapia y juegos serios en el sistema, realizar estudios clínicos y recopilar retroalimentación de los usuarios para mejorar continuamente el sistema, así como la adaptación del sistema para ser alimentado por baterías.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONAHCYT por la beca No. 1232854 otorgada al primer autor de este artículo.

Se agradece a los estudiantes del Instituto Tecnológico de Ensenada: Federico Pimienta Rosales y Moisés Aurelio Martínez Nacero por su valiosa colaboración en la optimización de MoveLeg propuesta en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] I. Brenner and T. University, "Effects of Passive Exercise Training in Hemiplegic Stroke Patients: A Mini-Review," *Sports Medicine and Rehabilitation Journal*, vol. 3, p. 1036, 2018.
- [2] P. Seron et al., "Effectiveness of Telerehabilitation in Physical Therapy: A Rapid Overview," *Phys Ther*, vol. 101, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.1093/ptj/pzab053.
- [3] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Trastornos Musculoesqueléticos." Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions#:~:text=Los%20trastornos%20musculoesquel%C3%A9ticos%20son%20la%20principal%20causa%20de,bienestar%20y%20una%20menor%20capacidad%20de%20participaci%C3%B3n%20social>.
- [4] M. A. Cottrell and T. G. Russell, "Telehealth for musculoskeletal physiotherapy," *Musculoskelet Sci Pract*, vol. 48, p. 102193, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.msksp.2020.102193.
- [5] TE. Lambert et al., "An app with remote support achieves better adherence to home exercise programs than paper handouts in people with musculoskeletal conditions: a randomised trial," *J Physiother*, vol. 63, no. 3, 2017, doi: 10.1016/j.jphys.2017.05.015.
- [6] I. Bisio, C. Garibotto, F. Lavagetto, and A. Sciarrone, "When eHealth Meets IoT: A Smart Wireless System for Post-Stroke Home Rehabilitation," *IEEE Wirel Commun*, vol. 26, no. 6, pp. 24–29, Dec. 2019, doi: 10.1109/MWC.001.1900125.
- [7] C. Vér et al., "The Effect of Passive Movement for Paretic Ankle-Foot and Brain Activity in Post-Stroke Patients," *Eur Neurol*, vol. 76, no. 3–4, pp. 132–142, 2016, doi: 10.1159/000448033.
- [8] D. B. Simpson et al., "Connecting patients and therapists remotely using technology is feasible and facilitates exercise adherence after stroke," *Top Stroke Rehabil*, vol. 27, no. 2, pp. 93–102, Feb. 2020, doi: 10.1080/10749357.2019.1690779.
- [9] A. Pino et al., "Mirror-Based Robotic Therapy for Ankle Recovery with a Serious Game: A Case Study with a Neurological Patient," in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, IEEE Computer Society, 2022. doi: 10.1109/ICORR55369.2022.9896510.
- [10] J. Monge and O. Postolache, "Augmented Reality and Smart Sensors for Physical Rehabilitation," in *2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, IEEE, Oct. 2018, pp. 1010–1014. doi: 10.1109/ICEPE.2018.8559935.
- [11] B. Bonnechère, "Serious Games in Rehabilitation," in *Serious Games in Physical Rehabilitation*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 41–109. doi: 10.1007/978-3-319-66122-3_4.
- [12] G. Castellón-Ramírez et al., "MoveLeg: An Assistive Device for the Motor Tele-Rehabilitation of the Lower Limbs," 2023, pp. 3–14. doi: 10.1007/978-3-031-21333-5_1.
- [13] R. Dwornicka and I. Dominik, "Design of Continuous Passive Motion Machine Based on Kinematic Model of Lower Limb," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 712, pp. 93–97, Jan. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.712.93.
- [14] R. L. Worland, J. Arredondo, F. Angles, F. Lopez-Jimenez, and D. E. Jessup, "Home Continuous Passive Motion Machine Versus Professional Physical Therapy Following Total Knee Replacement," *J Arthroplasty*, vol. 13, no. 7, 1998.
- [15] J. Blumenthal, A. Wilkinson, and M. Chignell, "Physiotherapists' and Physiotherapy Students' Perspectives on the Use of Mobile or Wearable Technology in Their Practice," *Physiotherapy Canada*, vol. 70, no. 3, pp. 251–261, Aug. 2018, doi: 10.3138/ptc.2016-100.e.
- [16] D. Yetman, "What does a continuous Passive Motion (CPM) Machine Do?," healthline. Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.healthline.com/health/what-not-to-do-after-knee-replacement#takeaway>
- [17] G. A. Castellón, "Diseño y desarrollo de un dispositivo de asistencia para la rehabilitación motriz de extremidades inferiores de pacientes con secuela de accidente cerebrovascular (Moveleg)," Instituto Tecnológico de Ensenada, Ensenada, Baja California, México, 2021.
- [18] G. Cheng et al., "Robotic mirror therapy system for lower limb rehabilitation," *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 48, no. 2, pp. 221–232, Jul. 2021, doi: 10.1108/IR-06-2020-0112.
- [19] T. Park, M. Lee, T. Jeong, Y. Il Shin, and S. M. Park, "Quantitative analysis of eeg power spectrum and emg median power frequency changes after continuous passive motion mirror therapy system," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20082354.
- [20] F. ATAMTÜRK and H. YİĞİT, "Cyber-Physical System based E-Health: Knee Joint Physical Therapy Monitoring," *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.34088/kojose.1024433.
- [21] A. Smiley et al., "Development and Evaluation of Wireless Interfaces to Monitor and Control Cycling Exercise During Home Telerehabilitation," *Medical Devices: Evidence and Research*, vol. 16, 2023, doi: 10.2147/MDER.S392999.
- [22] F. Cuckov et al., "Towards a Reconfigurable Cyber-Physical Systems Framework for Rapid Development of Scalable Next-Generation Smart Medical Devices," in *BioSMART 2021 - Proceedings: 4th International Conference on Bio-Engineering for Smart Technologies*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/BioSMART54244.2021.9677812.
- [23] B. Farahani, F. Firouzi, V. Chang, M. Badaroglu, N. Constant, and K. Mankodiya, "Towards fog-driven IoT eHealth: Promises and challenges of IoT in medicine and healthcare," *Future Generation Computer Systems*, vol. 78, pp. 659–676, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.future.2017.04.036.
- [24] S. Ahmad, S. Umirzakova, F. Jamil, and T. K. Whangbo, "Internet-of-things-enabled serious games: A comprehensive survey," *Future Generation Computer Systems*, vol. 136, pp. 67–83, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.future.2022.05.026.
- [25] S. Ahmad, F. Mehmood, F. Khan, and T. K. Whangbo, "Architecting Intelligent Smart Serious Games for Healthcare Applications: A Technical Perspective," *Sensors*, vol. 22, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/s22030810.
- [26] F. L. F. Eichinger, A. V. Soares, F. Noveletto, Y. Sagawa Júnior, P. Bertemes Filho, and S. C. Domenech, "Serious game for locomotor rehabilitation of hemiparetic stroke patients," *Fisioterapia em Movimento*, vol. 33, 2020, doi: 10.1590/1980-5918.033.ao16.
- [27] D. Hallmans, T. Nolte, and S. Larsson, "A method for handling evolvability in a complex embedded system," in *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, IEEE, Sep. 2013, pp. 1–8. doi: 10.1109/ETFA.2013.6648016.
- [28] J. Patton and P. Economy, *User story mapping: discover the whole story, build the right product*. "O'Reilly Media, Inc.," 2014.
- [29] D. Singh, A. Sandhu, A. Thakur, and N. Priyank, "An Overview of IoT Hardware Development Platforms," May 2020.
- [30] N. Dahad, "The Current State of Embedded Development," Jun. 2023.