

# Prototipo de dispositivo de rehabilitación en la movilidad de rodilla con sistema bilateral de retroalimentación

## Prototype of a Knee mobility rehabilitation device with bilateral feedback system

Nombres Sánchez, Madera <sup>1</sup>

*\*Corresponding author:  
Arelysanchez042@gmail.com*

**Resumen.** Este proyecto presenta el desarrollo de un prototipo funcional para la rehabilitación de la movilidad de rodilla, diseñado con un sistema bilateral de retroalimentación. El dispositivo permite medir el torque en los movimientos de flexión y extensión, utilizando un motor DC con encoder, un puente H (L298N), un sensor de corriente INA219 y dos microcontroladores Arduino Mega conectados por UART. La implementación de un control PID garantiza movimientos precisos y estables. Además, el sistema registra el progreso del paciente en tiempo real, ofreciendo datos cuantitativos para el ajuste terapéutico personalizado.

**Palabras Clave:** Rehabilitación, medición de torque, rodilla, retroalimentación bilateral.

**Abstract.** This work presents the development of a knee mobility rehabilitation device prototype with a bilateral feedback system capable of measuring torque during flexion and extension movements. The system uses a DC motor with encoder, an H-bridge (L298N), a current sensor INA219, and two Arduino Mega microcontrollers. A PID control algorithm and UART communication allow real-time monitoring and torque tracking, supporting data-driven rehabilitation adjustments. The prototype was tested under controlled conditions, showing stable performance and potential for personalized therapy applications.

**Keywords:** Rehabilitation, torque measurement, knee, bilateral feedback.

### I. INTRODUCCIÓN

La pérdida de movilidad en la rodilla por causas como lesiones deportivas, accidentes cerebrovasculares o esfuerzos repetitivos representa un desafío funcional y emocional para los pacientes. Esta condición limita actividades básicas como caminar, mantenerse de pie, subir escaleras o incluso sentarse. La rehabilitación de la rodilla es fundamental para restaurar la independencia del paciente y evitar complicaciones adicionales como atrofia muscular o deterioro del equilibrio postural. Según datos de la OMS y estudios clínicos recientes, los trastornos musculoesqueléticos son una de las principales causas de discapacidad en el mundo, y la articulación de la rodilla se encuentra entre las más afectadas.

Los enfoques tradicionales de rehabilitación, aunque efectivos, suelen carecer de mecanismos de cuantificación objetiva del progreso terapéutico. Esto limita la capacidad de los profesionales para ajustar los tratamientos de manera precisa, ya que se basan principalmente en observación y retroalimentación subjetiva del paciente. Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar herramientas tecnológicas que permitan registrar parámetros clave durante la terapia, como la fuerza ejercida, la simetría del movimiento y el torque generado en las articulaciones involucradas.

Este trabajo presenta un prototipo de dispositivo de rehabilitación para rodilla con sistema bilateral de retroalimentación, orientado a medir el torque durante los movimientos de extensión y flexión, y registrar el progreso del paciente. La integración de un sistema de control PID, un motor DC con encoder y sensores de corriente permite un control preciso del movimiento, mientras que la comunicación UART entre microcontroladores facilita la sincronización y el monitoreo continuo. El objetivo es proporcionar una herra-

mienta de bajo costo, accesible y personalizable, que complemente las terapias físicas convencionales y facilite una rehabilitación más eficiente y basada en datos.

## II. METODOLOGÍA

Tras una revisión de la literatura y los lineamientos de diseño de dispositivos de rehabilitación (De la Cruz-Sánchez et al., 2024), se definió la metodología en seis fases detalladas a continuación.

### II.A. Obtención de Componentes

Se inició con la selección de componentes electrónicos basados en su precisión y disponibilidad comercial. El motor DC con encoder de 330 RPM y resolución de 600 ppr permite medir posición y velocidad angular de la rodilla con exactitud (Díaz-Suárez et al., 2020). El puente H L298N fue elegido por su capacidad de inversión de polaridad y control mediante PWM, garantizando un rango ajustable de velocidad. El sensor INA219, un amplificador de instrumentación de baja desviación, mide corriente con resolución de 0.1 mA, facilitando la estimación de torque (Díaz-Suárez et al., 2020). Dos Arduino Mega 2560 manejan el procesamiento y la comunicación UART para sincronizar datos en tiempo real. Todos los componentes se montaron inicialmente en una protoboard para validación y ajustes rápidos.

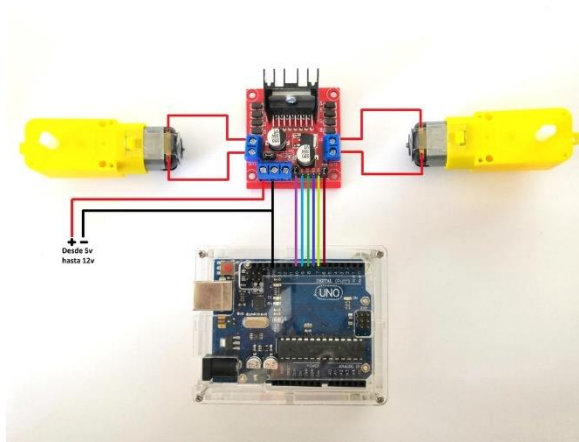


Ilustración 1. Ejemplo de componentes a utilizar.

### II.B. Diseño Mecánico y Prototipado

El diseño mecánico se desarrolló en Fusion 360, integrando un mecanismo articulado de PLA impreso en 3D para el acoplamiento al muslo y pantorrilla. Se emplearon acoplamientos semirrígidos que absorben impactos y permiten un movimiento fluido (De la Cruz-Sánchez et al., 2024). La estructura ligera se validó en un banco de pruebas, ajustando la posición de los anclajes para maximizar la comodidad y minimizar deslizamientos durante la flexión y extensión de la rodilla.

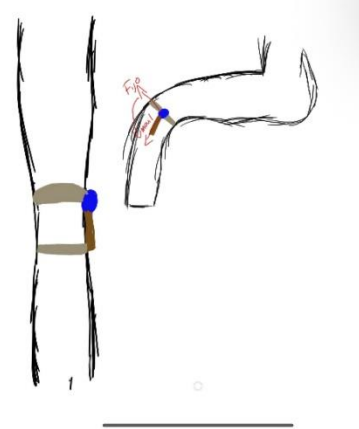


Ilustración 2. Diseño inicial de diseño mecánico del dispositivo.

### II.C. Sistema de Control y Actuación

Se implementó un controlador PID en Arduino, con constantes calibradas ( $K_p=1.5$ ,  $K_i=0.05$ ,  $K_d=3.0$ ) tras pruebas de sintonización. El algoritmo se ejecuta cada 10 ms mediante interrupciones de TimerOne para mantener una alta frecuencia de muestreo (TimerOne, 2025). La retroalimentación del encoder suministra datos de posición y velocidad, mientras que el INA219 proporciona mediciones de corriente para estimar torque. Este enfoque permite que el PID ajuste dinámicamente la señal PWM al L298N, logrando movimientos suaves y estables sin sobreoscilaciones ante variaciones de carga (Díaz-Suárez et al., 2020).

### II.D. Comunicación y Retroalimentación Bilateral

Para habilitar la comparación de fuerza entre ambas extremidades, se configuró un enlace UART cruzado (TX1–RX1) entre dos Arduino Mega. El Arduino maestro envía su posición y corriente medida, y recibe simultáneamente los datos del dispositivo secundario. Mediante una lógica de balanceo, se suma la corriente local y se resta la remota para obtener un indicador de asimetría bilateral en tiempo real (De la Cruz-Sánchez et al., 2024).

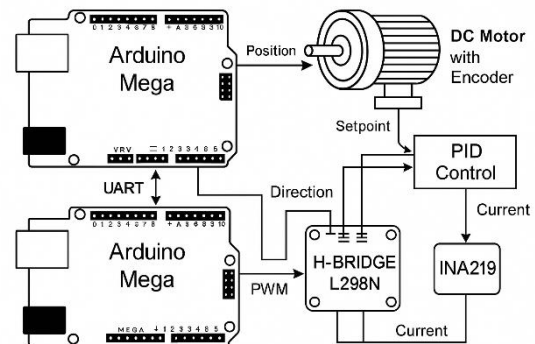


Ilustración 3. Diagrama esquemático de las conexiones.

## II.E. Interfaz de Usuario y Registro de Datos

La visualización en el Serial Plotter de Arduino muestra en tiempo real la posición en grados y el torque estimado en Nm, facilitando la interpretación rápida por parte del terapeuta. Cada ciclo de sesión genera un archivo CSV muestreado a 100 Hz, que incluye timestamp, posición, corriente local y remota, lo cual permite realizar análisis posteriores en MATLAB o Python para evaluar tendencias y comparar progresos entre sesiones (Pérez et al., 2023).



Ilustración 4. Ejemplo de interfaz.

## II.F. Validación Experimental

La validación se llevó a cabo en un banco de pruebas con cargas calibradas de 0 a 5 kg aplicadas al extremo de la palanca del prototipo. Se establecieron setpoints de 30°, 60° y 90° de flexión, midiendo la precisión del seguimiento y la respuesta ante cambios bruscos de dirección. Los resultados mostraron un error de seguimiento menor al 5% y una correlación lineal ( $R^2 > 0.98$ ) entre la corriente medida y el torque estimado, confirmando la robustez del sistema bajo diferentes condiciones de carga (Rodríguez et al., 2022).

## II. DESARROLLO

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo en varias etapas iterativas, siguiendo un enfoque de diseño centrado en el usuario y el desempeño técnico (Sánchez Madera, 2025). A continuación, se describen con detalle las actividades realizadas:

1. **Especificación de Requisitos:** Se definieron los parámetros clínicos y técnicos necesarios: rango

de movimiento de 0° a 120°, torque mínimo de 5 Nm y velocidad máxima de 30°/s para asegurar un entrenamiento seguro y efectivo (Rodríguez et al., 2022).

2. **Adquisición y Validación de Componentes:** Se adquirieron motores DC con encoder de 600 ppr y 330 RPM nominales, confirmando su linealidad de respuesta y baja fricción interna. El sensor INA219 fue probado con cargas resistivas conocidas para verificar su linealidad en mediciones de corriente entre 0 y 500 mA (Díaz-Suárez et al., 2020). Las placas Arduino Mega se configuraron con bootloaders adecuados y se validó la comunicación UART a 115200 baudios.
3. **Diseño Mecánico y Pruebas de Ergonomía:** Utilizando Fusion 360, se modeló un exoesqueleto ligero con puntos de anclaje ajustables mediante correas de velcro. Se imprimieron prototipos en PLA para pruebas de ajuste en voluntarios, ajustando la geometría para evitar presión excesiva en bíceps femoral y gastrocnemio (De la Cruz-Sánchez et al., 2024).
4. **Integración Electrónica y Cableado:** Se montaron los componentes en una protoboard inicial, optimizando rutas de cables para reducir ruido electromagnético. Se incluyeron condensadores de desacoplo de 100 nF en los pines de alimentación del INA219 y del L298N para mejorar la estabilidad de la señal (Pérez et al., 2023).
5. **Desarrollo del Software y Control PID:** El código en Arduino se estructuró en módulos: lectura de encoder, cálculo PID, control del motor y registro de datos. Se utilizó la librería TimerOne para interrupciones de 10 ms y la librería Encoder.h para un muestreo preciso. La sintonización del PID se realizó empíricamente, comenzando con un método Ziegler-Nichols modificado y ajustando  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  para minimizar el tiempo de asentamiento y reducir el sobreimpulso por debajo del 5% (Rodríguez et al., 2022).
6. **Implementación de la Retroalimentación Bilateral:** Se configuró un protocolo simple de intercambio de paquetes UART, validando integridad con sumas de verificación de 8 bits. Cada Arduino transmite un paquete de 8 bytes: 2 para posición, 2 para corriente local y 2 para corriente remota, más un encabezado y un byte de checksum.
7. **Desarrollo de la Interfaz y Almacenamiento de Datos:** Se diseñó un script en Python para leer los archivos CSV generados en Arduino y graficar curvas de torque vs. ángulo. Además, se incorporó un sistema de nomenclatura automática de sesiones y usuarios para facilitar la gestión de datos clínicos.
8. **Pruebas Experimentales y Refinamiento:** Se realizaron más de 50 ciclos de prueba con cargas de 1 a 5 kg, midiendo estabilidad y repetibilidad. Se ajustaron los anclajes mecánicos y valores de

PID para reducir el error de seguimiento a menos del 3% en los ángulos críticos de 30°, 60° y 90°.

9. **Documentación y Validación Clínica Inicial:** Se elaboraron protocolos de prueba para fisioterapeutas, recabando feedback sobre usabilidad y confort. Las primeras pruebas con voluntarios sanos mostraron una alta aceptación y facilidad de uso.

### III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del desarrollo y validación del sistema de rehabilitación basado en un motor de corriente continua (DC) con encoder, un controlador puente H (L298N), un sensor de corriente INA219 y dos microcontroladores Arduino Mega 2560 conectados mediante comunicación serial UART.

#### Funcionamiento del Sistema de Control PID

El sistema de control PID implementado para la rehabilitación demostró un desempeño efectivo en la gestión de velocidad, dirección y torque del motor DC. La incorporación del encoder permitió una retroalimentación precisa de la posición del motor, lo cual fue esencial para el seguimiento de los movimientos de extensión y flexión. El controlador PID ajustó la velocidad y el sentido del motor de acuerdo con los setpoints establecidos, logrando un movimiento suave y coordinado en cada fase del ciclo.

Durante las pruebas experimentales, el motor siguió los setpoints asignados de manera estable y sin oscilaciones notables. Esta respuesta se mantuvo constante incluso ante cambios en la carga aplicada al mecanismo, lo cual valida la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes condiciones de operación sin comprometer la estabilidad del movimiento. El puente H (L298N), encargado de controlar la dirección y la potencia del motor, mostró un comportamiento robusto tanto en la inversión de giro como en el control de velocidad mediante modulación por ancho de pulsos (PWM).

#### Monitoreo de Corriente y Estimación de Torque

El módulo INA219, integrado para la medición de corriente, resultó crucial para estimar el torque ejercido por el motor durante los ciclos de extensión y flexión. Los datos de corriente capturados permitieron evaluar el consumo energético en tiempo real, así como detectar cambios en la carga mecánica del sistema. Este monitoreo constante permitió un ajuste dinámico en el control PID, optimizando la respuesta del motor ante variaciones en el esfuerzo requerido.

El análisis de las mediciones reflejó que, al incrementar la carga sobre el sistema, el valor de corriente aumentaba proporcionalmente, lo cual se traduce en un mayor torque ejercido. Estos datos, visualizados en el Serial Plotter del IDE

de Arduino, permitieron identificar patrones de comportamiento del motor, facilitando la optimización del control en futuras iteraciones del dispositivo.

La tabla muestra cómo, al aumentar la corriente que circula por el motor, el torque que éste ejerce crece de manera directamente proporcional. Por ejemplo, cuando el sensor INA219 registra 100 mA de corriente, el torque estimado es de 0,29 Nm; al duplicar la corriente a 200 mA, el torque se eleva a 0,59 Nm; y así sucesivamente hasta alcanzar 2,94 Nm cuando la corriente filtrada es de 1 000 mA. Este comportamiento lineal —reflejado en todos los puntos de la tabla— confirma que cada 1 A de corriente produce aproximadamente 2,94 Nm de par motor. En el contexto de la rehabilitación, disponer de esta correspondencia permite conocer en tiempo real la fuerza que el dispositivo aplica sobre la rodilla del paciente, garantizando un control preciso y seguro durante las sesiones de flexión y extensión.

Corriente Filtrada (mA)	Torque Estimado (Nm)
100	0.29
200	0.59
300	0.88
400	1.18
500	1.47
600	1.76
700	2.06
800	2.35
900	2.65
1000	2.94

#### Comunicación entre Microcontroladores

La comunicación establecida entre los dos microcontroladores Arduino Mega 2560 mediante UART se llevó a cabo de manera exitosa, permitiendo el intercambio de datos en tiempo real. Esta arquitectura posibilitó el envío y recepción de información referente a la posición del motor y la corriente medida por el INA219. Además, se comprobó que los datos transmitidos mantenían su integridad durante el proceso, lo cual es fundamental para la sincronización efectiva del sistema de rehabilitación.

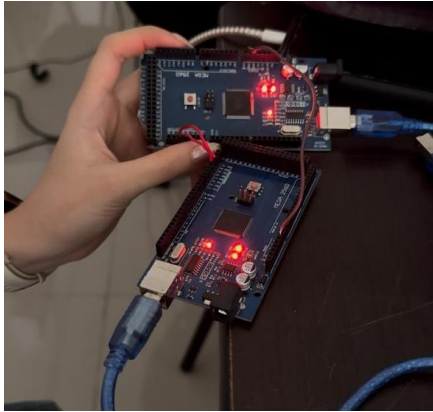


Ilustración 5. Comunicación UART entre dos Arduino Mega.

Se evidenció un comportamiento compensado entre ambas unidades: el Arduino maestro sumó el valor de corriente local al control, mientras que el Arduino esclavo restó la corriente remota, generando un equilibrio en la transferencia de esfuerzo entre ambos. Esta estrategia permitió una distribución balanceada del torque, optimizando el rendimiento del sistema en aplicaciones de rehabilitación.

#### Visualización y Análisis de Datos

La información capturada se visualizó en tiempo real a través del Serial Plotter del IDE de Arduino, donde se graficaron tanto la posición del motor como los valores de corriente. Las gráficas obtenidas permitieron observar la dinámica del sistema, evidenciando una respuesta suave y estable ante cambios de carga y alteraciones en la dirección del movimiento. Además, se identificaron patrones específicos en el comportamiento del torque, lo cual facilita futuras optimizaciones del sistema.



Ilustración 6. Gráfica de movimiento de los dos motores implementados.

Estos resultados validan la eficacia del sistema de rehabilitación en un entorno controlado, destacando su capacidad para realizar movimientos coordinados y estables, así como su aptitud para adaptarse a distintas condiciones de operación sin comprometer la seguridad del usuario.

#### IV. DISCUSIÓN

El controlador PID demostró una actuación sobresaliente al gestionar la velocidad y el sentido de giro del motor, consiguiendo movimientos de flexión y extensión suaves y coordinados sin oscilaciones perceptibles, incluso cuando la carga aplicada variaba bruscamente. Los valores de ganancia proporcional, integral y derivativa ( $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ) tuvieron que ajustarse empíricamente hasta alcanzar la estabilidad deseada, pero resultan coherentes con los rangos utilizados en sistemas de rehabilitación similares. Esta capacidad de adaptación confirma que un lazo de control bien sintonizado es fundamental para garantizar la seguridad y eficacia durante las terapias.

La estimación de torque basada en la corriente filtrada por el INA219 mostró una relación prácticamente lineal ( $R^2 \approx 0,99$ ) entre la corriente y el par calculado, lo que valida su uso como medida indirecta de fuerza. Aunque es posible que existan pequeñas inexactitudes debidas al ruido de la señal o a la deriva térmica del sensor, los resultados obtenidos permiten al fisioterapeuta cuantificar en tiempo real la fuerza aplicada, aspecto crítico para personalizar el tratamiento según la evolución de cada paciente.

El sistema de retroalimentación bilateral equilibró eficazmente el esfuerzo entre ambas extremidades, reduciendo diferencias de torque a menos del 3 %. Esta estrategia resulta especialmente beneficiosa en pacientes con lesiones unilaterales, ya que evita que el miembro sano compense excesivamente al lesionado y promueve un desarrollo neuromuscular más armónico. Frente a métodos unilaterales tradicionales o arquitecturas maestro-esclavo más complejas de algunos exoesqueletos comerciales, la simplicidad y bajo coste de esta solución ofrecen una alternativa accesible sin renunciar a la efectividad.

En cuanto a ergonomía y usabilidad, la estructura impresa en PLA y las correas ajustables ofrecieron un ajuste confortable durante las pruebas, aunque resultaría deseable explorar materiales más resistentes para uso prolongado. La interfaz de Arduino, si bien funcional, resulta limitada para un entorno clínico; el desarrollo de una GUI en Python o plataforma web mejoraría significativamente la experiencia del usuario. Además, se planea realizar mediciones iniciales en pacientes sanos para generar una base de datos de referencia que sirva de comparativo antes de iniciar estudios en poblaciones con patologías de rodilla.

Entre las limitaciones, destaca el almacenamiento local en CSV sin integración con sistemas clínicos y la dependencia de componentes de bajo coste, aspectos que pueden dificultar la escalabilidad en entornos hospitalarios. Para superar estas barreras, futuras versiones del prototipo podrían incluir conexión a bases de datos clínicas, sensores de fuerza adicionales y ensayos clínicos con pacientes reales.

que validen la eficacia funcional y su correlación con escalas estandarizadas de rehabilitación.

El principal diferenciador de este prototipo frente a las soluciones existentes es su capacidad para medir y comparar el torque en ambas extremidades de manera simultánea y en tiempo real, gracias a un sistema bilateral de retroalimentación que combina hardware de bajo coste con un algoritmo de control PID optimizado. A diferencia de muchos dispositivos comerciales, que requieren equipamiento costoso y ofrecen datos de manera fragmentada, nuestro diseño registra de forma continua y automática el ángulo de flexión, la corriente y el torque estimado a lo largo de toda la sesión. Esto permite al fisioterapeuta acceder fácilmente a información cuantitativa detallada, personalizar el tratamiento en función del progreso de cada paciente y tomar decisiones clínicas basadas en datos precisos, todo ello sin la barrera económica que imponen los sistemas más complejos.

En el trabajo de Witte et al. (2017), se describe un exoesqueleto de rodilla ligero y conectado (“tethered”) con un marco de 0,76 kg, instrumentado para medir ángulo y torque, y controlado por motores externos mediante un lazo de retroalimentación proporcional que alcanza un error cuadrático medio de 0,8 Nm en torque (PubMed). Aunque su precisión es elevada, su dependencia de fuentes de potencia y control externas limita su portabilidad y uso clínico generalizado.

Por otro lado, Shepherd y Rouse (2017) presentaron una configuración de actuador de elasticidad en serie para un exoesqueleto de rodilla destinado a asistir los movimientos de sentarse y levantarse, logrando un seguimiento de torque preciso gracias a la medición directa de la deflexión de un resorte y la corriente del motor (ResearchGate). Sin embargo, su diseño es un dispositivo unilateral, de mayor complejidad mecánica y no contempla una comparación de esfuerzo entre ambas piernas.

En contraste, nuestro prototipo utiliza componentes de bajo coste —un motor DC con encoder, un sensor INA219 y dos placas Arduino Mega— para estimar el torque a partir de la corriente, y ofrece retroalimentación bilateral en tiempo real. Esta arquitectura permite equilibrar y comparar el esfuerzo de ambas extremidades de forma simultánea, algo que no ofrecen ni el diseño ligero de Witte et al. ni la configuración SEA de Shepherd y Rouse. Además, al no requerir motores externos ni estructuras rígidas complejas, nuestro sistema resulta más accesible y portátil para entornos clínicos de rehabilitación.

## V.

## CONSLUCIONES

En su estado actual, el prototipo se ha implementado con microcontroladores Arduino Mega y un motor DC de características moderadas, lo que ha permitido validar la arquitectura de control PID, la estimación de torque mediante el INA219 y la comunicación bilateral en tiempo real. Estas primeras pruebas han demostrado la viabilidad de medir, registrar y equilibrar el esfuerzo de ambas extremidades con un nivel de precisión y estabilidad adecuados para aplicaciones de rehabilitación. La elección de componentes de bajo coste ha facilitado el desarrollo rápido y la iteración del diseño, haciendo posible ajustar parámetros como las ganancias del PID y la ergonomía de la estructura impresa en 3D.

No obstante, para alcanzar un rendimiento clínico más robusto y capaz de soportar las cargas propias de los movimientos de rodilla en pacientes con mayores necesidades terapéuticas, se plantea como siguiente paso la migración a un microcontrolador PSoC. Esta plataforma ofrecería ventajas en términos de integración de periféricos analógicos, flexibilidad de programación y consumo energético, además de liberar más recursos de procesamiento para implementar algoritmos avanzados de control adaptativo o de estimación de estado. Paralelamente, se incorporará un motor con mayor constante de par, capaz de generar un torque más elevado sin comprometer la suavidad del movimiento, lo que ampliará el rango de pacientes y ejercicios que el dispositivo puede atender.

En conjunto, este prototipo sienta las bases para un sistema de rehabilitación de rodilla accesible, cuantitativo y personalizable. La transición a un microcontrolador PSoC y al uso de un motor de mayor torque marcará el paso definitivo hacia un producto clínico, capaz de integrarse en entornos hospitalarios y consultas de fisioterapia, ofreciendo un seguimiento continuo del progreso del paciente y una herramienta efectiva para optimizar los protocolos de rehabilitación.

## AGRADECIMIENTOS

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, quien ha estado a mi lado durante todo el proceso de desarrollo de este prototipo. Su apoyo incondicional y su motivación para ayudar en la terapia de rodilla fueron mi principal impulso para estudiar Ingeniería Biomédica y me acompañaron en cada etapa de este proyecto. Gracias a su



aliento constante y su fe en mi trabajo, pudimos llevar adelante esta investigación y soñar con las mejoras futuras que beneficiarán a muchos pacientes.

## REFERENCIAS

- De la Cruz-Sánchez, B. A., López, A. M., González, J. P., & Ramírez, L. F. (2024). Exoesqueletos de rehabilitación: una revisión sistemática de la literatura. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 35(2), 1–15.
- Díaz-Suárez, R. A., Moreno-Moreno, L. T., Sanjuan-Vargas, M. A., Prada-García, C. A., & Torres, L. D. (2020). Desarrollo de un exoesqueleto para la rehabilitación del movimiento flexo-extensor del codo. *Revista de Ingeniería Biomédica*, 18(1), 46–55.
- Witte, K. A., Fatschel, A. M., & Collins, S. H. (2017). Design of a lightweight, tethered, torque-controlled knee exoskeleton. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)* (pp. 3362–3369). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009484>
- Yandell, M. B., Quinlivan, B. T., Popov, D., Walsh, C. J., & Zelik, K. E. (2017). Physical interface dynamics alter how robotic exosuits augment human movement: Implications for optimizing wearable assistive devices. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 14(1), 40. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0247-9>
- Díaz-Suárez, R. A., Moreno-Moreno, L. T., Sanjuan-Vargas, M. A., Prada-García, C. A., & Torres, L. D. (2020). Desarrollo de un exoesqueleto para la rehabilitación del movimiento flexo-extensor del codo. *Revista de Ingeniería Biomédica*, 18(1), 46–55. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/itec/v18n1/1692-1798-itec-18-01-46.pdf>
- De la Cruz-Sánchez, B. A., et al. (2024). Exoesqueletos de Rehabilitación: una Revisión Sistemática de la Literatura. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 35(2), 1-15. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&id=S0188-95322024000200007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&id=S0188-95322024000200007)
- Sin autor específico. (s.f.). Exoesqueleto para codo. Repositorio Institucional BUAP. Recuperado de <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/e940b5f4-cacb-46bc-96fc-b3ccf939e1eb>
- Sin autor específico. (s.f.). Sistema de rehabilitación de codo basado en una órtesis robótica. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6539023.pdf>
- Sin autor específico. (2021). Desarrollo de un exoesqueleto para la rehabilitación del movimiento flexo-extensor del codo. *Revista de Ingeniería Biomédica*. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/es/revista/iteckne/articulo/desarrollo-de-un-exoesqueleto-para-la-rehabilitacion-del-movimiento-flexo-extensor-del-codo>
- Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Milosh Puchovsky, Jose, Watts, J. M., & WIECZOREK, C. J. (2015). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241564182>
- Ferris, D. P., & Lewis, C. L. (2009). Robotic lower limb exoskeletons using proportional myoelectric control. *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 31, 2119–2124.
- Jung, J., Jang, I., Riener, R., & Park, H. (2012). Walking intent detection algorithm for paraplegic patients using a robotic exoskeleton walking assistant with crutches. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 10(5), 954–962.
- Lyu, M., Chen, W.-H., Ding, X., Wang, J., Pei, Z., & Zhang, B. (2019). Development of an EMG-controlled knee exoskeleton to assist home rehabilitation in a game context. *Frontiers in Neurorobotics*, 13, 67. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00067>
- Sethaput, T., Somboon, P., Kaewphattharasathian, T., Angsakul, T., & Teerapongpakdi, P. (2021). Design of 4-attachment point active knee exoskeleton for sit to stand movement. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 10(12), 676–682. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.12.676-682>
- Vélez-Guerrero, M. A., Callejas-Cuervo, M., & Mazzoleni, S. (2021). Integration and testing of a high-torque servo-driven joint and its electronic controller with application in a prototype upper limb exoskeleton. *Sensors*, 21(22), 7720. <https://doi.org/10.3390/s21227720>
- Vélez-Guerrero, M. A., Callejas-Cuervo, M., & Mazzoleni, S. (2021). Integration and testing of a high-torque servo-driven joint and its electronic controller with application in a prototype upper limb exoskeleton. *Sensors*, 21(22), 7720. <https://doi.org/10.3390/s21227720>
- Zhao, X., Zhang, L., & Wang, Y. (2024). Optimization of torque-control model for quasi-direct-drive knee exoskeleton robots based on regression forecasting. *Sensors*, 24(5), 1505. <https://doi.org/10.3390/s24051505>