

Desarrollo y evaluación de un exoesqueleto de rodilla: Innovación terapéutica para rehabilitación efectiva y accesible

Development and evaluation of a knee exoskeleton: Therapeutic innovation for effective and accessible rehabilitation.

Michael José Albán-Galárraga ¹[<https://orcid.org/0009-0008-6111-0787>], Darwin Gustavo Jaque-Puca ²,
[<https://orcid.org/0009-0002-7959-4210>], Juan Carlos Muyulema-Allaica ³[<https://orcid.org/0000-0002-9663-8935>],
Carla Gabriela Coque-Patiño ⁴[<https://orcid.org/0009-0009-4062-7186>]

¹ Universidad Internacional SEK Ecuador - Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas - Maestría en Diseño Industrial y de Procesos, 170134, Quito, Pichincha - Ecuador

² Universidad Estatal Península de Santa Elena - Facultad de Ciencias Agrarias - Carrera de Ingeniería Agropecuaria, 240204, La Libertad, Santa Elena - Ecuador

³ Universidad Estatal Península de Santa Elena – Facultad de Ciencias de la Ingeniería – Carrera de Ingeniería industrial, 240204, La Libertad, Santa Elena–Ecuador

⁴ Investigadora independiente, 180212, Ambato, Tungurahua–Ecuador

¹michael.alban@uisek.edu.ec, ²djaque@upse.edu.ec, ³ejmuyulema@upse.edu.ec, ⁴gabbycarly@hotmail.com

CITA EN APA:

Albán-Galárraga M. J., Jaque-Puca, D. G., Muyulema Allaica, J. C. M. A., & Coque-Patiño, C. G. (2024). Desarrollo y evaluación de un exoesqueleto de rodilla: Innovación terapéutica para rehabilitación efectiva y accesible. *Technology Rain Journal*, 3(1).
<https://doi.org/10.55204/trj.v3i1.e28>

Recibido: 8 de enero 2024
Aceptado: 29 de febrero 2024
Publicado: 5 de marzo 2024

Technology Rain Journal
ISSN: ISSN: 2953-464X



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

Resumen. El exoesqueleto motorizado es un robot portátil que puede proporcionar movimiento asistido por energía para el cuerpo humano. La investigación se planteó dos hitos objetivos: a) realizar el diseño y la fabricación de un prototipo de exoesqueleto para la rehabilitación de la rodilla utilizando fabricación aditiva (FDM) y b) evaluar el prototipo de exoesqueleto desarrollado como innovación terapéutica para la rehabilitación efectiva y accesible de rodilla. El método adoptó un enfoque experimental y cualitativo para la conceptualización y producción de un prototipo fabricado mediante FDM, destinado a replicar movimientos de extensión y flexión en un rango angular de 0° a 90°. El prototipo estuvo compuesto por una estructura metálica ajustable a diferentes alturas, con soportes de muslo y tibia. Se usó poliláctico (PLA) como material de manufactura 3D. Las dimensiones se determinaron utilizando tablas antropométricas Acopla95, para una población de 20 a 39 años. Para el seguimiento de las rutinas de rehabilitación, se creó una aplicación móvil que permitió ingresar datos como ángulo de flexión, número de series, repeticiones, tiempos de espera y tres velocidades de movimiento, la primera al 1% (35 grados/min), la segunda al 50% (70 grados/min) y la tercera al 100% (135 grados/min). El estudio reveló que el prototipo logra una precisión del 98% en la ejecución del ángulo de flexión deseado, con una variación máxima de 3 grados para un ángulo de 90 grados y 1 grado para otras medidas específicas.

Palabras Clave: Diseño, exoesqueleto, prototipo, rodilla, rehabilitación, flexión, extensión.

Abstract: The motorized exoskeleton is a portable robot that can provide power-assisted movement for the human body. The research had two milestone objectives: a) to design and manufacture a prototype exoskeleton for knee rehabilitation using additive manufacturing (FDM) and b) to evaluate the developed exoskeleton prototype as a therapeutic innovation for effective and affordable knee rehabilitation. The method

adopted an experimental and qualitative approach for the conceptualization and production of a prototype manufactured by FDM, intended to replicate extension and bending movements in an angular range from 0° to 90°. The prototype consisted of a metallic structure adjustable to different heights, with thigh and tibia supports. Lactic polyacid (PLA) was used as 3D manufacturing material. The dimensions were determined using Acopla95 anthropometric tables for a population aged 20 to 39 years. For tracking rehabilitation routines, a mobile application was created, allowing input of data such as flexion angle, number of sets, repetitions, wait times, and three movement speeds, the first at 1% (35 degrees/min), the second at 50% (70 degrees/min), and the third at 100% (135 degrees/min). The study revealed that the prototype achieves a 98% accuracy in executing the desired flexion angle, with a maximum variation of 3 degrees for a 90-degree angle and 1 degree for other specific measurements.

Keywords: Design, exoskeleton, prototype, knee, rehabilitation, flexion, extension.

1. INTRODUCCIÓN

El ser humano al desempeñar sus actividades físicas cotidianas mediante su interacción física con el medio que lo rodea está expuesto a sufrir lesiones en sus distintas articulaciones y a consecuencia de ello limitar su capacidad de movilidad (Villamarín-Arévalo et al., 2019). En este ámbito es de vital importancia realizar los tratamientos necesarios y de una manera adecuada para garantizar una óptima recuperación sin secuelas posteriores tales como limitaciones en los rangos normales de movimiento de las articulaciones lesionadas (Holm et al., 2023; Medeiros et al., 2024).

La rehabilitación de la rodilla desempeña un papel crucial para pacientes postquirúrgicos o aquellos que experimentan limitaciones en la movilidad debido a diversas patologías (Hong et al., 2023). Ya sea postoperatorio o como consecuencia de otra afección, la realización de sesiones de terapia física resulta imperativa para abordar y mejorar significativamente los problemas que afectan a esta articulación (Yeung et al., 2022). Durante los procedimientos clínicos de rehabilitación, se llevan a cabo ejercicios específicos de estiramiento y flexión. Estos ejercicios están diseñados para reforzar la robustez y la capacidad de resistencia de los ligamentos, músculos y tendones que componen la complicada anatomía de la rodilla (Bamdad et al., 2022). El objetivo primordial es lograr un notable incremento en la capacidad que poseen los pacientes para moverse. Al completar los períodos de terapia física, se espera que los individuos hayan experimentado mejoras significativas en la funcionalidad y movilidad de la rodilla, contribuyendo así a su recuperación integral (Mistry et al., 2016; Domínguez-Navarro et al., 2018; Grinberg et al., 2020).

Durante la última década, se han desarrollado dispositivos médicos portátiles como exoesqueletos (Escalante et al., 2020; Yang et al., 2022; Wang et al., 2024; Akhtaruzzaman et al., 2024) y órtesis activas (Daachi et al., 2015; Lozano et al., 2022; DeBoer et al., 2023) que utilizan

tecnologías robóticas para pacientes con discapacidades para caminar. Los exoesqueletos pueden categorizarse según su funcionalidad como activos o pasivos. Los exoesqueletos activos son aquellos que realizan movimientos utilizando actuadores alimentados por energía eléctrica, principalmente. En contraste, los exoesqueletos pasivos realizan sus movimientos mediante componentes mecánicos, como resortes o amortiguadores, sin necesidad de energía externa (De la Tejera et al., 2021).

Más allá de su mecanismo de accionamiento, los exoesqueletos pueden clasificarse en tres categorías principales: exoesqueletos de potenciación, de asistencia y de rehabilitación (Escalante et al., 2020; Yang et al., 2022). En este sentido, los exoesqueletos de rehabilitación tienen como objetivo principal el entrenamiento de los músculos y el sistema nervioso a través de la repetición de movimientos predefinidos (Triwiyanto et al., 2023; He et al., 2024). Los exoesqueletos de rodilla generalmente están diseñados con una configuración antropomórfica, que puede proporcionar fuerza/torque de asistencia controlable para los usuarios para la movilidad iniciada por el usuario con los actuadores equipados y múltiples sensores (Sun et al., 2023). Además del propósito de la rehabilitación de la marcha, los exoesqueletos de rodilla también se desarrollan para aumentar el rendimiento humano en la marcha normal humana, la marcha cargada y la carrera (Chaparro-Cárdenas et al., 2018; Chen et al., 2019). Pueden mejorar la fuerza, la resistencia y la velocidad del usuario al proporcionar la mayor parte de la energía necesaria para realizar las tareas.

El uso apropiado de terapias asistidas por exoesqueletos de rehabilitación ha demostrado ofrecer diversas ventajas en comparación con las técnicas tradicionales (Yang et al., 2022; Triwiyanto et al., 2023). Esto se debe a la posibilidad de llevar a cabo sesiones y repeticiones de manera planificada y autónoma dentro de un lapso de tiempo determinado (Wu & Chen, 2023). Además, el empleo de exoesqueletos descarga la carga física del profesional encargado de llevar a cabo estas sesiones, lo que contribuye a reducir los tiempos requeridos para la recuperación del paciente. Esta evolución tecnológica no solo mejora la eficiencia de la rehabilitación, sino que también presenta un enfoque más accesible y eficaz para abordar los desafíos asociados con la movilidad limitada en las extremidades (Gassert & Dietz, 2018; Shi et al., 2019).

En términos generales, hay dos categorías principales de dispositivos utilizados en la terapia física: los elementos de fijación y los exoesqueletos (Chen et al., 2019). La diferencia principal radica en que los elementos de fijación se emplean con el propósito impedir el libre movimiento de las partes comprometidas o para solucionar inconvenientes particulares, mientras tanto, los exoesqueletos se encuentran diseñados para asistir durante la fase recuperación de articulaciones y extremidades con limitaciones en su movimiento (Alqahtani et al., 2020).

El desarrollo de exoesqueletos diseñados para extremidades inferiores tuvo sus inicios durante la década de los años sesenta, centrado principalmente en brindar soporte y asistencia a personas con lesiones en la médula espinal, facilitando su capacidad para volver a caminar (Escalante et al., 2020; Yang et al., 2022; Sun et al., 2023). Aunque actualmente hay una variedad de marcas y modelos de exoesqueletos para la rehabilitación de extremidades superiores e inferiores, su disponibilidad en el ámbito médico está severamente limitada debido a los altos precios de venta, complejidad en su estructura, diseño y modo de uso (Gorgey, 2018).

Este limitado acceso se debe en gran medida a que la mayoría de estos equipos están diseñados como unidades integrales, sin considerar la posibilidad de rehabilitar una región corporal específica en lugar de un grupo completo de extremidades (Sun et al., 2023; Triwiyanto et al., 2023). La restricción financiera y la falta de adaptabilidad a necesidades específicas representan barreras significativas para la implementación generalizada de estos dispositivos en entornos médicos, a pesar de su potencial impacto positivo en la rehabilitación física (Gorgey, 2018).

Con los avances tecnológicas para apoyar a la rehabilitación física, así como los materiales y procesos utilizados en la fabricación de estos dispositivos, se han experimentado mejoras sustanciales en estos dispositivos a lo largo de los años (Hsu et al., 2023; Tang et al., 2024). En la actualidad, se destaca una técnica de fabricación de partes conocida como manufactura aditiva (FMD), a la cual también se la denomina comúnmente como impresión 3D (Triwiyanto et al., 2023). La principal ventaja de esta forma de fabricación radica en el uso de materiales de bajo costo, lo que resulta en productos livianos y personalizables según las características físicas de cada individuo.

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, es un método para crear objetos sólidos tridimensionales a partir de un archivo digital (Kanishka & Acherjee, 2023). Esta técnica se puede utilizar para crear objetos 3D complicados con muy poco peso. No hay desperdicio de material, a diferencia de la fabricación tradicional. Es una vasta área de fabricación en la impresión de piezas de plásticos hasta metales (Cruz-Sanchez et al., 2020; Cui et al., 2021; Hettiarachchi et al., 2022; Bathija et al., 2023). Existen varias tecnologías de fabricación aditiva, como la estereolitografía (en acrónimo SLA del inglés, Stereo Lithography Apparatus), el Modelado por Deposición Fundida, o por sus siglas en inglés FDM (Fused Deposition Modeling), la fabricación de objetos laminados (en acrónimo LOM del inglés, Laminated Object Manufacturing), la inyección de material, entre otros. Entre todas esas tecnologías, el FDM y el SLA son tecnologías de alta precisión mediante las cuales pueden lograr estructuras mucho más finas y detalladas, y estas son las tecnologías más confiables mediante las cuales se pueden lograr resultados de alta calidad (Nagaraju et al., 2023). La FDM implica la deposición de material fundido por capas para crear un objeto sólido según un diseño previamente elaborado mediante un proceso CAD que provienen del

inglés Computer-Aided Design. Este diseño se codifica posteriormente mediante software especializado para la fabricación en una impresora 3D (Layani et al., 2018).

Además, esta técnica permite lograr funcionalidad y resistencia adecuadas a las necesidades específicas de rehabilitación, marcando un avance significativo en la creación de dispositivos más eficientes y adaptados a las demandas individuales de los pacientes (Barrios-Muriel et al., 2020).

Hoy en día, se ha observado un notable aumento en la utilización y avance de la tecnología de impresión 3D (Nagaraju et al., 2023). Esto ha dado lugar a la disponibilidad de máquinas de impresión 3D para uso doméstico, las cuales ofrecen cada vez más funciones y prestaciones (Gnanasagaran et al., 2023; Pratheesh-Kumar et al., 2023). Además, estas tecnologías han evolucionado para adaptarse a específicas aplicaciones industriales, como por ejemplo la producción de prótesis, órtesis y diversos prototipos funcionales (Varela-Aldás, 2020).

En el ámbito médico, la impresión 3D se emplea ampliamente para fabricar una variedad de productos, que van desde huesos sólidos sin porosidades internas para evitar fracturas, hasta tejidos para implantes tales como; piel, órganos e incluso modelos utilizados en la instrucción académica (Nagaraju et al., 2023). Además, se la utiliza para la producción de fármacos y otros dispositivos médicos. (Shahrubudin et al., 2019)

Desafíos identificados

Aquellas personas que enfrentan dificultades relacionadas con la movilidad de la articulación de la rodilla dependen de la asesoría profesional de expertos en fisioterapia para realizar las esenciales rutinas de extensión y flexión durante su fase de rehabilitación (Chen et al., 2019). No obstante, la ejecución de estas actividades se ve constantemente limitada por la capacidad física del individuo y el tiempo designado por el personal a cargo. Precisamente en este aspecto es en donde surgen los principales desafíos para llevar a cabo una terapia física de manera continua y efectiva (Rex, 2019).

En esta perspectiva, es esencial contar con equipamiento especializado que garantice la ejecución precisa de los programas de ejercicios de la fisioterapia de manera estable y adecuada (Escalante et al., 2020; He et al., 2024). Aquí se plantea un desafío en términos de disponibilidad de dispositivos específicos diseñados para realizar estas actividades en la región de la rodilla, especialmente en posiciones como sentado (sedente) o semiacostado (Sun et al., 2023; Yang et al., 2022). Esta limitación se debe principalmente al enfoque predominante en el desarrollo de exoesqueletos para miembros inferiores, los cuales están mayormente orientados a proporcionar asistencia durante la marcha (Chen et al., 2019). Este enfoque, a su vez, implica la creación de

dispositivos más voluminosos y con costos de fabricación más elevados (Pinto-Fernández et al., 2020).

Bajo estos contextos, mediante FDM, se planteó resolver este desafío mediante la concepción de un modelo experimental de exoesqueleto destinado a brindar asistencia en la rehabilitación de la rodilla, el cual sería confeccionado mediante el proceso de impresión 3D. Este dispositivo procuró emular los rangos de movimiento característicos de las prácticas tradicionales de rehabilitación, a la vez que permite la programación de series de repeticiones específicas para adaptarse a las necesidades individuales de cada paciente en dicha articulación.

Contexto y relevancia

La rodilla típicamente posee movimientos dentro de los cuales se incluyen principalmente la flexión y la extensión (Grinberg et al., 2020; Muniz Medeiros et al., 2021). Además de estos, la rodilla también puede experimentar movimientos de rotación, tanto interna como externa (Bamdad et al., 2022; Domínguez-Navarro et al., 2018). Aunque menos frecuentes, los movimientos de aducción y abducción también son posibles en la rodilla, aunque típicamente no se consideran en el análisis cinemático de esta articulación (Bargir et al., 2023).

En el cuerpo humano las articulaciones presentan diversos movimientos específicos, los cuales a su vez son conocidos como grados de libertad o por sus siglas en inglés DOF (Degree of Freedom). Estos DOF determinan los límites de movimiento de cada articulación y son fundamentales al diseñar equipos capaces de replicar las rutinas de rehabilitación física (Pamungkas et al., 2019).

Teniendo en cuenta las propiedades cinemáticas previamente mencionadas para la rodilla y considerando los movimientos que el prototipo debe replicar, se puede considerar a esta articulación como una especie de bisagra, lo que implica que esta tenga un único grado de libertad (Bargir et al., 2023). El modelo de bisagra se distingue por tener un eje único de rotación ubicado en el centro de los otros elementos fijos (Kuchimov et al., 2023). La realización de esta rotación, dependiendo del sentido en que se realice, resulta en la flexión o extensión de la rodilla.

En los últimos años, se han creado dispositivos dirigidos a asistir a las personas en sus procedimientos de recuperación física o a su vez para abordar dificultades motoras en diversas áreas y partes del cuerpo humano (Yeung et al., 2022). La aplicación de técnicas de rehabilitación respaldadas por la tecnología para desarrollar exoesqueletos especializados en esta área ha generado beneficios sustanciales en comparación con los métodos terapéuticos convencionales (Triwiyanto et al., 2023; He et al., 2024). Asimismo, se ha establecido un sistema estandarizado que permite la

monitorización y modificación de las repeticiones prescritas, junto con el ajuste de la intensidad durante las sesiones de fisioterapia (Gassert & Dietz, 2018; Shi et al., 2019; Lozano et al., 2022).

Por lo tanto, los exoesqueletos de rehabilitación no solo complementan eficazmente la terapia tradicional, sino que también ofrecen un potencial significativo para extender la práctica de la rehabilitación física (Triwiyanto et al., 2023; Tang et al., 2024), incluso en entornos domésticos, a través de equipos más sencillos en términos de su interacción con el usuario y en su manufactura o producción (Gassert & Dietz, 2018).

De acuerdo con estudios llevados a cabo, por Huamanchahua et al., (2021); Yang et al., (2022); Wu & Chen, (2023); Wang et al., (2024); Akhtaruzzaman et al., (2024) se ha observado que la ausencia o la realización inapropiada de la fisioterapia puede resultar en un daño permanente en la articulación del miembro afectado. Por estas razones, es crucial subrayar la relevancia de elaborar modelos de exoesqueletos específicamente orientados a la rehabilitación física asistida. El objetivo según Chaparro-Cárdenas et al., (2018); Chen et al., (2019) es ofrecer sesiones con mayor duración y consistencia en su ejecución, permitiendo así una pronta mejora en la rodilla. Además, este enfoque buscó liberar a los profesionales de las extenuantes jornadas físicas asociadas con la ejecución de estas actividades

Universidades, institutos de investigación y empresas industriales han estado investigando en el desarrollo de exoesqueletos de rodilla en las últimas décadas, y se han logrado avances notables en este campo. La creación de un exoesqueleto mediante técnicas FDM se presenta como una alternativa económica y que a su vez entrega un producto final con una reducción significativa en el tamaño del mismo. La adopción de este método de fabricación se vislumbra como una alternativa eficiente para producir exoesqueletos adaptados de manera personalizada, confortable, resistente y respetuosa con el medio ambiente, centrándose en extremidades o articulaciones específicas. En este sentido, los propósitos de este artículo son: a) realizar una propuesta de diseño e implementación de un prototipo funcional de un exoesqueleto para la ejecución de sesiones de fisioterapia para la rodilla utilizando FDM para su manufactura y b) evaluar el prototipo de exoesqueleto desarrollado como innovación terapéutica para la rehabilitación efectiva y accesible de rodilla.

2. METODOLOGÍA O MATERIALES Y METODOS

El estudio actual adopta un enfoque experimental y cualitativo con el propósito de plantear la conceptualización y producción de un modelo producido mediante FDM realizados por Sharma & Rai, (2022); Nagaraju et al., (2023); Gnanasagaran et al., (2023). Este prototipo tiene la capacidad de imitar los movimientos de extensión y flexión de la rodilla cuando se realizan estos en una posición

sentado o sedente. Su enfoque principal es hacia individuos que, independientemente de la naturaleza de su patología, necesitan participar en programas de rehabilitación para mejorar la movilidad de dicha articulación.

Las técnicas de investigación empleadas son encuestas para la validación de los resultados obtenidos y entrevistas a personal médico especializado en traumatología y en el campo de la rehabilitación física en cuanto a las técnicas y ejercicios realizados para la rehabilitación de rodilla.

Para el dimensionamiento del exoesqueleto propuesto y debido a que, en Ecuador, no se ha realizado un estudio antropométrico que detalle las características de la población en cuanto a sus diferentes dimensiones corporales, para este estudio en particular, se optará por utilizar como referencia el estudio antropométrico llevado a cabo por Estrada et al., (1998) en Colombia denominado Acopla95. Esta elección se justifica por la marcada similitud en la fisonomía entre la población ecuatoriana y colombiana. Ambos países, al pertenecer a la misma región y compartir una historia cercana, comparten rasgos y características físicas similares.

A continuación, se presentan las medidas críticas que deben tenerse en cuenta para el diseño del prototipo del exoesqueleto. Estas medidas están basadas en la posición del individuo sentado, tal como se ilustra en la Figura 1 y se toma como población masculina debido a que en esta región en general estos poseen mayores dimensiones que las mujeres de su misma edad, esto con el objetivo de abarcar la mayor variedad de edades posibles.

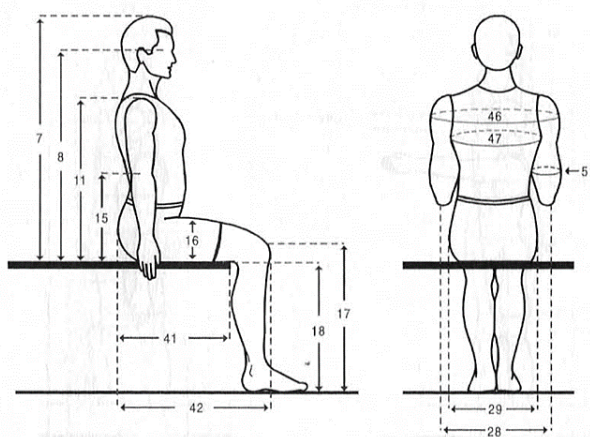


Figura 1: Medidas antropométricas para individuo sentado – Acopla95 (Estrada et al., 1998)

En la Tabla 1 se presentó algunas dimensiones antropométricas expresadas en unidades de centímetros. La selección de la población se limita a hombres entre 20 y 39 años, ya que a medida que las personas envejecen, las dimensiones generales del cuerpo tienden a disminuir. Es así que, este rango de edad posee las máximas dimensiones de medidas corporales en promedio para la población en general.

Tabla 1. Dimensiones antropométricas en cm.

Medida tomada	Percentiles			Media
	5	50	95	
41 largura nalga – fosa poplítea	42,9	47,2	51,2	47,0
18 altura de la fosa poplítea	39,5	42,9	46,5	43,0

Para la validación de las rutinas programadas para distintos ángulos y número de repeticiones mediante la app móvil, se realizó una observación del cumplimiento o no de las rutinas y por medio de la medición del ángulo de flexión con un goniómetro se registraron los resultados para validar el prototipo propuesto en función del cumplimiento de las rutinas y su exactitud.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados a continuación son el producto del estudio actual sobre el desarrollo y la creación de un modelo experimental de exoesqueleto destinado a la rehabilitación de la rodilla. utilizando FDM. Este prototipo está diseñado para emular movimientos angulares en un rango de 90° a 0°, permitiendo tanto la extensión como la flexión de la rodilla.

El prototipo de exoesqueleto propuesto está constituido por una base de metal y conformada por dos componentes: un elemento para la sujeción del fémur y uno para la tibia-peroné, los cuales se convergen alrededor de un pivote o eje para permitir los desplazamientos angulares necesarios. En esta base mecánica a su vez se coloca el soporte de fémur y tibia, fabricado utilizando FDM, con el fin de proporcionar estabilidad y confort al beneficiario de su uso. (ver Figura 2)

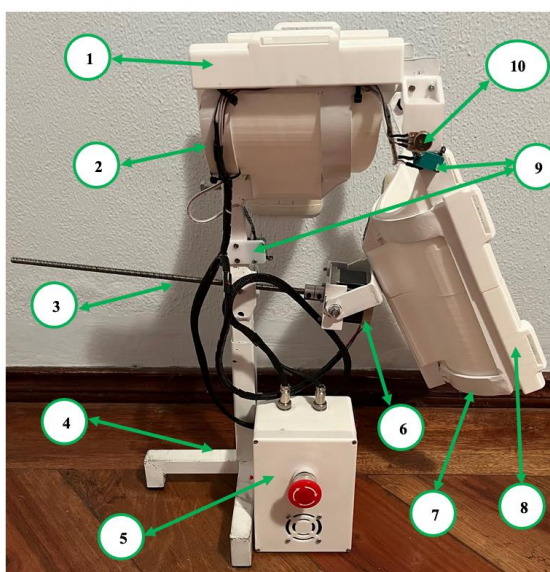


Figura 2. Prototipo de exoesqueleto para rehabilitación de rodilla.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra el listado de partes que conforman el prototipo propuesto para el estudio. Los limits switches o finales de carrera se instalan para garantizar la seguridad del usuario a 0° y 90°. Los elementos 1 y 8 son los soportes fabricados mediante manufactura FDM con material poliacido láctico (PLA) y a 60% de relleno para su impresión.

Tabla 2. Lista de partes que conforman el prototipo

Número de parte	Nombre de la parte	Cantidad
1	Soporte de muslo (PLA)	1
2	Soporte metálico de muslo	1
3	Tornillo roscado	1
4	Base metálica	1
5	Caja de control	1
6	Motor a pasos NEMA 23	1
7	Soporte metálico de tibia	1
8	Soporte de pantorrilla (PLA)	1
9	Final de carrera	2
10	Potenciómetro	1

La aplicación desarrollada (Figura 3), fue creada con el software APP Inventor y es completamente funcional con sistemas operativos móviles Android 5 y iOS 13 en adelante.



Figura 3: App celular.

Se verificó que las rutinas registradas, incluyendo todas repeticiones, series y tiempos programados fueron cumplidos en su totalidad en cada ocasión, logrando un 100% de precisión al ejecutar las rutinas (Figura 5), independientemente del ángulo o velocidad registrados. Los datos medidos se han registrado en la Tabla 3 con el objetivo de establecer la precisión del equipo para ejecutar los movimientos de flexo extensión de la rodilla según el ángulo ingresado a través de la aplicación.

Tabla 3. Validación de ángulos ingresados.

Número de medida	Ángulo ingresado	Ángulo medido	Exactitud %
1	5	4	80
2	10	9	90
3	15	15	100
4	20	20	100
5	25	25	100
6	30	30	100
7	35	35	100
8	40	40	100
9	45	45	100
10	50	50	100
11	55	55	100
12	60	60	100
13	65	65	100
14	70	70	100
15	75	75	100
16	80	80	100
17	85	84	99
18	90	87	97

Nota: Las pruebas se realizaron a 100% de velocidad para optimizar el tiempo de las mismas.

Los resultados de la Tabla 3, muestran contundentemente que el equipo realiza satisfactoriamente la flexo extensión de los ángulos establecidos para diferentes distintas rutinas registradas. El margen máximo de error registrado es de 3° para una medida angular de 90°, y de 1° para otras medidas específicas. Este análisis arroja un nivel de precisión general del sistema del 98%. El cálculo correspondiente se detalla a continuación:

$$exactitud (\%) = \frac{\Sigma \text{Total de exactitudes medidas}}{\Sigma \text{Total de exactitudes teóricas}} \times 100 \quad (1)$$

$$exactitud = \frac{1766}{1800} \times 100$$

$$exactitud = 98\%$$

La exactitud calculada del 98% representa la fiabilidad del equipo para llevar a cabo las flexiones en los diversos ángulos ingresados. En resumen, el equipo presenta un margen de error del 2% en las rutinas realizadas, lo que equivale a aproximadamente 3° en términos de ángulos. Por ende, esto posiciona al dispositivo como una alternativa apropiada y segura que cumple a cabalidad con las necesidades de las sesiones de fisioterapia para la movilidad de la rodilla con total confiabilidad (Figura 4). En tonalidad gris se presenta el porcentaje de exactitud para cada uno de los 18 ángulos evaluados en el estudio.

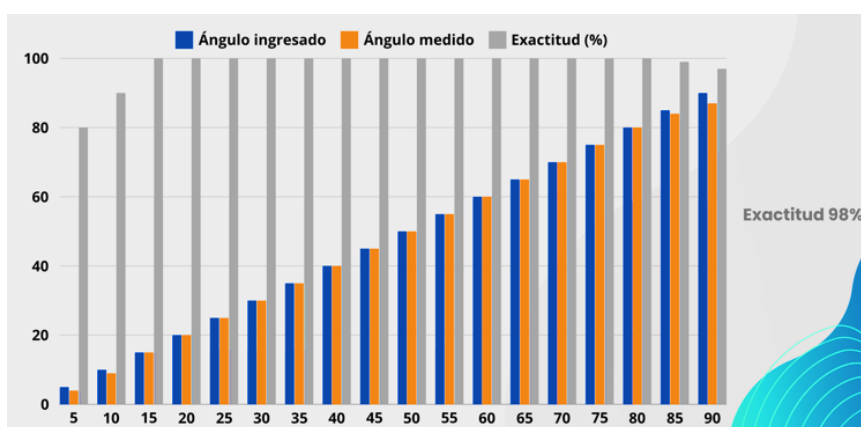


Figura 4. Exactitud del prototipo.

En la Figura 5 se evidencia la ejecución a satisfacción del prototipo al realizar las rutinas ingresadas mediante la app móvil, cumpliéndose en un 100% tanto el número de series como de repeticiones previamente ingresadas.

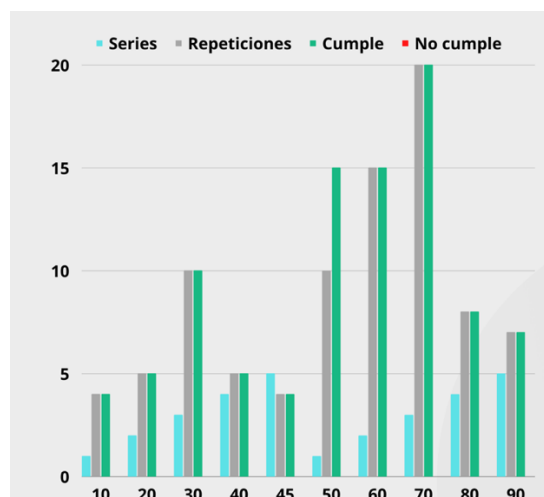


Figura 5: Cumplimiento de rutinas.

A continuación, se muestran los resultados de la encuesta efectuada a un grupo de 10 individuos sin complicaciones en sus extremidades inferiores y de manera más específica de rodilla, las cuales utilizaron el equipo con el objetivo de calificar su confort (comodidad), seguridad y aceptación general del mismo. Los detalles se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Encuesta de uso del prototipo.

Pregunta	Si	No
1. ¿Se sintió cómodo al utilizar el equipo?	10	0
2. ¿Sintió seguridad y confianza al utilizar el prototipo?	10	0
3. ¿Experimentó algún tipo de molestia o dolor durante la prueba?	4	6
4. ¿Fue perceptible los distintos niveles de velocidad de funcionamiento?	10	0
5. ¿Utilizaría Ud. este equipo en un centro de rehabilitación en caso de requerirlo?	10	0

Nota: La encuesta se la realizó a 10 personas de distintas edades y géneros.

En la Figura 6 se presentan las calificaciones por parte de los sujetos de prueba una vez utilizado el equipo, basados en los datos recopilados mediante una encuesta efectuada a los usuarios. En términos generales, el equipo tiene una tasa de aceptación y confort del 100%. Sin embargo, se observa que el 40% de los sujetos de prueba experimentaron algún tipo de malestar, principalmente relacionada con la firmeza del dispositivo y la posición al tomar asiento. Este aspecto se vio inducido por el tipo de asiento utilizado durante la prueba.

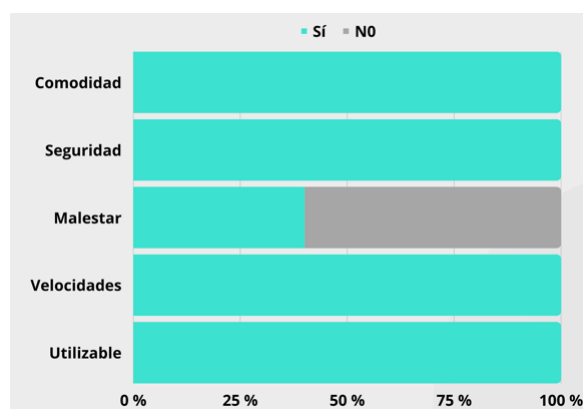


Figura 6. Percepción del uso del prototipo.

En este artículo, se presentó dos propósitos investigativos. El primero, se centró en realizar el desarrollo y la producción de un prototipo de exoesqueleto para la rehabilitación de miembros inferiores y de manera concreta de la rodilla utilizando FDM. El segundo propósito, se concentró en evaluar el prototipo de exoesqueleto desarrollado como innovación terapéutica para la rehabilitación efectiva y accesible de rodilla. Tomando en consideración que el conocimiento de la biomecánica de la articulación de la rodilla humana juega un papel importante en el diseño, control y la evaluación de un exoesqueleto de rodilla. Así, en este apartado se realiza una breve síntesis para su uso futuro.

El exoesqueleto de rehabilitación para la rodilla debe emplearse exclusivamente para los propósitos destinados a su construcción, los mismos que son realizar la flexo extensión de la rodilla en posición sentada o semiacostada. Otro uso diferente podría resultar en lesiones o perjuicios en la articulación u otras áreas del cuerpo.

Una consideración importante para mejoras posteriores es la integración de terapias que incluyan calor y aplicación electrodos en el proceso de rehabilitación. Se recomienda explorar la posibilidad de integrar un sistema de este tipo al equipo para mejorar los resultados del proceso de recuperación.

Se sugiere para futuras investigaciones optimizar la estructura de soporte del prototipo, especialmente en su base, con la finalidad de dar solución a los problemas de firmeza del mismo. Esta reconceptualización podría involucrar el fijar el equipo al piso o la incorporación de un sistema de contrapesos fijos para solucionar los problemas de estabilidad del prototipo. Además, se debe considerar la incorporación de un sistema aislante para el mecanismo móvil que alberga el motor a pasos Nema 23. Esto ayudaría significativamente a la reducción vibraciones y ruido generado durante el uso del equipo a bajas velocidades. Cabe destacar, que dentro del estudio no se reportaron observaciones al respecto por parte de los sujetos de prueba, es un aspecto importante a tener en cuenta para futuras mejoras.

4. CONCLUSIONES

El prototipo de un exoesqueleto para miembros inferiores (rodilla) propuesto satisface exitosamente con el cumplimiento de todas las rutinas ingresadas en términos de series, repeticiones y tiempos de espera entre ellas. El exoesqueleto propuesto cumple de manera satisfactoria con el ángulo de flexión ingresado, se observa un error no mayor a 1° para ángulos desde los 0° hasta los 85° . En específico ara el ángulo de 90° , se registra un error aproximado de 3° , considerado adecuado ya que este representa un 3% de desviación con referencia a esa medida.

En términos generales el dispositivo, exhibe un error máximo del 2% en la concordancia de los ángulos de flexión ingresados mediante la aplicación para la ejecución de la fisioterapia, lo que lo distingue como un sistema altamente preciso.

En relación al confort del prototipo y considerando los resultados de las encuestas realizadas durante las pruebas funcionales por los evaluadores, se observa que el equipo ha logrado una aceptación del 100% en términos de comodidad y seguridad durante su utilización. No obstante, el 40% de los participantes en el estudio mencionaron experimentar molestias, principalmente debido a la postura del usuario influenciada por el tipo de asiento utilizado y a la estabilidad general del

equipo, misma que presenta cierto grado de balanceo. Para abordar esta situación, se introdujo en la base de la estructura una pesa la cual hace las veces de un contrapeso para equilibrar el peso de la pierna y mitigar este inconveniente.

El diseño y fabricación de un exoesqueleto para la realización de terapia física de rodilla, que sea estable y asequible económicamente en comparación con alternativas existentes, representa una solución efectiva para personas con limitaciones de movilidad en dicha articulación. Al proporcionar movimientos precisos que fortalecen los músculos y tejidos articulares, este dispositivo ofrece una alternativa viable para acelerar la recuperación y reducir la carga física asociada con la rehabilitación. Su diseño programable, fácil operación y seguridad lo convierten en una herramienta prometedora tanto para profesionales de la fisioterapia como para los propios pacientes.

CONFLICTO DE INTERESES

Nosotros, los autores del artículo titulado “Desarrollo y evaluación de un exoesqueleto de rodilla: Innovación terapéutica para rehabilitación efectiva y accesible”, hacemos constar por la presente que no existe ningún conflicto de intereses en relación con la investigación y los resultados presentados en el mencionado artículo. Confirmamos que no tenemos afiliaciones, intereses financieros, ni relaciones personales que puedan influir de manera indebida en la objetividad y la integridad de la investigación realizada. Reafirmamos nuestro compromiso con la transparencia y la ética en la presentación de nuestro trabajo académico, asegurando a la comunidad científica y a los lectores en general que la investigación se llevó a cabo de manera imparcial y sin influencias externas que pudieran comprometer la validez y fiabilidad de los resultados.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

	Albán-Galárraga, M. J.	Jaque-Puca, D. G.	Muyulema- Allaña, J. C.	Coque-Patiño, C. G.
Participar activamente en:				
Conceptualización	X			
Análisis formal	X			
Adquisición de fondos		X		X
Investigación			X	
Metodología	X		X	
Administración del proyecto			X	
Recursos		X		X
Redacción –borrador original	X		X	
Redacción –revisión y edición	X		X	
La discusión de los resultados	X	X		
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X		X	

REFERENCIAS

- Akhtaruzzaman, M., Shafie, A. A., Khan, M. R., & Rahman, M. M. (2024). Robot assisted knee joint RoM exercise: A PID parallel compensator architecture through impedance estimation. *Cognitive Robotics*, *4*, 42-61. <https://doi.org/10.1016/J.COGR.2023.11.003>
- Alqahtani, M. S., Al-Tamimi, A., Almeida, H., Cooper, G., & Bartolo, P. (2020). A review on the use of additive manufacturing to produce lower limb orthoses. En *Progress in Additive Manufacturing* (Vol. 5, Número 2, pp. 85-94). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00104-7>
- Bamdad, M., Mokri, C., & Abolghasemi, V. (2022). Joint mechanical properties estimation with a novel EMG-based knee rehabilitation robot: A machine learning approach. *Medical Engineering & Physics*, *110*, 103933. <https://doi.org/10.1016/J.MEDENGPHY.2022.103933>
- Bargir, M. A., Phafat, N. G., & Sonkamble, V. (2023). A review of artificial knee joint by additive manufacturing technology to study biomechanical characteristics. *Advances in Oral and Maxillofacial Surgery*, *12*, 100447. <https://doi.org/10.1016/J.ADOMS.2023.100447>
- Barrios-Muriel, J., Romero-Sánchez, F., Alonso-Sánchez, F. J., & Salgado, D. R. (2020). Advances in orthotic and prosthetic manufacturing: A technology review. *Materials*, *13*(2). <https://doi.org/10.3390/ma13020295>
- Bathija, A., Papaspyridakos, P., Finkelman, M., Kim, Y., Kang, K., & De Souza, A. B. (2023). Accuracy of static computer-aided implant surgery (S-CAIS) using CAD-CAM surgical templates fabricated from different additive manufacturing technologies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.03.025>
- Chaparro-Cárdenas, S. L., Lozano-Guzmán, A. A., Ramirez-Bautista, J. A., & Hernández-Zavala, A. (2018). A review in gait rehabilitation devices and applied control techniques. En *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* (Vol. 13, Número 8, pp. 819-834). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17483107.2018.1447611>
- Chen, B., Zi, B., Wang, Z., Qin, L., & Liao, W. H. (2019). Knee exoskeletons for gait rehabilitation and human performance augmentation: A state-of-the-art. En *Mechanism and Machine Theory* (Vol. 134, pp. 499-511). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.016>
- Cruz-Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Camargo, M., & Pearce, J. M. (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *264*, 121602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>
- Cui, W., Yang, Y., Di, L., & Dababneh, F. (2021). Additive manufacturing-enabled supply chain: Modeling and case studies on local, integrated production-inventory-transportation structure. *Additive Manufacturing*, *48*, 102471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102471>

- Daachi, M. E., Madani, T., Daachi, B., & Djouani, K. (2015). A radial basis function neural network adaptive controller to drive a powered lower limb knee joint orthosis. *Applied Soft Computing*, 34, 324-336. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2015.04.034>
- de la Tejera, J. A., Bustamante-Bello, R., Ramirez-Mendoza, R. A., & Izquierdo-Reyes, J. (2021). Systematic review of exoskeletons towards a general categorization model proposal. En *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Número 1, pp. 1-25). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11010076>
- DeBoer, B., Hosseini, A., & Rossa, C. (2023). Model predictive control of an active ankle-foot orthosis with non-linear actuation constraints. *Control Engineering Practice*, 136, 105538. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2023.105538>
- Domínguez-Navarro, F., Igual-Camacho, C., Silvestre-Muñoz, A., Roig-Casasús, S., & Blasco, J. M. (2018). Effects of balance and proprioceptive training on total hip and knee replacement rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*, 62, 68-74. <https://doi.org/10.1016/J.GAITPOST.2018.03.003>
- Escalante, F. M., Pérez-Ibarra, J. C., Jaimes, J. C., Siqueira, A. A. G., & Terra, M. H. (2020). Robust Markovian Impedance Control applied to a Modular Knee-Exoskeleton. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10141-10147. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2020.12.2740>
- Estrada, J. M., Camacho, J. A., Restrepo, M. T., & Parra, C. M. (1998). Parámetros antropométricos de la población laboral colombiana 1995 (acopla95). *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 15(2), 112-139. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/4777>
- Gassert, R., & Dietz, V. (2018). Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: A neurophysiological perspective. En *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* (Vol. 15, Número 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0383-x>
- Gnanasagaran, C. L., Ramachandran, K., Jamadon, N. H., Kumar, V. H., Muchtar, A., Pazhani, A., & Ayaz, B. (2023). Microstructural and mechanical behaviours of Y-TZP prepared via slip-casting and fused deposition modelling (FDM). *Heliyon*, 9(11), e21705. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E21705>
- Gorgey, A. S. (2018). Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *World Journal of Orthopedics*, 9(9), 112-119. <https://doi.org/10.5312/wjo.v9.i9.112>
- Grinberg, A., Strong, A., & Häger, C. (2020). Post-rehabilitation knee proprioception after anterior cruciate ligament reconstruction. Joint position sense in relation to performance of an obstacle clearance task. *Gait & Posture*, 81, 115-116. <https://doi.org/10.1016/J.GAITPOST.2020.07.091>
- He, Y., Xu, Y., Hai, M., Feng, Y., Liu, P., Chen, Z., & Duan, W. (2024). Exoskeleton-Assisted Rehabilitation and Neuroplasticity in Spinal Cord Injury. *World Neurosurgery*. <https://doi.org/10.1016/J.WNEU.2024.01.167>
- Hettiarachchi, B. D., Sudusinghe, J. I., Seuring, S., & Brandenburg, M. (2022). Challenges and Opportunities for Implementing Additive Manufacturing Supply Chains in Circular Economy.

IFAC-PapersOnLine, 55(10), 1153-1158.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.545>

- Holm, P. M., Simoný, C., Brydegaard, N. K., Høgsgaard, D., Thorborg, K., Møller, M., Whittaker, J. L., Roos, E. M., & Skou, S. T. (2023). An early care void: The injury experience and perceptions of treatment among knee-injured individuals and healthcare professionals – A qualitative interview study. *Physical Therapy in Sport*, 64, 32-40. <https://doi.org/10.1016/J.PTSP.2023.08.006>
- Hong, Y., Wang, J., Zhang, X., Zhao, D., He, H., & Sun, M. (2023). The effectiveness of home rehabilitation based on BPMpathway exercise rehabilitation system for patients after total knee arthroplasty in China. *International Journal of Orthopaedic and Trauma Nursing*, 101062. <https://doi.org/10.1016/J.IJOTN.2023.101062>
- Hsu, T. H., Tsai, C. L., Chi, J. Y., Hsu, C. Y., & Lin, Y. N. (2023). Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 66(1), 101674. <https://doi.org/10.1016/J.REHAB.2022.101674>
- Huamanchahua, D., Taza-Aquino, Y., Figueroa-Bados, J., Alanya-Villanueva, J., Vargas-Martinez, A., & Ramirez-Mendoza, R. A. (2021, abril 21). Mechatronic exoskeletons for lower-limb rehabilitation: An innovative review. *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, IEMTRONICS 2021 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422513>
- Kanishka, K., & Acherjee, B. (2023). A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 220-283. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034>
- Kuchimov, S., Özkan, M., Aпти, A., Akalan, N. E., Akel, B. S., & Hollander, K. (2023). Impact of subject's physical properties on joint biomechanics: Hypermobility alters lower extremity biomechanics during knee-bearing activity. *Gait & Posture*, 106, S107-S108. <https://doi.org/10.1016/J.GAITPOST.2023.07.134>
- Layani, M., Wang, X., & Magdassi, S. (2018). Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization. En *Advanced Materials* (Vol. 30, Número 41). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adma.201706344>
- Lozano, A., Ballesteros, M., Cruz-Ortiz, D., & Chairez, I. (2022). Active neck orthosis for musculoskeletal cervical disorders rehabilitation using a parallel mini-robotic device. *Control Engineering Practice*, 128, 105312. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2022.105312>
- Medeiros, D. M., Lima-e-Silva, F. X. de, Aimi, M., Vaz, M. A., & Baroni, B. M. (2024). Do athletes with hamstring strain injury have shorter muscle fascicles in the injured limb? *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 38, 269-273. <https://doi.org/10.1016/J.JBMT.2024.01.030>
- Mistry, J. B., Elmallah, R. D. K., Bhave, A., Chughtai, M., Cherian, J. J., McGinn, T., Harwin, S. F., & Mont, M. A. (2016). Rehabilitative Guidelines after Total Knee Arthroplasty: A Review.

En *Journal of Knee Surgery* (Vol. 29, Número 3, pp. 201-217). Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1579670>

Muniz Medeiros, D., Marchiori, C., & Manfredini Baroni, B. (2021). Effect of Nordic Hamstring Exercise Training on Knee Flexors Eccentric Strength and Fascicle Length: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Sport Rehabilitation*, 30(3), 482-491. <https://doi.org/10.1123/JSR.2019-0388>

Nagaraju, D. S., Krupakaran, R. L., Sripath, C., Nitin, G., & Joy Joseph Emmanuel, G. (2023). Mechanical properties of 3D printed specimen using FDM (Fused deposition modelling) and SLA (Stereolithography) technologies. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.09.223>

Pamungkas, D. S., Caesarendra, W., Susanto, S., Soebakti, H., & Analia, R. (2019). Overview: Types of lower limb exoskeletons. En *Electronics (Switzerland)* (Vol. 8, Número 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/electronics8111283>

Pinto-Fernandez, D., Torricelli, D., Sanchez-Villamanan, M. D. C., Aller, F., Mombaur, K., Conti, R., Vitiello, N., Moreno, J. C., & Pons, J. L. (2020). Performance Evaluation of Lower Limb Exoskeletons: A Systematic Review. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(7), 1573-1583. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2989481>

Pratheesh Kumar, M. R., Saravanakumar, K., Arun Kumar, C., Saravanakumar, R., & Abimanyu, B. (2023). Experimental investigation of the process parameters and print orientation on the dimensional accuracy of fused deposition modelling (FDM) processed carbon fiber reinforced ABS polymer parts. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.10.062>

Rex, C. (2019). Terapia de movimiento pasivo continuo después de una artroplastia total de la rodilla. *Nursing (Ed. española)*, 36(1), 31-33. <https://doi.org/10.1016/j.nursi.2019.01.009>

Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

Sharma, A., & Rai, A. (2022). Fused deposition modelling (FDM) based 3D & 4D Printing: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 367-372. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.03.679>

Shi, D., Zhang, W., Zhang, W., & Ding, X. (2019). A Review on Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robots. En *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* (Vol. 32, Número 1). Chinese Mechanical Engineering Society. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0389-8>

Sun, Z., Iyer, A., Lambeth, K., Cleveland, C., & Sharma, N. (2023). Knee extension tracking and fatigue regulation results using a robust MPC approach in a hybrid exoskeleton. *Control Engineering Practice*, 141, 105717. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPAC.2023.105717>

Tang, H., Li, Y., Zhang, J. W., Zhang, D., & Yu, H. (2024). Design and optimization of a novel sagittal-plane knee exoskeleton with remote-center-of-motion mechanism. *Mechanism and*

Machine Theory, 194, 105570.
<https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2023.105570>

Triwiyanto, T., Luthfiyah, S., Putu Alit Pawana, I., Ali Ahmed, A., & Andrian, A. (2023). Bilateral mode exoskeleton for hand rehabilitation with wireless control using 3D printing technology based on IMU sensor. *HardwareX*, 14, e00432. <https://doi.org/10.1016/J.OHX.2023.E00432>

Varela-Aldás, J. L. (2020). Impresión 3D y COVID-19. *CienciAmérica*, 9(2), 51-57. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i2.292>

Villamarín-Arévalo, A. E., Muyulema-Allaica, J. C., Culqui-García, R. P., & Sandoval-Tulcán, M. E. (2019). La electrólisis percutánea y su eficacia en el tratamiento de tendinopatías en la extremidad inferior. Revisión sistemática. *Ciencia Digital*, 3(4). <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i4.966>

Wang, Z., Lv, J., Hou, Y., & Song, D. (2024). Enhancing experience: Investigating the impact of different personal perspectives in virtual reality with lower limb rehabilitation robots on participants' motivation, experience, and engagement. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 99, 103496. <https://doi.org/10.1016/J.ERGON.2023.103496>

Wu, Q., & Chen, Y. (2023). Adaptive cooperative control of a soft elbow rehabilitation exoskeleton based on improved joint torque estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 184, 109748. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2022.109748>

Yang, Y., Li, Y., Liu, X., & Huang, D. (2022). Adaptive neural network control for a hydraulic knee exoskeleton with valve deadband and output constraint based on nonlinear disturbance observer. *Neurocomputing*, 473, 14-23. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2021.12.010>

Yeung, S., Kim, H. K., Carleton, A., Munro, J., Ferguson, D., Monk, A. P., Zhang, J., Besier, T., & Fernandez, J. (2022). Integrating wearables and modelling for monitoring rehabilitation following total knee joint replacement. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 225, 107063. <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2022.107063>