

DISEÑO Y VALIDACIÓN PRELIMINAR DE UN SOPORTE DE RODILLA PERSONALIZADO PARA REHABILITACIÓN FUNCIONAL

Design and preliminary validation of a personalized knee support for functional rehabilitation

Diego Alejandro Soto Vega¹, Julio Andrés Nevárez Padilla², Avner Kalid Parada Benítez³, Héctor Alfredo López-Aguilar⁴

Resumen

La tendinitis rotuliana es una lesión frecuente en deportistas de alto impacto y representa un desafío en los procesos de rehabilitación funcional. El presente estudio corresponde a un proyecto experimental de desarrollo tecnológico con validación piloto pre-post, cuyo objetivo fue diseñar y evaluar preliminarmente un soporte de rodilla personalizado que integra termoterapia y vibración controladas electrónicamente. La muestra estuvo conformada por un sujeto masculino, con antecedentes de tendinitis rotuliana, quien practica deporte de impacto y fue seleccionado siguiendo criterios de inclusión específicos. El dispositivo se diseñó empleando escaneo tridimensional y modelado paramétrico e incorporó un sistema embebido basado en un microcontrolador ESP32 con control inalámbrico vía Bluetooth.

Las variables evaluadas incluyeron ángulo de flexión y rotación de la rodilla durante la marcha, estimación indirecta de la carga patelofemoral, temperatura superficial alcanzada por el sistema térmico, funcionamiento del módulo de vibración y percepción de usabilidad de la interfaz móvil. El método de análisis consistió en la comparación descriptiva pre-post del patrón de marcha, medición eléctrica y térmica controlada del sistema, y análisis porcentual de res-

¹ Egresado de la carrera de Electromédica de la Universidad La Salle Chihuahua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9157-7287>

² Egresado de la carrera de Electromédica de la Universidad La Salle Chihuahua.

³ Doctor en Educación. Profesor-investigador de la Universidad la Salle Chihuahua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0606-3964>

⁴ Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental. Adscrito a la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Coordinador de investigación de la Universidad la Salle Chihuahua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7324-1700>

Correo electrónico: hlopeza@uach.mx

Recibido: 09/12/2025 | Aceptado: 10/03/2026 | Publicado: 15/06/2026

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. La investigación fue financiada con recursos de los autores.

*Autor de correspondencia

DOI: [10.56643/rcia.v5i1.238](https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.238)

Como citar este artículo: Soto Vega, D. A., Nevárez Padilla, J. A., Parada Benítez, A. K. y López Aguilar, H. A. (2026). Diseño y validación preliminar de un soporte de rodilla personalizado para rehabilitación funcional. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 5(1). 22-39. <https://doi.org/10.56643/rcia.v5i1.238>

puestas en pruebas de usabilidad. Los resultados mostraron una reducción estimada de 6% en la carga rotuliana, estabilidad térmica dentro de rangos terapéuticos seguros (38-45°C) y adecuada aceptación funcional del dispositivo. Aunque los hallazgos corresponden a una validación preliminar exploratoria, el prototipo evidencia potencial como solución ortésica inteligente para la rehabilitación personalizada de la rodilla.

Palabras clave: Rodilla; Tendinitis rotuliana; Órtesis personalizada; Termoterapia; Vibración terapéutica; Rehabilitación biomecánica; ESP32

Abstract

Patellar tendinitis is a common injury among high-impact athletes and represents a significant challenge in functional rehabilitation. This study followed an experimental technological development design with a pilot pre-post validation approach, aiming to design and preliminarily evaluate a personalized knee support integrating controlled thermotherapy and vibratory stimulation. The sample consisted of one male participant with a history of patellar tendinitis and engagement in high-impact sports, selected according to predefined inclusion criteria. The device was developed through three-dimensional scanning and parametric modeling, incorporating an embedded system based on an ESP32 microcontroller with Bluetooth connectivity for mobile control. The evaluated variables included knee flexion and rotation angles during gait, indirect estimation of patellofemoral load, surface temperature achieved by the thermal module, operational performance of the vibration system, and perceived usability of the mobile interface. The analysis method involved descriptive pre-post comparison of gait patterns, controlled electrical and thermal measurements of the system, and percentage-based analysis of usability testing responses. Results showed an estimated 6% reduction in patellar load, stable thermal regulation within clinically safe ranges (38–45 °C), and favorable functional acceptance. Although findings correspond to a preliminary exploratory validation, the prototype demonstrates potential as an intelligent orthotic solution for personalized knee rehabilitation.

Keywords: Knee; Patellar tendinitis; Personalized orthosis; Thermotherapy; Therapeutic vibration; Biomechanical rehabilitation; ESP32

Introducción

Realizar deportes conlleva un alto riesgo de lesiones físicas. De acuerdo con Fuller (2006), en el ámbito deportivo se considera lesión a cualquier molestia física experimentada por un deportista que resulte del entrenamiento o la práctica de un deporte, sin importar si requiere atención médica o pérdida de tiempo en la actividad deportiva. En México se ha encontrado que las lesiones más comunes son las de los tendones de rodilla, tobillo y hombro (Conade, 2017).

La tendinitis rotuliana es una de las afecciones más comunes en el ámbito deportivo, presentándose particularmente en atletas que practican disciplinas que implican saltos repetitivos y una carga constante sobre la rodilla. Esta condición afecta sobre todo a los tendones y se ha asociado con procesos de sobrecarga funcional, lo que sugiere que una exposición prolongada a esfuerzos mecánicos intensos puede ser un factor determinante en el desarrollo de tendinopatías. Asimismo, de acuerdo con Bonilla (2016) se han identificado otros factores intrínsecos que pueden ocasionarla, como la falta de flexibilidad de los músculos isquiotibiales y los cuádriceps, el aumento en el entrenamiento con peso, el incremento de masa corporal, la discrepancia de miembros inferiores asociada a ejercicios mal realizados como lo son subluxaciones o inmovilidades causadas por atrofas musculares, entre otros.

Por su parte, Rishiraj et al. (2025) encontraron que el uso prolongado de rodilleras funcionales no muestra efectos adversos en el rendimiento de atletas sanos e incluso puede potenciar sus capacidades físicas, mejorando aspectos como la potencia, la aceleración, la velocidad y la agilidad de las extremidades inferiores. Si bien en el caso examinado las mejoras no fueron estadísticamente significativas, el estudio sugiere que el uso continuo de rodilleras funcionales podría ser beneficioso para la recuperación física sin interferir en el rendimiento deportivo.

Marco teórico

Diversos estudios han documentado el desarrollo de órtesis y exoesqueletos activos de rodilla orientados a la asistencia durante la marcha y la rehabilitación funcional. Estos sistemas incorporan actuadores eléctricos, neumáticos o hidráulicos, así como algoritmos de control basados en posición, par o impedancia, con el propósito de suministrar torque asistivo de manera controlada y sincronizada con el ciclo de la marcha (Nagano et al., 2021; Trivedi y Joshi,

2024). Dicho enfoque permite modular la interacción humano-dispositivo y optimizar el soporte mecánico según las demandas biomecánicas del usuario.

En el ámbito de las órtesis inteligentes portátiles se ha reportado la integración de actuadores de aleación con memoria de forma (Shape Memory Alloys, sma), sensores de presión y estructuras de conexión ligeras, lo que favorece la asistencia durante la fase de balanceo sin comprometer la flexibilidad ni incrementar significativamente el peso del dispositivo (Moslemi et al., 2020). Estas soluciones buscan mantener un equilibrio entre soporte mecánico, confort y eficiencia energética. Además, la incorporación de tecnologías de escaneo tridimensional e impresión 3D permitió desarrollar carcasas y articulaciones completamente personalizadas, que facilitan iteraciones de diseño rápidas y la fabricación de órtesis inteligentes de bajo costo con sistemas de retroalimentación integrados (Kahtan et al., 2025; Popișter et al., 2024). Las revisiones recientes destacan, asimismo, el uso de metamateriales auxéticos, caracterizados por estructuras uniformes y libres de arrugas, a las que se agregan sensores inteligentes para el monitoreo en tiempo real del movimiento y la carga articular; ello hace posible implementar estrategias de rehabilitación individualizadas, basadas en datos objetivos (Popișter et al., 2024; Moroni y Majewska, 2025).

Siguiendo a Arenas et al. (2006) se recomienda aplicar termoterapia como medio terapéutico con efectos antiinflamatorios, antiespasmódicos y analgésicos. Estos investigadores encontraron que las aplicaciones que emplean almohadillas eléctricas pueden ser de uso general, regional o local, con una temperatura de entre 38-45°C y una exposición recomendada de 15 a 20 minutos por sesión, no superando las dos sesiones diarias. La aplicación de calor superficial de entre 38°C y 45°C produce vasodilatación local, aumento del metabolismo tisular y disminución del espasmo muscular, sin comprometer la integridad cutánea cuando se controla adecuadamente la exposición. De igual manera, Arcas (2004) menciona que la termoterapia por medio de almohadillas eléctricas puede ser de gran ayuda para la rehabilitación física y el fortalecimiento muscular. Asimismo, se ha encontrado que la vibración mecánica localizada muestra efectos positivos en la modulación del dolor mediante mecanismos neuromusculares asociados al control inhibitorio segmentario (Takhakh et al., 2013).

En un estudio sobre el uso de rodilleras de descarga en pacientes con osteoartritis medial, Rogoschin et al. (2025) observaron una mejora significativa en la función articular y en la reducción del dolor, especialmente al caminar por pendientes pronunciadas y subir escaleras. Encontraron que las rodilleras de

descarga no sólo alivian el dolor, sino que también mejoran la movilidad y el rendimiento físico, siendo una opción viable en el tratamiento conservador de la tendinitis de rodilla. Por su parte, Moran (2022) recomienda brindar terapia de calor, vibración, crioterapia, electroestimulación transcutánea y el uso de rodilleras de forma alternada para obtener mejores resultados en la rehabilitación y propiciar el fortalecimiento muscular tras una tendinitis o artrosis. Sin embargo, en el mercado aún no existe un producto o proyecto que combine estos tipos de terapias de forma unitaria. La brecha identificada radica en la ausencia de dispositivos ortésicos personalizados que integren simultáneamente control térmico, vibración terapéutica y monitoreo electrónico accesible.

Por ello es importante desarrollar investigaciones que favorezcan la rehabilitación de pacientes que viven con estas afecciones, para mejorar su calidad de vida y su rendimiento deportivo.

Planteamiento del problema

A pesar de la evidencia clínica que respalda el uso de termoterapia, vibración y ortesis funcionales en la rehabilitación de la tendinitis rotuliana, actualmente no existen dispositivos accesibles que integren de manera personalizada y controlada estas terapias en una sola solución tecnológica. En deportistas jóvenes con antecedentes de lesiones de rodilla, la falta de dispositivos inteligentes personalizados limita la adherencia terapéutica y la optimización de cargas articulares. Por lo que surge la necesidad de desarrollar y validar un soporte de rodilla personalizado que integre control térmico y vibratorio mediante electrónica embebida.

Objetivo general

Desarrollar y validar preliminarmente un soporte de rodilla personalizado que integra termoterapia y vibración controlada electrónicamente para rehabilitación funcional.

Objetivos específicos

- Diseñar el soporte mediante escaneo 3D y modelado paramétrico.
- Integrar sistema embebido basado en ESP32.
- Evaluar funcionamiento térmico y vibratorio.
- Analizar preliminarmente efectos biomecánicos.
- Evaluar usabilidad de la interfaz móvil.

Metodología

Diseño del estudio

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo y experimental. Su propósito es diseñar, desarrollar y evaluar un soporte de rodilla inteligente orientado a la rehabilitación y prevención de lesiones en deportistas que practican disciplinas de alto impacto, que proporcione termoterapia y terapia de vibración. A continuación, se presenta la metodología utilizada.

Participante y criterios de inclusión

Se delimitó una población objetivo compuesta por hombres de 18 a 27 años, cuyo peso estuviera en el rango de 65 a 90 kilogramos, estatura promedio de 1.80 metros, con antecedentes de lesiones en los miembros inferiores, específicamente meniscopatía o tendinitis. Además, se consideró como criterio de inclusión la práctica activa o interrumpida de deportes de impacto como halterofilia, powerlifting o levantamiento de pesas, debido a la alta prevalencia de lesiones músculo-esqueléticas en esta población (Conade, 2018). Partiendo de esta delimitación, se seleccionó a un único sujeto de prueba, quien cumplía con las características descritas.

Desarrollo del prototipo

Para garantizar el ajuste anatómico preciso, se realizó un escaneo tridimensional del miembro afectado del sujeto, utilizando el software VXelements de Creaform. A partir de éste se desarrolló el diseño personalizado del soporte, empleando la plataforma de modelado paramétrico OnShape. El mismo se imprimió con Ácido Poliláctico (pla), utilizando la impresora Bambu Lab P1S. El diseño personalizado permitió obtener un producto elaborado a medida de manera individual, el cual se adapta a las medidas y formas de la extremidad. El diseño tuvo como base e inspiración distintos diseños previos realizados por diversas empresas enfocadas en la rehabilitación. No obstante, se trata de un diseño de desarrollo propio. Se encontró que el uso de OnShape proporciona la alternativa más viable para facilitar el diseño.

El prototipo incorpora un sistema dual de termoterapia y terapia de vibración, controlado mediante un microcontrolador ESP32, elegido por su alta eficiencia

energética, su conectividad inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth) y su bajo costo (Sánchez, 2019). El sistema fue programado para interactuar con una interfaz de usuario desarrollada en App Inventor, herramienta del Massachusetts Institute of Technology (mit) que permite el control desde dispositivos Android.

Para la emisión de calor se empleó un módulo Peltier de 40x40 mm, con requerimientos de alimentación entre 5 y 12 V DC, temperatura máxima de 138°C y una vida útil estimada de 200 000 horas de uso moderado (Hebei, 2014). El módulo de vibración fue compuesto por micromotores cilíndricos de 3.5 mm de diámetro y 5 V de operación, seleccionados por su tamaño compacto y su bajo consumo energético.

Se diseñó e imprimió una tarjeta de circuito personalizada para el control de ambos sistemas, sobre la cual se realizaron pruebas eléctricas de continuidad, sobrecorriente (hasta 220 mA) y funcionamiento prolongado.

La interfaz desarrollada posibilita que el usuario active de forma independiente los sistemas de termoterapia y vibración, que module la temperatura deseada y defina un tiempo de terapia programado, tras el cual el sistema se apaga automáticamente. Esta funcionalidad busca facilitar su uso durante rutinas de recuperación y mejorar la adherencia al tratamiento terapéutico no invasivo.

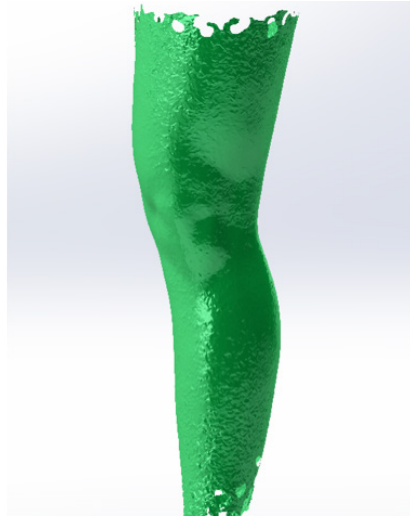
Resultados y discusiones

1.1 Diseño y validación ergonómica del soporte

Los primeros prototipos del soporte de rodilla, desarrollados sin personalización anatómica, resultaron insatisfactorios en cuanto a comodidad y ergonomía. El sujeto de prueba reportó incomodidad y falta de ajuste, lo que comprometía la funcionalidad del diseño. En respuesta a estas observaciones, se procedió a realizar un escaneo tridimensional de la rodilla del participante (figura 1), con el objetivo de generar un diseño completamente personalizado. Posteriormente, se imprimió el nuevo modelo y se realizaron pruebas preliminares en el usuario. Los resultados fueron favorables: el participante manifestó de forma verbal su conformidad total con el ajuste y la comodidad del dispositivo. Este nuevo diseño permitió su uso continuo sin molestias, lo cual representa un avance significativo respecto del prototipo inicial.

Figura 1.

Modelado 3D de la rodilla derecha del primer sujeto de pruebas, se escaneo por medio de Creaform, procesado en VXelement



1.2 Evaluación biomecánica mediante análisis de marcha

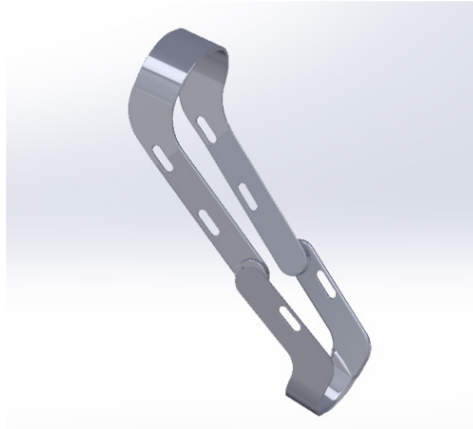
Una vez validada la ergonomía del soporte, se llevó a cabo un análisis de marcha para evaluar su impacto sobre la cinemática de la extremidad inferior. Los resultados indicaron una variación mínima en los patrones de movimiento, con una diferencia de aproximadamente 6° en el ángulo de flexión y 15° en la rotación de la rodilla durante la fase de apoyo. Estas variaciones fueron interpretadas como positivas, ya que se mantuvo la movilidad articular funcional sin restricciones importantes.

Los hallazgos obtenidos son consistentes con los postulados de Rogoschin (2025), quien señala que las rodilleras de descarga bien adaptadas pueden mejorar significativamente la movilidad articular y contribuir a una mayor eficiencia biomecánica durante el movimiento (figura 2).

A diferencia de los dispositivos comerciales mencionados, el presente prototipo incorpora, además, estimulación vibratoria y control térmico activo, lo cual podría potenciar los efectos analgésicos y funcionales descritos en la literatura.

Figura 2.

Diseño CAD de ambas partes del soporte de rodilla (superior e inferior), desarrollada en OnShape y reestructurado en SolidWorks



1.3 Evaluación de materiales y distribución de cargas

Durante las pruebas de resistencia mecánica del material utilizado en la fabricación del prototipo inicial, se identificó que el ácido poliláctico (pla) no es la opción más adecuada para aplicaciones que impliquen altas exigencias mecánicas, como sucede en deportes de impacto. El material mostró alta vulnerabilidad a los impactos y esfuerzos de flexión, lo cual compromete su integridad estructural bajo condiciones reales de uso, como las que se presentan en actividades como la halterofilia. Ante esta limitación, se propone la evaluación de materiales alternativos con mayor resistencia mecánica y durabilidad, tales como el Polietileno Tereftalato de Glicol (petg) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (abs), los cuales han demostrado mejor desempeño en aplicaciones funcionales sometidas a cargas dinámicas.

Por otro lado, los resultados de las pruebas de carga realizadas durante el uso del soporte indicaron que la distribución del peso sobre la articulación es favorable. Se observó una reducción de 6 % en la fuerza ejercida sobre la rótula al utilizar el dispositivo, lo que respalda la hipótesis de diseño orientada a disminuir el impacto mecánico sobre la articulación patelofemoral. Este hallazgo representa un avance relevante en el desarrollo de dispositivos ortopédicos de descarga para deportistas con antecedentes de lesión articular.

1.4 Sistema de vibración

Respaldando las afirmaciones de Moran (2022), las terapias de vibración, combinadas con termoterapia y distribución de cargas facilitan la recuperación e incluso detienen el proceso de lesión de personas afectadas por tendinitis o meniscopatía. El sistema de vibración diseñado para que funcione de manera tanto intermitente como ininterrumpido y se acciona por medio de un control on/off, lo cual, además de favorecer el proceso de recuperación, relaja la capa superficial muscular de la rodilla y no tiene un impacto negativo sobre la rodilla. Cabe señalar que un tratamiento de vibración mal realizado y en zonas no adecuadas puede llegar a perjudicar la recuperación e integridad de la rodilla y comprometer la extremidad.

1.5 Sistema de termoterapia

El sistema de termoterapia se implementó mediante el uso de módulos Peltier como elementos activos de transferencia térmica. La selección de este componente termoeléctrico resultó adecuada. En este sentido, los ensayos de fiabilidad eléctrica confirmaron que los módulos cumplen con los requerimientos funcionales del proyecto de investigación. Durante las pruebas, los módulos fueron alimentados a un voltaje constante de 5.03 V y una corriente de 0.25 A, operando de forma continua durante dos horas y 30 minutos sin presentar fallas, caídas de tensión ni variaciones térmicas fuera de los rangos establecidos. En condiciones sin control on/off, se registró una temperatura máxima de 144.3°C, lo cual confirma la alta capacidad térmica del componente. Tras integrar el sistema de control térmico a través de la interfaz desarrollada, fue posible modular la temperatura de forma estable y precisa, ajustándola a los valores predefinidos por el usuario, lo que mejoró la seguridad y eficiencia del tratamiento térmico.

Un factor clave en la elección del módulo fue su tamaño compacto (40 x 40 mm), que permite su incorporación sin comprometer la ergonomía del dispositivo. Las pruebas de movilidad demostraron que el prototipo mantiene su flexibilidad y comodidad, sin interferir con los ángulos de flexión de la articulación durante su uso.

El diseño del sistema eléctrico de control fue realizado en el software Proteus, especializado en la creación de esquemas eléctricos y circuitos impresos (pcb). En la figura 3 se presenta el diagrama esquemático de la placa desarrollada, que

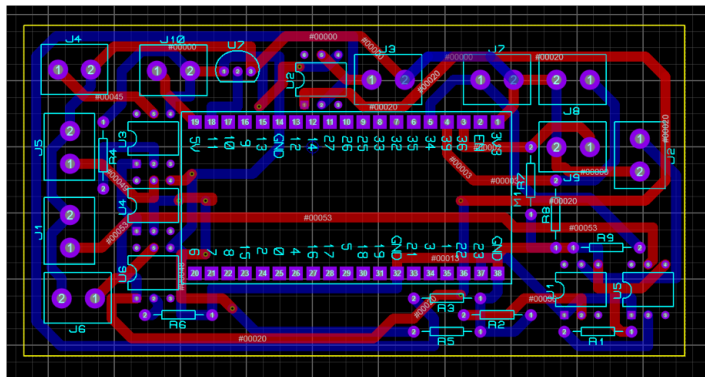
incluye los componentes necesarios para la activación, modulación térmica y monitoreo del sistema. De acuerdo con Arenas (2006), la aplicación adecuada de calor localizado, bajo condiciones controladas de tiempo y temperatura, favorece la relajación muscular, acelera procesos de rehabilitación y previene la aparición de nuevas lesiones en tejidos blandos.

1.6 Interfaz para el usuario

La interfaz de usuario desarrollada para controlar el sistema de termoterapia y vibración fue evaluada como funcional y eficaz en esta etapa de la investigación. La comunicación entre la interfaz (diseñada en App Inventor para el sistema operativo Android) y el microcontrolador ESP32 mediante Bluetooth mostró un desempeño positivo, con un tiempo promedio de respuesta de aproximadamente 1.5 segundos. Aunque esta latencia es perceptible, se considera optimizable en futuras iteraciones del software, pues la investigación aún se encuentra en su fase de prototipo alfa (versión 2.1).

Figura 3.

Diseño realizado en el software Proteus del circuito impreso (PCB) usado para el control del aditamento terapéutico



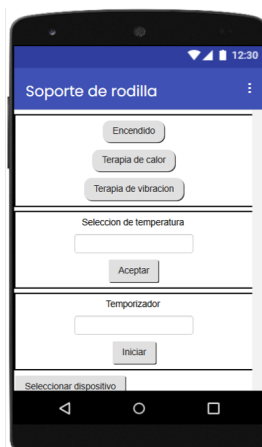
El diseño de la interfaz (figura 4) representó un reto significativo, ya que se buscó una disposición intuitiva y accesible de los elementos operativos (botones, campos de entrada y controladores de tiempo y temperatura). Para validar la usabilidad, se realizaron pruebas con 25 usuarios voluntarios, encontrándose los siguientes resultados:

- 22 usuarios (88 %) lograron establecer conexión sin inconvenientes, comprendiendo correctamente el funcionamiento de la aplicación.
- 2 usuarios (8 %) no lograron establecer conexión inicial con el dispositivo.
- 3 usuarios (12 %) reportaron pérdida de la conexión Bluetooth al alejarse del rango de operación óptimo.
- 1 usuario (4 %) expresó inconformidad por la exclusividad para Android y sugirió que se desarrollara una versión compatible con el sistema operativo iOS.

El resultado preliminar de la interfaz se presenta en la figura 4.

Figura 4.

Captura de pantalla de la version 1.3 de la interfaz de control, diseñada en el sitio web AppInventor



AppInventor

Los resultados obtenidos indican que la interfaz cumple su función principal de permitir el control independiente de los módulos de calor y vibración, como también la configuración de parámetros de temperatura y tiempo de uso. La facilidad de uso percibida por la mayoría de los participantes respalda la viabilidad de la solución digital propuesta y sugiere un alto potencial de adopción con ajustes menores de accesibilidad y compatibilidad multiplataforma.

Los resultados corresponden a una validación preliminar exploratoria en fase alfa del prototipo, sin pretensión de generalización estadística.

Conclusiones

El desarrollo del soporte de rodilla con aditamento terapéutico representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones accesibles, funcionales y adaptables para el apoyo en procesos de rehabilitación física. El prototipo integra tecnologías de fabricación digital, elementos electrónicos terapéuticos y un diseño ergonómico que responde a necesidades reales de usuarios que requieren alivio del dolor, estabilidad articular y apoyo durante la recuperación.

Las pruebas preliminares demostraron que el dispositivo es capaz de ofrecer compresión, calor y vibraciones controladas, elementos comúnmente utilizados en terapias musculoesqueléticas. La estructura del soporte mostró ser estable y cómoda durante los ensayos iniciales, lo que confirma la viabilidad de combinar técnicas de impresión 3D y componentes comerciales en un producto funcional. Asimismo, el proyecto evidencia la importancia del trabajo interdisciplinario entre ingeniería biomédica, diseño industrial y fabricación digital, que posibilita la creación de soluciones innovadoras con tiempos de desarrollo reducidos y costos accesibles. De igual manera, el proceso hizo posible que se identificarán áreas clave de mejora que servirán de base para versiones futuras del dispositivo. En conclusión, este trabajo demuestra que es posible desarrollar tecnologías terapéuticas emergentes desde entornos académicos utilizando herramientas modernas, metodologías iterativas y un enfoque centrado en el usuario. Con las mejoras propuestas, el soporte de rodilla tiene el potencial de convertirse en una herramienta útil para fisioterapeutas, deportistas y personas en rehabilitación, contribuyendo al bienestar y calidad de vida de los usuarios. Los hallazgos encontrados en esta etapa corresponden a la validación funcional preliminar. Las proyecciones clínicas y aplicaciones terapéuticas requieren estudios en una muestra ampliada y protocolos controlados.

Limitaciones y trabajos futuros

A pesar de los resultados prometedores del prototipo, el desarrollo del soporte de rodilla con aditamento terapéutico presenta diversas limitaciones que deben atenderse en futuras etapas de investigación. En primer lugar, el dispositivo fue evaluado únicamente en un número reducido de usuarios, por lo que los hallazgos no pueden generalizarse a una población más amplia ni representar

variabilidad antropométrica significativa. Asimismo, la duración de las pruebas funcionales fue restringida, lo que impide determinar la resistencia del prototipo frente al uso prolongado, la actividad física intensa o entornos de rehabilitación real.

En cuanto al diseño, aunque los materiales empleados permiten una fabricación rápida y accesible, aún es necesario estudiar su biocompatibilidad, flexibilidad y comportamiento mecánico bajo cargas repetitivas. Del mismo modo, la integración de elementos térmicos y de vibración funcionó adecuadamente en pruebas controladas; sin embargo, se requiere optimizar el consumo energético, la disipación de calor y la estabilidad de los sistemas electrónicos durante sesiones terapéuticas más largas.

Respecto a la interfaz de control, su funcionalidad resulta suficiente para las pruebas iniciales, pero todavía necesita mejoras en usabilidad, seguridad de operación y compatibilidad con dispositivos móviles. También es necesario desarrollar un sistema de retroalimentación que permita monitorear parámetros fisiológicos en tiempo real, intensidad de tratamiento y registros de uso para apoyar la toma de decisiones clínicas.

Como trabajos futuros se plantean los siguientes:

- Validar el prototipo con una muestra más amplia y diversa de usuarios.
- Evaluar su desempeño en escenarios de rehabilitación profesional.
- Optimizar el diseño mediante materiales más ergonómicos y resistentes.
- Reducir el tamaño y el peso de los componentes electrónicos.
- Integrar sensores biométricos que permitan personalizar el tratamiento.
- Desarrollar una aplicación móvil multiplataforma que centralice el control del dispositivo y el registro de datos.

Referencias

- Arcas, P. (2004). Manual de fisioterapia. Módulo I. Generalidades. Editorial mad.
- Arenas, A., Fernández, L. E. A. y Ruiz, T. U. (2006). Utilización de la termoterapia en el ámbito deportivo. E-balonmano.com Journal Sports Science, 2(1), 29–36. https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/6257/1/1885-7019_2_1_29.pdf
- Bonilla Ugalde, P., Briceño, M. y Navarrete, C. G. (2016). Tendinitis rotuliana (rodilla del saltador) [Tendinopathy of the patella (jumper's knee)]. Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica, 83, 519–523. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revmedcoscen/rmc-2016/rmc163s.pdf>
- Comisión Nacional de Cultura Física y Deporte. (2018, febrero). Lesiones deportivas, un obstáculo a vencer. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conade/prensa/lesiones-deportivas-un-obstaculo-a-vencer>
- Fuller, C. W., Ekstrand, J., Junge, A., Andersen, T. E., Bahr, R., Dvorak, J., Häggglund, M., McCrory, P. y Meeuwisse, W. H. (2006). Declaración de consenso sobre definiciones de lesión y procedimientos de recogida de datos en estudios de lesiones en el fútbol [Consensus statement on injury definitions and data collection procedures in studies of football (soccer) injuries]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 16(2), 83–92. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2006.00528.x>
- Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd. (2018). TEC1-12706 [Hoja técnica]. <https://peltier-modules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>
- Kahtan, Y., Kubba, A., Hasan, H., Ismail, M. y Mohammed, N. (2025). Mejora de la movilidad con órtesis de rodilla: consideraciones de diseño y necesidades del paciente mediante un estudio de caso [Enhancing mobility with knee orthoses: Design considerations and patient needs through case study]. Advances in Science and Technology Research Journal, 19(6), 108–120. <https://doi.org/10.12913/22998624/202883>
- Morán Lorenzo, J. C. (2022). Cuidados de enfermería en pacientes intervenidos de artrosis de rodilla [Trabajo académico].

- Moroni, R. y Majewska, K. (2025). Innovaciones en dispositivos ortésicos: fabricación aditiva, materiales auxéticos y sensores inteligentes para una rehabilitación mejorada [Innovations in orthotic devices: Additive manufacturing, auxetic materials and smart sensors for enhanced rehabilitation]. *Applied Sciences*, 15(18), 10167. <https://doi.org/10.3390/app151810167>
- Moslemi, N., Gohari, S., Mozafari, F., Zardian, M., Burvill, C., Yahya, M. y Ayob, A. (2020). Nueva férula de rodilla asistiva inteligente incorporando un actuador de alambre de aleación con memoria de forma [A novel smart assistive knee brace incorporated with shape memory alloy wire actuator]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(13), 1543–1556. <https://doi.org/10.1177/1045389X20922911>
- Nagano, H., Sparrow, W. y Begg, R. (2021). Avances en dispositivos ortopédicos multifunción inteligentes para la prevención y tratamiento de la artrosis de rodilla: una revisión de la literatura [Developments in smart multi-function gait assistive devices for the prevention and treatment of knee osteoarthritis—A literature review]. *Applied Sciences*, 11(22), 10947. <https://doi.org/10.3390/app112210947>
- Popișter, F., Dragomir, M., Ciudin, P. y Goia, H. (2024). Potenciando la rehabilitación: diseño y análisis estructural de una ortesis inteligente de bajo costo impresa en 3D [Empowering rehabilitation: Design and structural analysis of a low-cost 3D-printed smart orthosis]. *Polymers*, 16(10), 1303. <https://doi.org/10.3390/polym16101303>
- Rishiraj, N., Taunton, J. E., Regan, W., Woollard, R., Lloyd-Smith, R. y Niven, B. (2025). Efectos sobre el rendimiento de la retirada y el uso prolongado de férulas funcionales de rodilla en atletas masculinos sanos: potencia, aceleración, velocidad y agilidad de la extremidad inferior [Performance effects of functional knee brace removal and prolonged use in healthy male athletes: Lower extremity power, acceleration, speed, and agility]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 28(6), 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2025.01.004>
- Rogoschin, J., Preiser, T., Hansen, L., Potthast, W. y Komnik, I. (2025). Efectos cinéticos de las férulas descargadoras unicompilares en la artrosis medial de rodilla: un estudio longitudinal de la carga articular durante la marcha en nivel, escaleras y pendiente [Kinetic effects of unicompartmental unloader

braces in medial knee osteoarthritis: A longitudinal study of joint load during level, stair, and slope walking]. *Journal of Biomechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112593>

Sánchez Sánchez, J. A. (2023). Diseño e implementación de una app de monitorización de taquillas a través del módulo ESP32 y las tecnologías Wi-Fi, BLE y RFID [Trabajo de titulación].

Takhakh, A. M., Kadhim, F. M. y Chiad, J. S. (2013, noviembre). Análisis y medición de vibraciones en KAFO (órtesis rodilla-tobillo-pie) de tipo metálico y plástico [Vibration analysis and measurement in knee ankle foot orthosis for both metal and plastic KAFO type]. En ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (VO3BT03A050). American Society of Mechanical Engineers.

Trivedi, U. y Joshi, A. (2024). Avances en tecnología de férulas activas para la rodilla: una revisión de análisis de la marcha, accionamiento y aplicaciones de control [Advances in active knee brace technology: A review of gait analysis, actuation, and control applications]. *Heliyon*, 10, e26060. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26060>

Derechos de Autor© 2026 Soto Vega, Diego Alejandro; Nevárez Padilla, Julio Andrés; Parada Benítez, Avner Kalid; López-Aguilar, Héctor Alfredo.



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0, Attribution 4.0 International. Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.