

La Marcha

Aplicaciones tecnológicas y diseño de un sistema de reentrenamiento



Rodríguez Sotelo, José Luis

La Marcha. Aplicaciones tecnológicas y diseño de un sistema de reentrenamiento / José Luis Rodríguez Sotelo, Liliana Patricia Escobar Serna, Karol Bibiana García, [y otros nueve]; editado por Laura V. Obando Alzate. - Manizales: UAM, 2024

67 páginas: ilustraciones, fotografías a color (Colección: Proyección, Línea: Ingenierías, Serie: Cartillas)

ISBN impreso: 978-958-5558-48-9 ISBNe: 978-958-5558-50-2

1. Mecánica humana. 2. Locomoción humana. 3. Biomecánica. 4. Aparatos ortopédicos -- Diseño. 5. Ingeniería biomédica. 6. Extremidades inferiores -- Propiedades mecánicas

I. Escobar Serna, Liliana Patricia, autora. II. García Solano, Karol Bibiana, autora. III. Durango Idárraga, Sebastián, autor. IV. Barajas Sepúlveda, Diego Fernando, autor. V. Ángel López, Juan Pablo, autor. VI. Montoya Varela, Pablo, autor. VII. Risk Mora, David, autor. VIII. Cruz Calle, María Camila, autora. IX. Delgado Rivera, Sergio, autor. X. Jiménez Cortés, Hendric Nicolás, autor. XI. Molina Beltrán, Ricardo, autor. XII. Obando Alzate, Laura V., editora.

UAM 610.28 R696

CO-MaBABC

Fuente: Biblioteca UAM

© Editorial UAM- Universidad Autónoma de Manizales
Antigua Estación del Ferrocarril
Correo electrónico: editorial@autonoma.edu.co
Teléfono: +57 (6) 8727272 ext. 414
Manizales-Colombia

Miembro de la Asociación de Editoriales Universitarias de Colombia, ASEUC

Título: La Marcha. Aplicaciones tecnológicas y diseño de un sistema de reentrenamiento
Colección: Proyección
Línea: Ingenierías
Serie: Cartillas

Autores: José Luis Rodríguez Sotelo / Liliana Patricia Escobar Serna / Karol Bibiana García Solano / Sebastián Durango Idárraga / Diego Fernando Barajas Sepúlveda / Juan Pablo Ángel López / Pablo Montoya Varela / David Risk Mora / María Camila Cruz Calle / Sergio Delgado Rivera / Hendric Nicolás Jiménez Cortés/ Ricardo Molina Beltrán

Correos electrónicos: jlrodriguez@autonoma.edu.co / lilianae@autonoma.edu.co / karolgarcia@autonoma.edu.co / sebastiandi@autonoma.edu.co / dbarajas@autonoma.edu.co / jangel@autonoma.edu.co / pmontoyav7@gmail.com / david.riskm@autonoma.edu.co / mccc0416@gmail.com / sergiodr2103@hotmail.com / hendric.jimenezc@autonoma.edu.co / ricardo.molinab@autonoma.edu.co

Manizales, marzo de 2024
ISBN impreso: 978-958-5558-48-9 ISBNe: 978-958-5558-50-2

Edición y coordinación editorial: Laura V. Obando Alzate
Corrección de estilo: Matiz Taller Editorial
Diseño y Diagramación: Sebastián López Ubaque

Comité Editorial: Iván Escobar Escobar, Vicerrector Académico UAM. María del Carmen Vergara Quintero *PhD.*, Coordinadora Unidad de Investigación. Bellazmín Arenas Quintana *Mg.*, Coordinadora Unidad de Proyección. Luz Ángela Velasco Escobar *Mg.*, Coordinadora Unidad Enseñanza-Aprendizaje. Laura V. Obando Alzate, Editora y Coordinadora Editorial UAM. Brenda Yuliana Herrera Serna *PhD.*, representante Facultad de Salud. Juan David Correa Granada *PhD.*, representante Facultad de Ingenierías. Mónica Naranjo Ruiz *Mg.*, representante Facultad de Estudios Sociales y Empresariales. Angélica María Rodríguez Ortiz *Ph.D.*, Editora revista *Ánfora*. Luisa Fernanda Buitrago Ramírez *Mg.*, Directora revista *Araña que Teje*. Wbeimar Cano Restrepo *Mg.*, Coordinador Biblioteca. Diana Marcela Sánchez Orozco, representante Vicerrectoría Administrativa y Financiera. Diego Fernando Noreña Vélez, Asistente Editorial UAM.

Contenido

Introducción	9
Justificación	11
Objetivos	13
La marcha	15
Tecnología para reentrenamiento de la marcha	23
Una metodología para el desarrollo de un sistema de reentrenamiento	39
Discusión y conclusiones	55
Glosario	59
Referencias	63

Lista de figuras

- Figura 1. Eventos del pie en el ciclo de marcha **18**
- Figura 2. Fases del ciclo de la marcha **19**
- Figura 3. Esquema de sistema de reentrenamiento de la marcha que contiene las tres categorías **26**
- Figura 4. Estructura general de un sistema de rehabilitación de la marcha **28**
- Figura 5. Esquema de la patente «Sistema Entrenador de Marcha» de la Universidad Autónoma de Bucaramanga **31**
- Figura 6. Reporte de resultados terapéuticos de un dispositivo de reentrenamiento de la marcha con plataforma de tobillo (sistema G-EO) **37**
- Figura 7. Taller cocreativo (enero del año 2022, Manizales, Caldas) **46**
- Figura 8. Muestra artística de la evolución de la marcha **48**
- Figura 9. Ejemplo de alternativa A1. Mecanismo tipo Stephenson III **51**
- Figura 10. Alternativa A4. 3GDL (motor) **53**
- Figura 11. Equipo de investigadores del proyecto **58**

Lista de tablas

- Tabla 1. Requerimientos para la formulación de un proyecto **43**

Introducción

Existen enfermedades que comprometen los sistemas neurológicos o musculoesqueléticos que por su naturaleza afectan los componentes biológicos, psicológicos y sociales de las personas. Estas enfermedades pueden afectar varias funciones del ser humano (actividades de la vida diaria, autocuidado, socialización), por ejemplo, alteraciones de la marcha que involucran la capacidad de desplazarse de un lugar a otro. Existen protocolos de rehabilitación que los profesionales de la salud siguen para reentrenar la marcha y, así, recuperar la capacidad de realizar las diferentes actividades mencionadas.

Hay desarrollos tecnológicos que requieren reentrenamiento de la marcha, los cuales permiten una mayor comodidad para el fisioterapeuta y hay evidencia de que brindan mejores resultados durante la intervención. Los sistemas de reentrenamiento de la marcha son costosos, lo que dificulta su adquisición en centros de rehabilitación, en especial en países en vía de desarrollo. Por lo tanto, existe la necesidad de generar nuevos sistemas de reentrenamiento de la marcha que sean diseñados con énfasis en la ergonomía, la seguridad y el contexto socioeconómico de Colombia.

Esta cartilla es un instrumento divulgativo enfocado en promover el uso de tecnología como medio para el tratamiento de condiciones de salud, alrededor de un caso en el *diseño de un dispositivo para el reentrenamiento de la marcha*. El sistema desarrollado en este documento está orientado a personas con o sin afectaciones neurológicas, a ingenieros biomédicos en el diseño de productos en salud, con una perspectiva desde el reentrenamiento de la marcha. Aunque el enfoque viene de la tecnología, lo que centraría la cartilla en ingeniería y diseño industrial, se busca

que permita el acercamiento de profesionales en salud. Se espera que la cartilla sea útil como guía para quienes emprenden diseños de dispositivos relacionados con reentrenamiento de movimientos corporales, aunque de manera general podría ilustrar otros diseños de productos tecnológicos para tratamientos de salud.

Este documento se elaboró en el marco del proyecto *Sistema para el reentrenamiento de la cinemática de cadera, rodilla y tobillo en personas con condiciones de salud relacionadas con deficiencia en el patrón de marcha*, dentro de la convocatoria 874 de Minciencias para el fortalecimiento de proyectos en ejecución de Ctel en ciencias de la salud con talento joven e impacto regional y con el apoyo de la Universidad Autónoma de Manizales.

Justificación

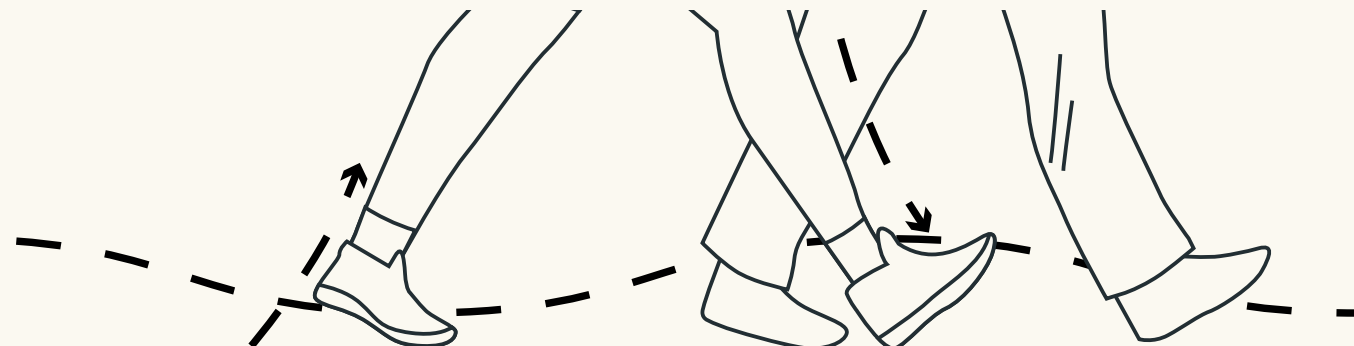
El desarrollo de proyectos de investigación con equipos de trabajo interdisciplinar que aborden problemáticas de salud, como en este caso, las deficiencias asociadas al patrón de marcha en conjunto con los desarrollos desde las áreas de la ingeniería y el diseño permiten aportar y generar soluciones a necesidades de la sociedad. En este sentido, las instituciones de educación superior, y particularmente la Universidad Autónoma de Manizales, están comprometidas con el desarrollo de la región en aras del mejoramiento de la calidad de vida de las personas, por lo que para ello es clave que los proyectos estratégicos institucionales guarden concordancia con dichas necesidades.

La marcha y los desarrollos tecnológicos asociados a su reentrenamiento requieren de conocimiento interdisciplinario y de un enfoque que facilite la participación de los usuarios (personas con alteración de la marcha, profesionales en salud). Esta cartilla ilustra el proceso de diseño de un dispositivo para el reentrenamiento de la marcha, promoviendo el uso de tecnología para la solución de problemas de salud.

Esta cartilla beneficia a estudiantes y profesionales en ingeniería, diseño y salud, como también a directivos de las instituciones prestadoras de servicios de salud, profesionales, usuarios y sus familias que requieren el uso de dispositivos de ayuda para la marcha en el proceso de rehabilitación funcional. Los beneficios están centrados en adquirir un mayor conocimiento en el diseño de tecnologías que pueden apoyar el reentrenamiento de la marcha y generar conciencia en relación con la marcha como actividad humana.

Objetivos


- Comprender el concepto de la marcha, sus fases y algunos tipos de alteraciones que puede presentar.
- Identificar y describir un sistema de reentrenamiento de la marcha y algunos sistemas tecnológicos a nivel nacional e internacional relacionados con la rehabilitación del patrón de marcha.
- Presentar un esquema metodológico encaminado al desarrollo de un sistema para el reentrenamiento de la marcha.



Capítulo 1

La marcha





La marcha, mejor conocida como «caminar», corresponde al uso del pie, la pierna y el muslo (miembros inferiores) con el fin de *desplazar el cuerpo de un lugar a otro estando de pie*. La forma de caminar permite revelar aspectos individuales de la personalidad, la autoestima, las posibles enfermedades y las situaciones emocionales (1). En la marcha, el cuerpo humano se desplaza hacia adelante, soportando el peso de forma alternada por los miembros inferiores: una pierna recibe el peso del cuerpo y la otra se dirige hacia adelante para generar el movimiento y mantener el equilibrio. Esta función se repite en ambos miembros inferiores, dando lugar al *ciclo de la marcha* (2).

El ciclo de la marcha se divide en dos períodos. El primero, *apoyo o soporte*, hace referencia al momento donde el pie se encuentra en contacto con el piso y corresponde al 60% del ciclo. El segundo, *oscilación o balanceo*, ocurre cuando el pie se encuentra elevado respecto al suelo, favoreciendo el avance del miembro inferior. Este período es equivalente al 40 % del ciclo (1). Además de los períodos, existen otros elementos claves al analizar el ciclo de la marcha, los cuales son: *contacto inicial*, *despegue de los dedos* y *contacto final*, los cuales pueden ser observados en la figura 1.

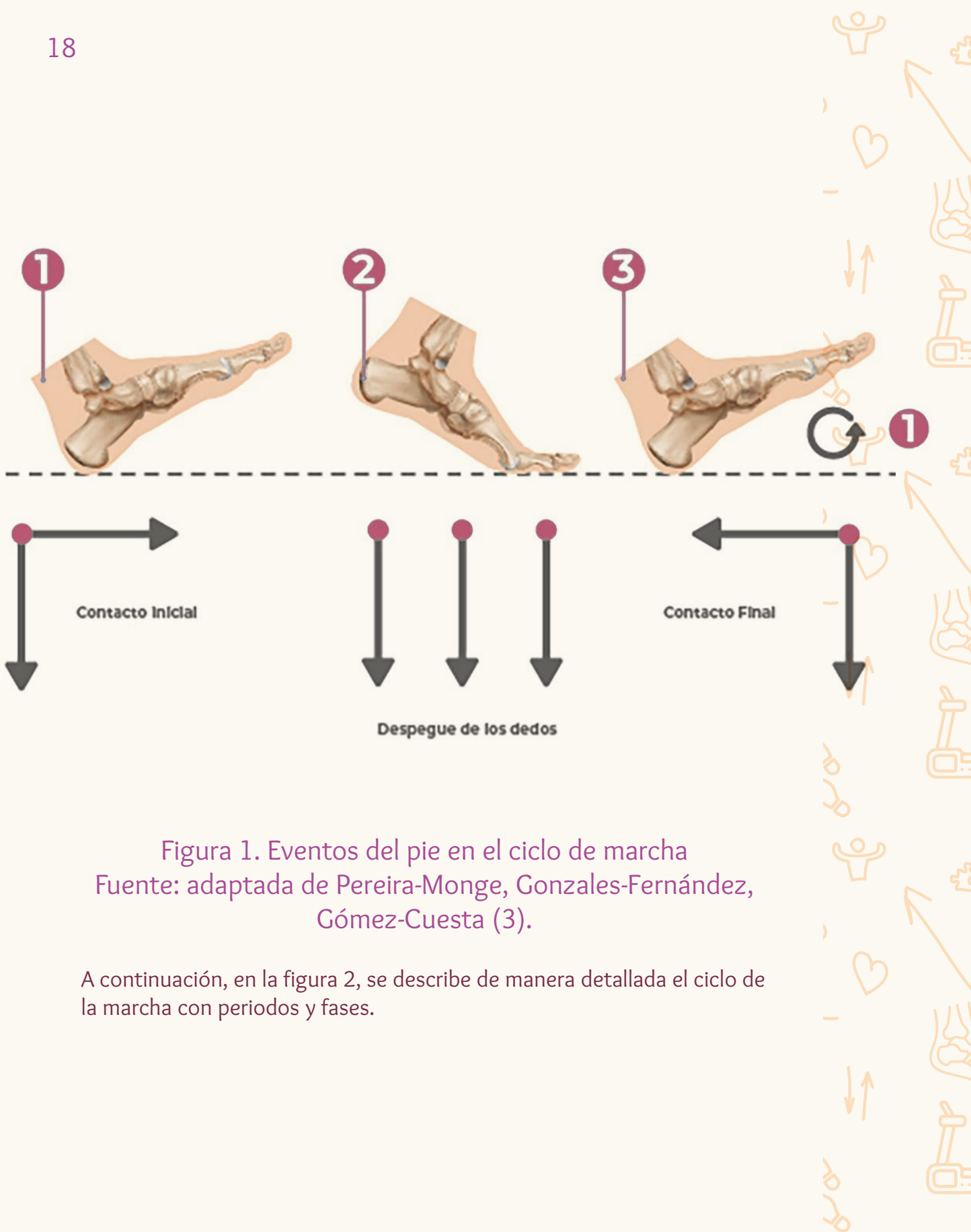


Figura 1. Eventos del pie en el ciclo de marcha
Fuente: adaptada de Pereira-Monge, Gonzales-Fernández,
Gómez-Cuesta (3).

A continuación, en la figura 2, se describe de manera detallada el ciclo de la marcha con periodos y fases.

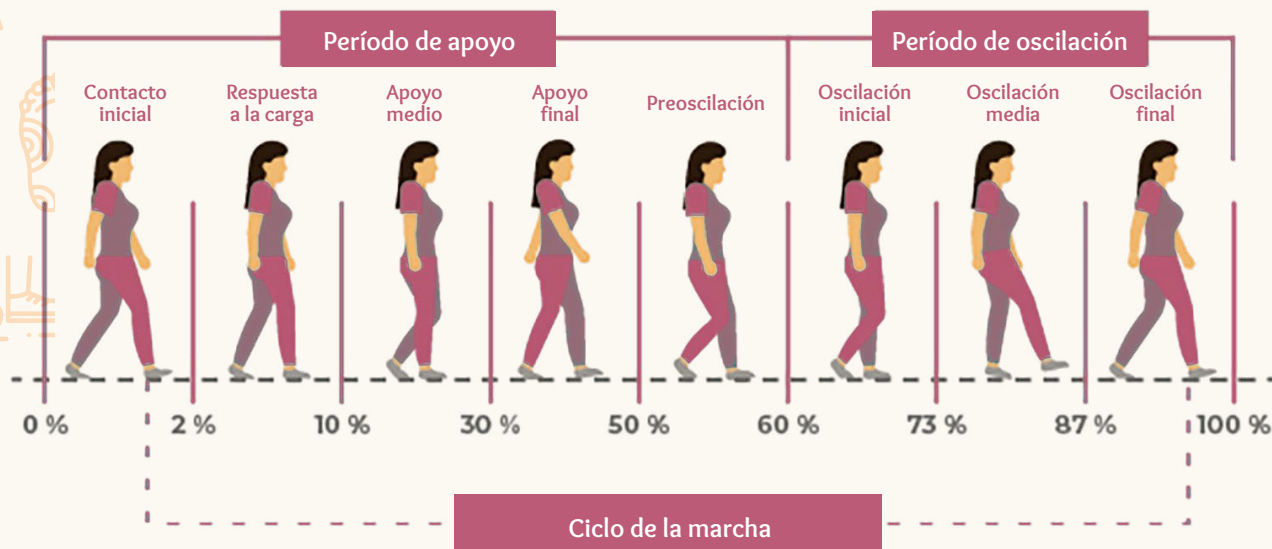


Figura 2. Fases del ciclo de la marcha
Fuente: adaptada de Pereira-Monge, Gonzales-Fernández, Gómez-Cuesta (3).

Es importante mencionar que la marcha puede verse alterada por diversas enfermedades o lesiones musculoesqueléticas. Las personas pueden presentar síntomas como: debilidad, inestabilidad, lentitud, rigidez, pesadez, tropiezos, tambaleos, caídas, entumecimiento, dolor y fatiga en miembros inferiores (4). Como consecuencia, es posible que la marcha se modifique y presente alguno de los siguientes comportamientos (en los códigos QR podrán apreciarse videos asociados a dichos comportamientos):

Marcha atáxica: se caracteriza por tener los pies más separados de lo normal. Se observa poca coordinación y dificultad para mover de forma alternada los miembros inferiores. Además, se presenta poco control de la parte superior del cuerpo (4).



Marcha de pato o balanceante: los pies se posicionan más separados de lo normal, los miembros inferiores se balancean, el apoyo se hace en la punta de los pies y generalmente se relaciona con debilidad de los glúteos (4).



Marcha distónica: hay posición anormal y sostenida de los pies durante el ciclo (el apoyo se da en el borde lateral del pie, dirigido hacia abajo o empinado), las caderas se observan exageradamente dobladas y generalmente el movimiento está alterado (4).

Marcha coreica: la marcha es similar a una danza, los movimientos son generalmente lentos y los pies se encuentran muy separados. Es común que se observe, durante el ciclo, que la persona doble las rodillas y mueva los brazos de manera involuntaria y poco coordinada (4).



Marcha antálgica: la persona cojea, evita soportar todo el peso sobre la pierna que se encuentra lesionada, camina como si tuviera una espina en la planta del pie y los movimientos en las articulaciones disminuyen (4, 5). Normalmente, se presenta dolor en alguna región de los miembros inferiores que empeora con el soporte del peso (4).

Marcha hemiparética: es una alteración donde se realiza un movimiento circular anormal a nivel de la cadera de uno de los miembros inferiores, generalmente se presenta cuando la persona ha tenido un derrame cerebral (enfermedad cerebro vascular). Sus síntomas son debilidad y la planta del pie se dirige hacia abajo (empinado). Es frecuente que la pierna se sienta rígida (4).



Marcha parapléjica: en esta alteración se presenta espasticidad (aumento de la tensión muscular) y debilidad, con lo que se genera un patrón de marcha en tijera en ambas piernas (los muslos se intentan cruzar uno sobre otro) (4).



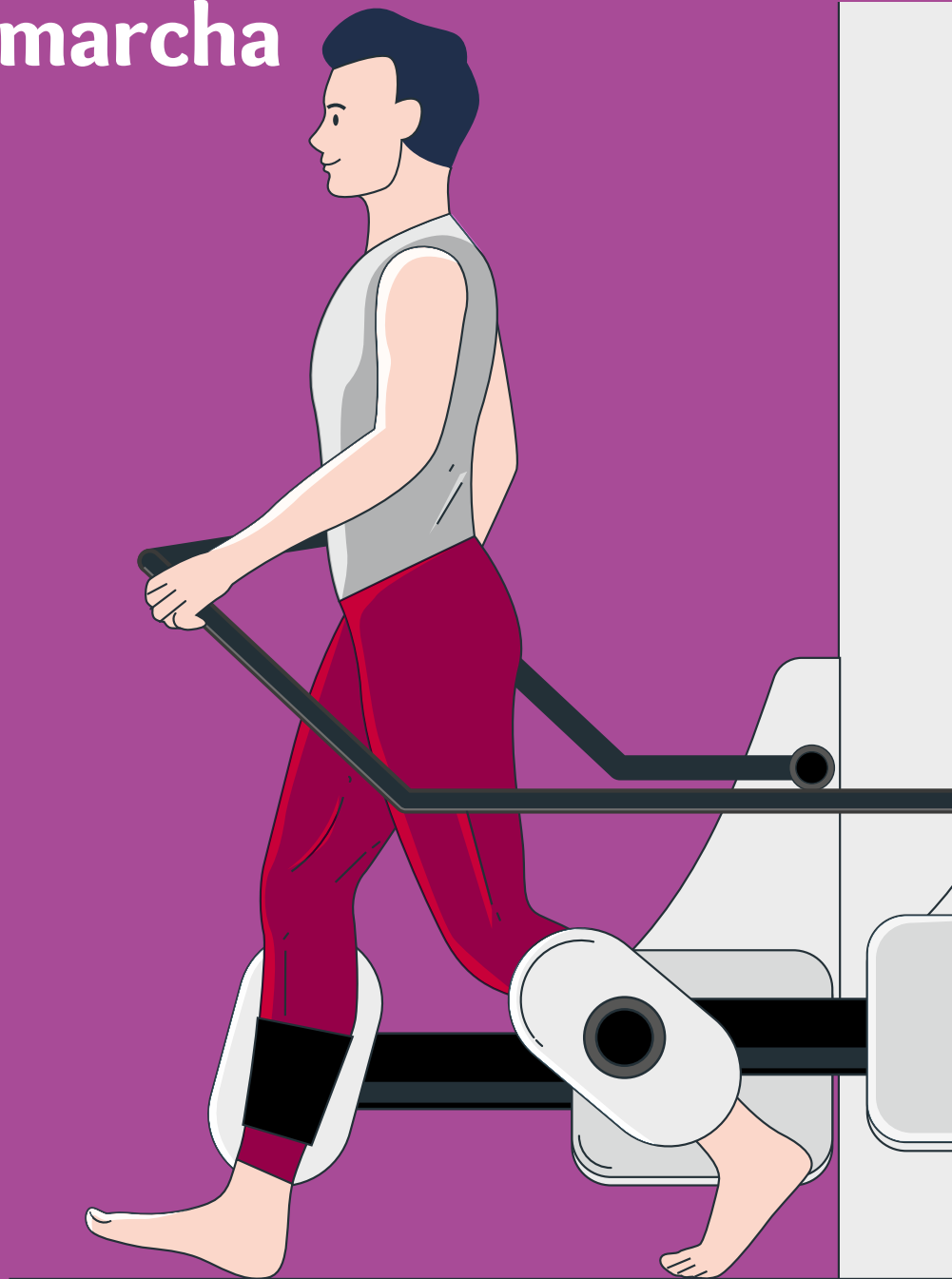
Estos son solo algunos ejemplos comunes de las deficiencias que se pueden presentar y estar asociadas al patrón de marcha. Dependiendo del origen (etiología) que causa la alteración en la marcha, esta puede mejorar mediante una rehabilitación funcional; sin embargo, hay algunos problemas que no dependen de dicha rehabilitación, sino de aspectos intrínsecos del cuerpo humano que, de llegar a mejorar, se podrá realizar un proceso de recuperación adecuado de la marcha, y con ello el impacto en la independencia funcional, dado que la marcha es una actividad humana que facilita y permite el desarrollo del ser humano en los niveles corporal, individual y social.


Sin embargo, en patologías para las cuales las personas no podrían volver a su marcha habitual (tal es el caso de las lesiones medulares completas), es importante aplicar el proceso de rehabilitación funcional para estimular y mantener las estructuras musculares y óseas, evitando mayores complicaciones.



Capítulo 2

Tecnología para reentrenamiento de la marcha





Diseños nuevos y complejos de sistemas de rehabilitación generan alternativas aplicadas al reentrenamiento de la marcha, logrando procesos de rehabilitación específicos y eficientes en escenarios como centros terapéuticos y clínicas.

La situación de vulnerabilidad en la población —causada por la pobreza, dificultades en el acceso a servicios, políticas públicas insuficientes, requerimientos no satisfechos de servicios de rehabilitación, entre otros— constituyen barreras que dificultan la inclusión social, lo que repercute en la calidad de vida (6). Es por lo anterior que surge la necesidad de ofertar mayores y mejores servicios accesibles, eficaces, interdisciplinarios y oportunos; en especial, las intervenciones de rehabilitación.

Con la evolución tecnológica se han desarrollado ideas para complementar y apoyar los procesos terapéuticos y la fabricación de dispositivos ortopédicos. Ello, con el fin de impactar positivamente los resultados en la rehabilitación funcional y reducir el agotamiento físico de los profesionales. En este sentido, los avances dispuestos en los procesos de rehabilitación —y en especial, aquellos enfocados a la marcha— están apoyados por diferentes posibilidades tecnológicas en comparación con los procesos convencionales en los cuales el profesional planea, ejecuta, supervisa y evalúa las rutinas y procesos de rehabilitación (7).

En la actualidad existen diferentes sistemas para el reentrenamiento de la marcha apoyados desde la ingeniería, teniendo la posibilidad de configurar sus parámetros según las características propias de la persona

y logrando eficiencia en la rehabilitación (8). Los sistemas tecnológicos computarizados permiten tener un control sobre las articulaciones que participan en la ejecución de la marcha, siendo esto un valor fundamental en el acompañamiento del proceso de rehabilitación. Lo anterior, ya que los dispositivos presentan distintos modos de uso y características que contribuyen a diferentes grados de asistencia durante la terapia. Esto permite que el fisioterapeuta se enfoque en el paciente, ofreciendo una intervención de calidad. Estos sistemas poseen una estructura y unas características comunes, de las cuales surgen tres categorías (9), como se puede observar en las figuras 3 y 4:

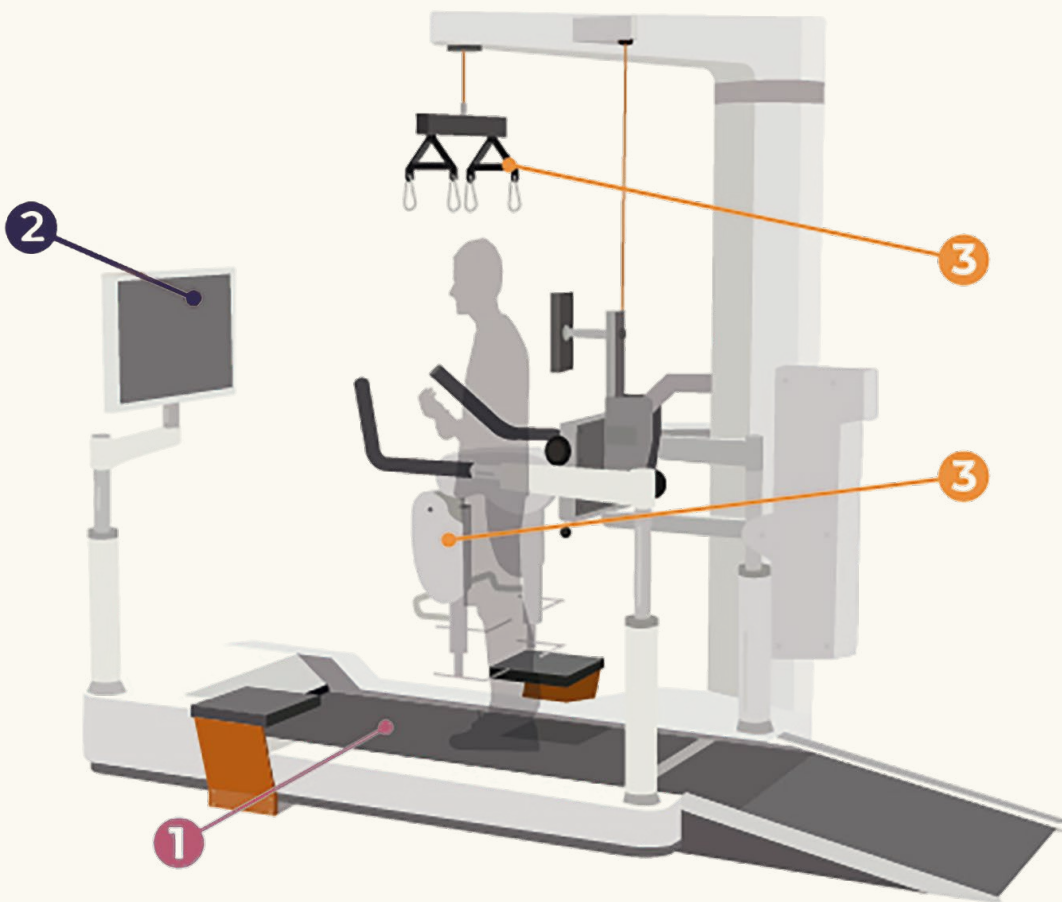


Figura 3. Esquema de sistema de reentrenamiento de la marcha que contiene las tres categorías
Fuente: adaptada de Hobbs, Artemiadis (10).

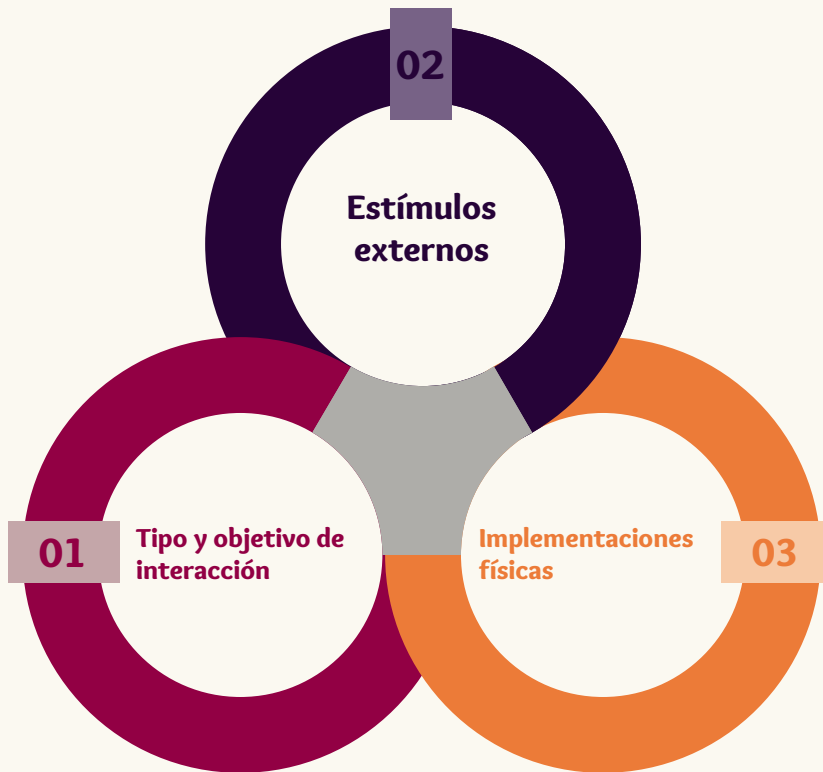
Tipo y objeto de interacción: se refiere a la relación entre la persona y la máquina, basada en el objetivo de la terapia (física o no). Puede haber interrelación física para corregir errores al caminar (corrección de errores de la marcha a través de la comunicación entre máquina y persona); por ejemplo: pasar de caminar de un terreno regular a uno irregular. Esto puede ser simulado, por ejemplo, usando una banda caminadora en el sistema, lo que recrea el terreno y permite encontrar los errores. Un ejemplo de una interacción no-física es cuando la persona recibe información por medio de una pantalla, relacionada con su actividad en la terapia y qué debe hacer para mejorarla, brindando una especie de realimentación conocida como bio-realimentación (9).

Estímulos de los dispositivos hacia las estructuras corporales: se requiere que las partes del cuerpo que están comprometidas por el problema de la marcha se puedan llevar a un estado funcional. Ejemplo: en un derrame cerebral se afecta la parte del cerebro que coordina la marcha y mediante estímulos externos se puede llevar a cabo una recuperación. El reentrenamiento de la marcha puede hacer uso de información auditiva y visual para fomentar la coordinación, junto con otros estímulos externos que son conocidos como «estímulos hápticos», los cuales reproducen experiencias táctiles en entornos virtuales. Estos estímulos sensoriales influyen en el movimiento de la persona como respuesta corporal para evitar perder el equilibrio y, consecuentemente, una caída (9).

Implementaciones físicas: se puede reentrenar la marcha con implementaciones físicas en compañía de diferentes elementos, entre ellos: sistemas de soporte de peso corporal, exoesqueletos y órtesis, sistemas de estimulación eléctrica o magnética o plataformas de tobillo. Los sistemas de soporte de peso corporal utilizan un arnés para reducir la cantidad de peso que tenga que levantar el terapeuta, facilitando el balance del paciente y evitando caídas y posibles lesiones. Los exoesqueletos y órtesis de miembros inferiores son instrumentos mecatrónicos o mecánicos que ayudan la movilidad de las piernas de la persona mediante una fuente de potencia externa. Los sistemas que producen estímulos eléctricos o magnéticos generan contracciones musculares de manera controlada. Las plataformas de tobillo son sistemas que solo están en contacto directo con el pie del usuario y estas hacen mover el pie de una manera controlada en una trayectoria.

Las plataformas de tobillo, acompañadas de un sistema de soporte de peso corporal, se pueden usar en personas que no son capaces de ponerse de pie (9).

En la figura 4 se puede observar un esquema donde se identifican de manera visual las categorías.



- 01**
- Simulación de errores mediante interacción física
 - Corrección de errores mediante interacción física
 - Retroalimentación de desempeño mediante interacción no física
- 02**
- Sistemas de coordinación entre miembros
 - Percepción háptica
 - Equilibriocepción
 - Audición y visión
- 03**
- Entrenamiento orientado a objetivos y tareas
 - Estimulación eléctrica y magnética
 - Exoesqueletos y órtesis
 - Soporte del peso corporal
 - Entrenamiento en banda caminadora
 - Foot plates

Figura 4. Estructura general de un sistema de rehabilitación de la marcha

Fuente: adaptada de Equipos interferenciales (9).

A continuación, se presentan y describen algunas soluciones (de orden nacional, latinoamericano y con fronteras internacionales) para la rehabilitación de la marcha que se encuentran en el mercado o en la academia para apoyar procesos terapéuticos y de rehabilitación. Además, se muestran también algunas iniciativas a nivel colombiano que demuestran el constante interés y aporte hacia la sociedad por parte de las instituciones que aterrizan las iniciativas en productos como patentes o prototipos.

Soluciones a nivel nacional y latinoamericano

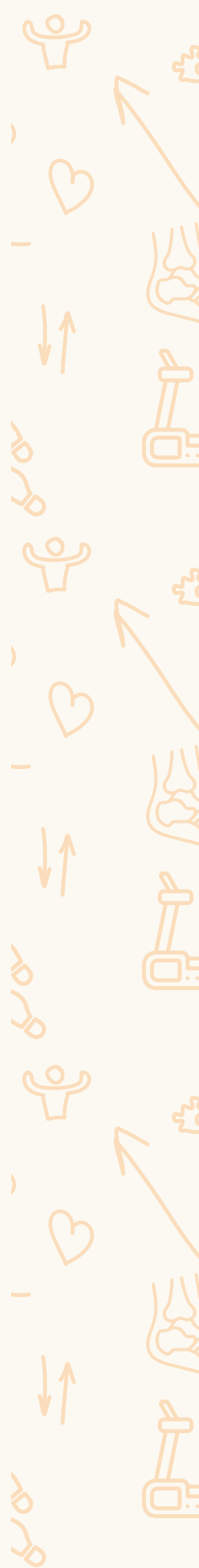
En Latinoamérica se han desarrollado diferentes tecnologías orientadas a la rehabilitación basadas en el estado del arte en dicho campo de investigación. Particularmente en Colombia, se puede citar el diseño de un mecanismo de soporte corporal para el reentrenamiento de la marcha de la Universidad Autónoma de Occidente (UAO) (28). Este sistema consta de un pedestal y un arnés, los cuales son de fácil ajuste a las medidas corporales de la persona. Existen otros dispositivos robóticos como el sistema de *biofeedback* (bio-realimentación) desarrollado por la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA) para rehabilitación de marcha asistida por un exoesqueleto. Este sistema tiene interacción física con la persona, corrigiendo errores de la marcha y generando un sistema de retroalimentación a partir de información del sistema nervioso de la persona (28).

En México se ha desarrollado el «Sistema de entrenamiento de la marcha para infantes entre 3 y 12 años» por el Instituto Politécnico Nacional de México (IPNM). Este sistema cuenta con un armazón mecánico, el cual permite a la persona realizar movimientos de braceo de manera sincronizada y automatizada como elevar, doblar y estirar las piernas para simular la marcha a partir de un mecanismo. El armazón soporta el peso de los pacientes mediante un arnés de seguridad (28). En Latinoamérica la mayoría de los proyectos se basan

en exoesqueletos reprogramables y no-reprogramables de desarrollo estadounidense, europeo y asiático; sin embargo, estos no cuentan con subsistemas de percepción táctiles o subsistemas de interacción orientado a objetos y tareas.

Patentes de dispositivos de entrenamiento de la marcha

En el mundo se encuentran cientos de patentes relacionadas con dispositivos de rehabilitación. Quizá uno de los más mencionados es el Lokomat Gait Trainer (11), cuya estructura se presentó en la figura 3. En Colombia el desarrollo tecnológico alrededor de estos dispositivos es escaso. Sin embargo, en el año 2018, un profesor y un estudiante de ingeniería mecatrónica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga patentaron el «Entrenador de marcha para el ejercicio de los miembros inferiores humanos», que «... ha sido enfocado para pacientes que tengan hemiplejía (parálisis de la mitad del cuerpo debido a un accidente cerebrovascular)» (13). Este dispositivo se caracteriza, de acuerdo con la figura 3, como un sistema que posee interacción física e integral, permitiendo al cerebro que se adapte nuevamente al proceso de plasticidad (neuroplasticidad). Las rutinas y movimientos los propone únicamente el fisioterapeuta, es decir no cuenta con rutinas preprogramadas. El dispositivo no realiza estimulación eléctrica y no utiliza exoesqueletos ni órtesis. Contiene un arnés de soporte y brinda la posibilidad de tener una plataforma para colocar los pies. No se encuentra información de su uso en centros de salud u hospitales y el costo estimado de fabricación de un prototipo es de 12 millones de pesos, que contrasta con dispositivos consolidados en el mercado, como el Lokomat, cuyo precio supera los mil millones de pesos. A continuación, en la figura 5 se presenta un esquema ilustrativo de la patente:



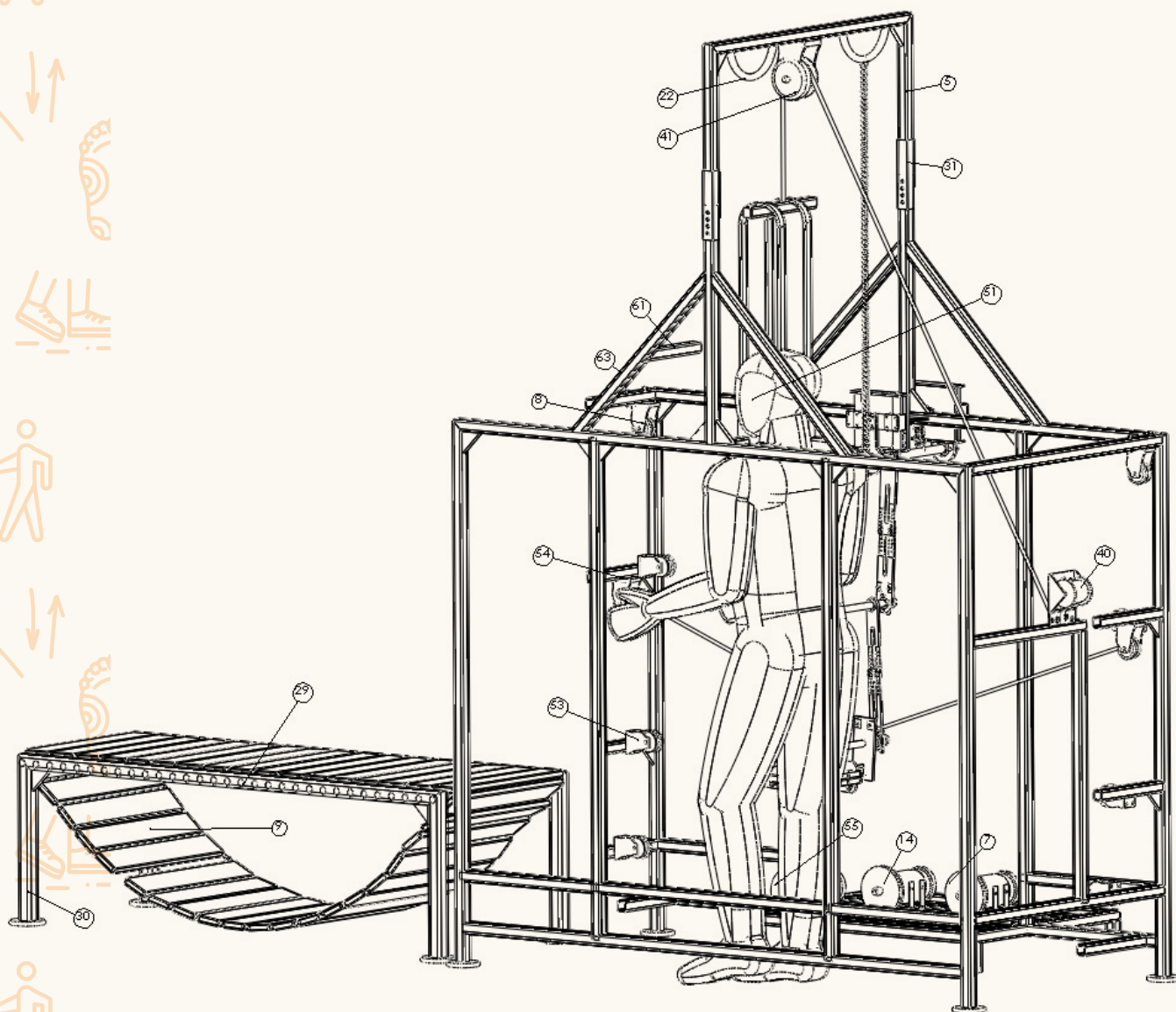


Figura 5. Esquema de la patente «Sistema Entrenador de Marcha» de la Universidad Autónoma de Bucaramanga
Fuente: tomada de OMPI (13).

Sin embargo, también se emplean para reentrenamiento de la marcha. Debido al costo de estos dispositivos su adquisición por el público es limitado, aún así, existen tecnologías más asequibles como el equipo denominado Grillo, de la empresa Ormesa, que es un andador de apoyo para adultos y niños, diseñado para facilitar el movimiento de las personas con movilidad reducida y promover la mayor independencia posible (21). Su costo se encuentra alrededor de dos mil dólares.

La tecnología presentada a continuación está orientada principalmente para las instituciones de salud, utilizada para procesos de rehabilitación de la marcha en todas sus etapas y requiere del apoyo de personal de salud para su manejo. Los dispositivos están conformados por caminadoras, estructuras móviles, pantallas, sensores, entre otras características.

Para procesos tempranos de rehabilitación, la empresa Hocoma ha desarrollado equipos que han marcado la diferencia en el proceso de rehabilitación, siendo Erigo uno de ellos (17). Erigo permite que un terapeuta de manera segura y eficiente proporcione estimulación sensoriomotriz; es decir, estimulación de todos los sentidos a través de actividades controladas.

Alterg con su caminadora antigraavedad o *Anti-Gravity Treadmill* integra tecnología patentada de presión diferencial de aire de la NASA, un sistema de calibración e información en tiempo real usando una cámara de aire presurizado para reducir uniformemente la carga y el peso corporal (24).

La empresa alemana Zebris desarrolló el equipo Rehawalk, diseñado para el análisis y tratamiento de trastornos de la marcha en rehabilitación neurológica, ortopédica y geriátrica (27). El entrenamiento se puede llevar a cabo cuando se utiliza un sistema de reducción de peso. También permite iniciar terapia en etapas tempranas. Otro ejemplo de lo anterior es el equipo Rysen, de la empresa Motek, que facilita la terapia avanzada de la marcha con apoyo del peso corporal (25). El sistema está fundamentado en un robot paralelo comandado por cables, que al adaptar las fuerzas de asistencia de soporte corporal en diferentes direcciones permite que los fisioterapeutas dispongan de una variedad

Estos últimos equipos nombrados, dan cuenta de la condición holística de rehabilitación que va no sólo enfocada a la marcha, sino a entender las condiciones directamente paralelas como aspectos neurológicos, ortopédicos e incluso geriátricos, integrando elementos como las tecnologías computacionales para apoyar los procesos de interacción hombre-máquina.

Para finalizar, se encuentran dispositivos que están diseñados para una de las partes del miembro inferior, como rodilla o cadera, y que pueden ser usados en diferentes etapas de rehabilitación o incluso en usuarios que han tenido amputación de pierna y requieren reentrenar la marcha.

El dispositivo «Rheo Knee XC» de la empresa Össur es una rodilla controlada por un microcomputador y está diseñada para apoyar a los pacientes desde la rehabilitación temprana hasta la recuperación total (16).

Otro ejemplo es el dispositivo «HFAD» de la organización Orthoiberica. Este es un sistema para asistir la flexión de cadera (18). El sistema ha sido diseñado para mejorar el desempeño de la marcha y consiste en un cinturón ubicado a nivel de la pelvis y en dos bandas de tensión sujetas al zapato.

Meditouch desarrolló el LegTutor para rehabilitar la rodilla a través de una órtesis asistida por motor y por *software* para llevar a cabo movimientos de flexión y extensión y para evaluar el avance en el proceso de rehabilitación (19).

Teniendo en cuenta el interés por abordar estas problemáticas y brindar soluciones a las mismas desde diferentes disciplinas, por ejemplo, desde la tecnología que se ha encargado de fortalecer dichos procesos y ser un apoyo a los especialistas de rehabilitación con el diseño y desarrollo de dispositivos o aparatos de tipo eléctrico, mecánico, mecatrónico, entre otros. A continuación, se brindan unos apartados sobre estos desarrollos.

Terapias para reentrenamiento de la marcha usando tecnología

El uso de sistemas para el reentrenamiento de la marcha ha evolucionado, lo cual ha permitido un mayor campo de actuación y el fortalecimiento de las bases teóricas. Estas tecnologías requieren de repeticiones continuas que favorecen el aprendizaje motriz y aportan conocimientos relacionados con parámetros objetivos para prescribir y hacer seguimiento al tratamiento. Los dispositivos de reentrenamiento de la marcha involucran sistemas complejos que interactúan entre sí con los sistemas musculoesquelético y nervioso. El uso de los dispositivos puede traer consigo algunas desventajas, tales como el costo y la posible disminución en la relación fisioterapeuta – usuario, pero hay que tener en cuenta las ventajas relacionadas con la capacidad para trabajar los componentes neuroortopédicos y los procesos de plasticidad neuronal que facilitan la recuperación de esquemas motores perdidos, así como el tono muscular, la fuerza, el equilibrio, el control de tronco y la capacidad funcional.

Es importante tener en cuenta que al inicio del programa de reentrenamiento de la marcha se debe acompañar de una adecuada evaluación de las características de la marcha tales como las fases, la velocidad con el fin de proporcionar un diagnóstico y objetivo de tratamiento y planear la intervención teniendo en cuenta parámetros terapéuticos como el tiempo, la velocidad, grado de soporte corporal, o el rango de movimiento de caderas y rodillas, las cuales se pueden ir ajustando a lo largo de las sesiones en función de la evolución del usuario (29).

Se recomienda que el uso de los sistemas de reentrenamiento de la marcha se complemente con técnicas de terapia física, ya que esto hace que el plan de rehabilitación funcional sea más eficaz y eficiente para el usuario. En estos casos se deben tener en cuenta requisitos como la capacidad para colaborar y comprender comandos verbales, visuales y de movimiento, además de prescribir de manera progresiva la intensidad,



el tiempo y la velocidad del entrenamiento, ya que puede variar en cada persona (30).

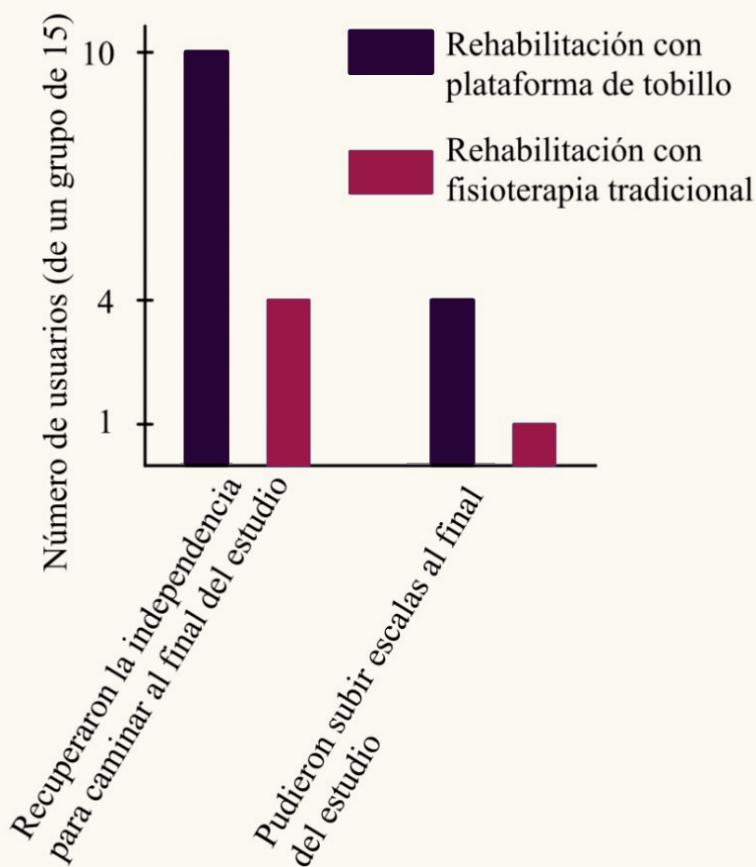


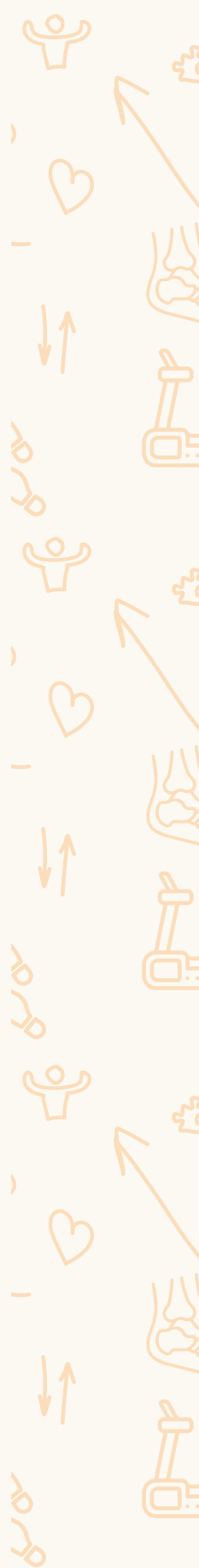
Figura 6. Reporte de resultados terapéuticos de un dispositivo de reentrenamiento de la marcha con plataforma de tobillo (sistema G-EO)

Fuente: adaptada de Hesse et al., (32), Hesse et al., (33).

Nota: Dos grupos separados de pacientes con accidente cerebrovascular subagudo FAC 0-2 al inicio del estudio.

Un ejemplo de rehabilitación con tecnología en comparación con rehabilitación tradicional se encuentra en un estudio realizado por los investigadores de la empresa G-EO Systems (32,33), para lo cual se aplicaron los procedimientos a dos grupos separados de 15 personas con accidente cerebrovascular subagudo de categoría de deambulación funcional en los niveles del 0 al 2, (con sus siglas en inglés: FAC 0-2), es decir desde un nivel totalmente pasivo (0) a un nivel activo-asistido (2). En una sesión de 30 minutos con la terapia tradicional se alcanzaron a realizar entre 50 a 100 pasos, mientras que con el equipo tecnológico se alcanzaron a realizar entre 1200 y 2000 pasos. Finalmente, el resultado muestra que con el equipo el 67% de las personas mejoraron la independencia en la marcha, mientras que con terapia tradicional lo hicieron el 27% de las personas. Por otro lado, con el equipo, el 27% de las personas lograron subir escalones, mientras que el 7% de las personas lo pudieron hacer usando terapia tradicional.


De esta manera la aplicación de la tecnología brinda nuevos estándares de rehabilitación en términos de versatilidad, así como el ofrecimiento de un amplio rango de posibles aplicaciones, ajustándose a las necesidades de cada persona de manera individual.



Capítulo 3

Una metodología para el desarrollo de un sistema de reentrenamiento





El contexto en el que se desarrolla este documento es el del *diseño de un dispositivo para el reentrenamiento de la marcha*. La perspectiva inmediata del problema es la de reproducir el movimiento de los miembros inferiores al caminar. Desde lo disciplinar el problema del movimiento está en la mecánica, y particularmente en la biomecánica. Este punto de vista explica el matiz del enfoque de diseño asumido para este proyecto: uno enfocado en diseñar un producto que resuelva un problema desde la ingeniería. Por conveniencia y oportunidad se asumió el enfoque desarrollado por el Prof. Robert Norton en varias décadas de ejercicio de la Ingeniería Mecánica en proyectos de diseño. Vale la pena aclarar que el proceso de diseño de Norton no es distinto de otros en ingeniería (por ejemplo, mecatrónica o de diseño de producto), pasos más, pasos menos, inicia con la identificación de la necesidad, y termina con la producción, en un proceso que por su naturaleza no es lineal y es iterativo (31). Los diez pasos del proceso de diseño propuesto por Norton (31) son: «identificación de la necesidad, investigación preliminar, planteamiento de la meta, especificaciones de desempeño, ideación e invención, análisis, selección, diseño detallado, creación de prototipos y pruebas y producción».

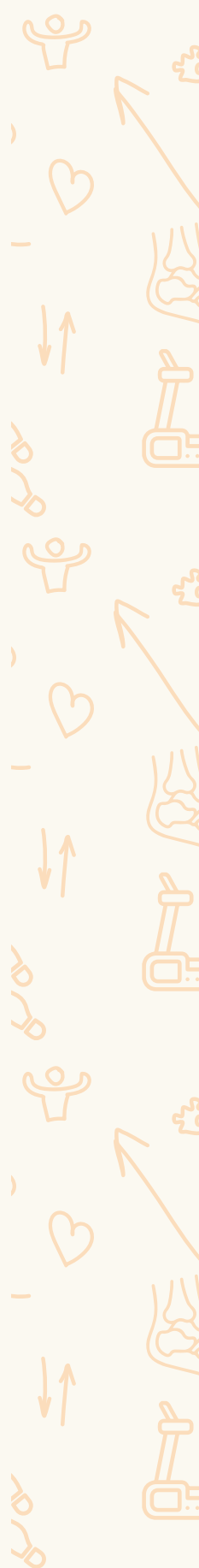
Este documento se enfoca en ilustrar el proceso de diseño, más que el producto mismo, por lo que las siguientes descripciones se realizan con esa premisa.

La *identificación de la necesidad* fue espontánea en alguna medida, derivando de un proyecto anterior sobre el diseño de un exoesqueleto para la asistencia de la marcha (34). La naturaleza de la necesidad, la

rehabilitación o reentrenamiento de la marcha, condujo a la formación de un equipo de investigadores en salud (fisioterapia), diseño (diseño industrial), e ingeniería (mecánica, electrónica, biomédica). La *investigación preliminar* se desarrolló usando bases de datos académicas y vigilancia tecnológica de productos comerciales, llegando a un inventario significativo de conceptos y tecnologías para rehabilitar o reentrenar la marcha. Este paso permitió ajustar la expectativa y acotar el problema, evidenciando que alcanzar el estado del arte en la asistencia de la marcha sería una labor demandante en recursos financieros y técnicos, por ejemplo, continuando el camino del diseño de un exoesqueleto. Un paso clave, al menos en la experiencia del proyecto, es el *planteamiento de la meta*. La premisa planteada por (31), «debe expresarse en términos de visualización funcional, en lugar de cualquier solución particular», facilita centrarse en el problema, no en la solución. Por ejemplo, para el proyecto permitió romper con el preconcepto de un exoesqueleto y, tal vez más importante, revisar el problema en el contexto regional, en el que, en la experiencia de los profesionales en salud del proyecto, la implementación de tecnología para el reentrenamiento de la marcha es incipiente. Las *especificaciones de desempeño*, entendidas como «lo que el sistema debe hacer» deben ser multidimensionales, por ejemplo, desde la perspectiva de los usuarios de la solución. En el caso del reentrenamiento de la marcha, como en la solución de otros problemas de salud, se pueden considerar dos usuarios principales: la persona objeto del reentrenamiento (en otros casos terapia), y el profesional de la salud. El contexto indica algunos desempeños o requerimientos (edad, talla, peso), mientras la información que viene de los profesionales de salud permite refinar características (condiciones de salud, niveles de asistencia, patrones biomecánicos, espacio típico en el que se desarrollan las terapias).

En concordancia con lo expuesto anteriormente, para la formulación de dichos requerimientos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Es esencial el propósito de la determinación de los requerimientos. El objeto no es conocer todos los requerimientos, sino darse cuenta de cuáles son aquellos que no se encuentran condicionados para aprovechar esa libertad en la búsqueda de soluciones.
- La formulación de requerimientos ficticios suele hacer que el problema admita soluciones ventajosas, más no comprobables.



Es importante agregar los tipos de requerimientos que se han de tener en cuenta en la formulación de un proyecto (35):

Tabla 1. Requerimientos para la formulación de un proyecto

Requerimientos de uso	Son aquellos que por su contenido se refieren a la interacción directa entre el producto y el usuario
Requerimientos de función	Son aquellos que por su contenido se refieren a los principios físico-químico-técnicos de funcionamiento
Requerimientos estructurales	Son aquellos que por su contenido se refieren a los componentes, partes y elementos constitutivos de un producto.
Requerimientos técnico-productivos	Son aquellos que por su contenido se refieren a los medios y métodos de manufacturar un diseño
Requerimientos económicos o de mercado	Son aquellos que por su contenido se refieren a la comercialización distribución y demanda potencial del producto por parte de compradores individuales o institucionales.
Requerimientos formales	Son aquellos que por su contenido se refieren a los caracteres estéticos de un producto
Requerimientos de identificación	Son aquellos que por su contenido se refieren a las presentaciones bidimensionales o tridimensionales

Teniendo en cuenta lo anterior, se pueden adicionar otros requerimientos de tipo ambiental, social, cultural y en general, todos

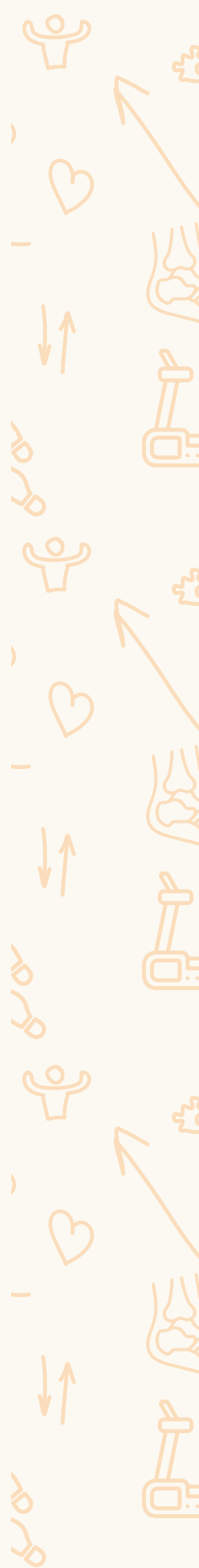
- Se debe considerar un mecanismo que facilite el movimiento teniendo en cuenta los grados de libertad definidos.

Para el proyecto este paso se desarrolló en reuniones semanales de un equipo interdisciplinario de ingenieros, diseñadores, y fisioterapeutas. Se destaca que el paso se realizó en un taller cocreativo en el que se amplió el grupo de trabajo, incluyendo ingenieros, diseñadores, fisioterapeutas y usuarios potenciales que eran ajenos al proyecto, y que aportaron desde su experiencia profesional y desde su vivencia personal. La etapa de *ideación e invención* se desarrolló en un taller cocreativo mediado por un profesional de diseño industrial ajeno al proyecto. Se destaca la importancia de un espacio propicio para la creación y la expresión libre de ideas (en el caso del proyecto que soporta este documento fue en un taller de diseño). En la experiencia del equipo es tan importante la actitud como el espacio: se requiere de un trabajo colectivo con liderazgos, pero sin jerarquías y con una postergación intencional de los juicios de las ideas. En este punto resultó clave la mediación del profesional de diseño. Las etapas de *ideación e invención*, *análisis*, *selección*, y *diseño detallado* son, al menos para el proyecto que inspiró esta cartilla, marcadas por los perfiles profesionales que demanda el diseño. Cada profesión y oficio aportan desde su perfil, por ejemplo, los diseñadores desde ergonomía y usabilidad, los ingenieros mecánicos desde el diseño de máquinas, los ingenieros electrónicos desde el control, y los ingenieros biomédicos desde la biomecánica. Aunque los procesos deben ser articulados y transdisciplinarios, la especialidad suele llevar a independizar las labores. En este punto es clave el liderazgo de los profesionales en salud, que transversalizan los diseños y los enfocan en el cumplimiento de las especificaciones de desempeño.

Para el proyecto de diseño de un dispositivo de reentrenamiento de la marcha las etapas de *producción de prototipos* y la *producción* aún no se alcanzan. Para los prototipos se tiene un avance en la forma de simulaciones mediante modelos geométricos por computador, que, aunque no reemplazan a los prototipos, permiten correcciones y ajustes en etapas preliminares y con un costo menor. La simulación del espacio del producto usando impresiones de planos de vistas ortogonales en escala natural también facilita la evaluación de percepciones y el desarrollo de sugerencias, por ejemplo, en el desarrollo de talleres cocreativos.



Figura 7. Taller cocreativo (enero del año 2022, Manizales, Caldas)



Para el proyecto del diseño del dispositivo para el reentrenamiento de la marcha se destaca el enfoque ASC que acompañó el proceso de diseño. La financiación de Minciencias de un grupo de tres Jóvenes Investigadores Profesionales (fisioterapia, biomédica, diseño industrial) y tres Jóvenes Investigadores de Pregrado (estudiantes de final de carrera de I. Biomédica, I. Mecánica, y Fisioterapia) resultó en un cambio tanto operativo como de enfoque. Desde lo operativo, los jóvenes fueron motores en los procesos de planeación, ideación, análisis y cálculo. Desde el enfoque lideraron la conciencia de la ASC, promoviendo la inclusión de la sociedad, no solo como objeto sino como actor del proyecto. Esto se evidencia en premisas del proyecto (dos usuarios, paciente y profesional), en la planeación de espacios de cocreación incluyentes, y en las formas de divulgación de los resultados obtenidos hasta este momento (artículos para la comunidad científica, esta cartilla para equipos de diseño en problemas en salud, un *podcast*, un video del equipo científico y una instalación artística sobre la marcha para un público general). Se invita a visualizar el video del equipo científico en el siguiente link: https://www.youtube.com/watch?v=kBQ652_rqak&list=PLt01SQ93XZAeUEDnT2GhB47u-Wbzdlul4&index=16g



Video del equipo en Youtube

Análisis y selección de alternativas: caso diseño de un dispositivo para el reentrenamiento de la marcha

Aunque cada etapa del proceso de diseño es necesaria y relevante, se destacan el análisis y la selección de alternativas desde la vivencia en el diseño de un dispositivo para el reentrenamiento de la marcha que inspiró esta cartilla.

Desde la biomecánica el problema del reentrenamiento de la marcha se tradujo en la síntesis de un sistema enfocado en la trayectoria del tobillo, con la hipótesis de que al reproducir la trayectoria con respecto a la cadera se cierra una cadena cinemática que restringe naturalmente el movimiento de los otros segmentos de la extremidad. Esta premisa supone varios problemas, por ejemplo, la trayectoria del tobillo varía de persona a persona en función de la antropometría, y es un movimiento espacial. Además, en términos del reentrenamiento es necesario que los patrones de marcha sean programables para un proceso incremental y personalizado. Este proceso condujo a la formulación de unos criterios de diseño establecidos en un proceso colectivo en el que se acordaron por su relevancia para el diseño. A cada criterio se les asignó un peso relativo para evaluar las alternativas (los pesos se calcularon como los promedios de los pesos asignados individualmente por los integrantes del grupo de investigadores). Los criterios de diseño cuantificables y sus pesos relativos fueron: reprogramabilidad (20,83%), ajustabilidad a diferentes antropometrías (22,67%), facilidad de implementación de un sistema de control (13,17%), necesidad de un arnés para soporte del peso (13,75%), control independiente de cada extremidad (15,83%) y niveles variables de asistencia (13,75%). La información se recolectó a través de encuestas automatizadas.

Considerando el contexto del problema, en el que se busca una reducción de costos significativa con respecto a los sistemas disponibles

comercialmente, la marcha se confinó al plano sagital. Al reducir la movilidad de cada extremidad a un plano paralelo al sagital, se reduce la necesidad de motores y la complejidad del control, mientras el movimiento resultante es cercano al natural. Este enfoque de movilidad reducida está presente en estudios y diseños como el presentado en (32, 33). Para evitar lesiones y movimiento no controlado se usaría una órtesis pasiva en cada extremidad.

La etapa de ideación e invención, acompañada de una revisión de literatura, permitió la selección de cinco alternativas que cumplieran potencialmente con los criterios de diseño y con la premisa del movimiento. En este punto se valoraron documentos académicos en los que se argumenta que el uso de dispositivos tipo plataforma de tobillo produce resultados significativamente superiores en la rehabilitación y reentrenamiento de la marcha con respecto a la fisioterapia tradicional, o a la fisioterapia asistida por una banda caminadora, por ejemplo, (32, 33) donde se presentan estudios en rehabilitación de la marcha después de una lesión del sistema nervioso central y en pacientes no ambulatorios de accidente cerebrovascular respectivamente. Las cinco alternativas que se listan a continuación son estructuras mecánicas cuya salida de movimiento es controlada desde una plataforma de tobillo: (A1) mecanismo Stephenson tipo III, (A2) eslabonamiento con mecanismo de leva y seguidor, (A3) mecanismo de siete eslabones de manivela y deslizador, (A4) robot paralelo de dos grados de libertad con estructura 2-PRR, (A5) robot paralelo de dos grados de libertad con estructura 2-PRR y un grado de libertad adicional para el control de la orientación del pie.

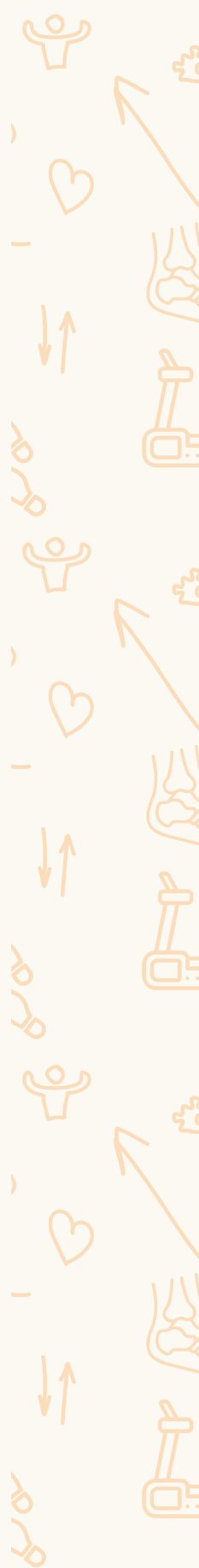




Figura 9. Ejemplo de alternativa A1. Mecanismo tipo Stephenson III

Fuente: tomada de Tsuge et al. (36).

Dado el alcance de este documento las alternativas no se describirán en detalle, sin embargo, se destaca que cada sistema fue sintetizado (de forma preliminar) dimensionalmente y evaluado cinemáticamente para verificar la posibilidad de desarrollar el movimiento requerido por la plataforma del tobillo.

La selección de la alternativa con el mejor potencial se realizó mediante una encuesta automatizada, en la que cada integrante calificó los criterios de diseño en una escala graduada ([0-10]). La calificación individual se asignó ponderando los criterios con los pesos relativos:

variables de asistencia. Al replicar lado a lado la estructura, entonces se tiene el dispositivo para ambas extremidades con opción de una labor independiente para cada pierna. Desde el punto de vista mecánico se destaca que el dimensionamiento de la alternativa se optimizó con base en índices de desempeño adecuados para robots paralelos: espacio de trabajo, longitud característica mínima (para garantizar dimensiones fabricables), índice global de condición (como una medida de la controlabilidad y sensibilidad de los movimientos de salida), índice local de condición máximo (similar al índice global), e índice global de rigidez.

El proceso de análisis y selección aquí presentado fue adecuado para el proceso de diseño que motivó esta cartilla, sin embargo, se aclara que no es la única opción. La invitación para los lectores es a buscar su propia estrategia, por ejemplo, desde el contexto y disciplinas involucradas en el proceso de diseño de productos.

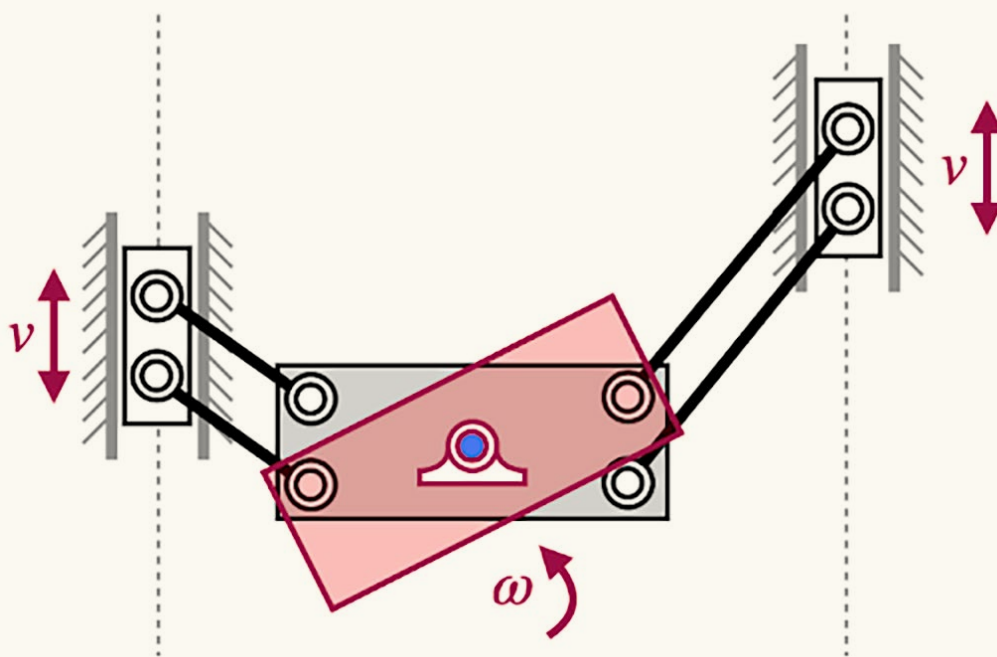



Figura 10. Alternativa A4. 3GDL (motor)

Nota: Solución exacta, reprogramable, controla el ángulo de tobillo, ajustable para varias antropometrías. Requiere un actuador en simultáneo, y es obligatorio un arnés de soporte.

Capítulo 4

Discusión y conclusiones





Con respecto a los dispositivos de reentrenamiento de la marcha de origen internacional, se pueden relacionar varios aspectos, uno de ellos es que la tecnología en este ámbito de rehabilitación también puede tener nuevas perspectivas, siendo el apoyo para desplazamiento y soporte de cargas una de las más importantes dado que los mismos estudios que permiten identificar las restricciones de movilidad, son oportunidades para el aprovechamiento en otros puntos de apoyo corporales. Adicionalmente, se destaca la importancia de todo el contexto que conlleva el estudio de la marcha, llegando a definir sistemas de rehabilitación holísticos como es Lokomat, donde se procuró controlar la mayor cantidad de variables tanto biomecánicas, como electrónicas y demás que incidieron en su diseño.

Ahora bien, después de analizar y comparar las diferentes problemáticas y soluciones del mercado se puede concluir que la marcha asistida con tecnología tiene ventajas sobre los métodos de entrenamiento convencionales, incluido el inicio temprano del entrenamiento de la marcha en personas con alto nivel de dependencia, menor esfuerzo para los fisioterapeutas, mayor duración e intensidad del entrenamiento, patrones de marcha más fisiológicos y reproducibles, y la posibilidad de medir la evolución en la rehabilitación funcional.

Se puede apreciar que en la actualidad el interés por adquirir, implementar y aplicar esta tecnología es cada vez mayor, y que diferentes equipos de investigación, así como, centros tecnológicos, de salud e instituciones educativas se encuentran en la búsqueda de soluciones en la vanguardia tecnológica. Sin embargo, es importante brindarle la apertura y oportunidad a la industria y la investigación en Colombia para fomentar la ciencia, la tecnología y la innovación en las personas y organizaciones que se encuentran trabajando en estas áreas.

Se brinda un enfoque metodológico dirigido a grupos de investigación en biomédica, fruto del trabajo interdisciplinario de un grupo de

investigadores del área de ingeniería, fisioterapia y diseño, el cual parte de una necesidad regional y nacional, en Caldas, Colombia, en el contexto de rehabilitación, enseñando a través de la experiencia vivida por el equipo, diversas alternativas con unos requerimientos mínimos que cumplen con los estándares de equipos biomédicos, y que pueden ser implementadas con un presupuesto de baja cuantía. Adicionalmente, el enfoque metodológico está enmarcado en una serie de actividades de ASC que integran actores sociales desde el campo de la salud y la discapacidad, tales como talleres cocreativos, muestras artísticas, *podcast*, videos, entre otros. Como trabajo futuro se tiene programada la construcción y evaluación del prototipo del sistema de reentrenamiento de la marcha.



Figura 11. Equipo de investigadores del proyecto

Glosario

Abducción-aducción: Movimientos de los segmentos del cuerpo hacia la derecha o izquierda, observados desde una perspectiva frontal.

Andador: Dispositivo de apoyo y soporte para la ejecución de la marcha que consta normalmente de cuatro puntos de apoyo en el suelo y es manipulado con ambos brazos simultáneamente.

Banda caminadora: Mecanismo que permite la ejecución de la marcha sin necesidad de desplazarse sobre una superficie móvil.

Biofeedback: Técnica basada en estímulos sensoriales llevados al cuerpo humano y basados en eventos externos.

Cinemática: Rama de la mecánica que describe el movimiento de los objetos sólidos y su trayectoria en función del tiempo.

Condiciones de salud: Conjunto de variables objetivas y de autorreporte de condiciones fisiológicas, psicológicas y socioculturales que determinan el perfil sociodemográfico y de morbilidad de la población trabajadora.

Contracciones musculares: Movimientos voluntarios o involuntarios de los músculos que normalmente se relacionan con tensión o dureza momentánea.

Desarrollo tecnológico: Proceso metodológico para el diseño y fabricación de dispositivos tecnológicos.

Dispositivos ortopédicos: Elementos de uso exterior al cuerpo que cumplen alguna función terapéutica, ya sea para facilitar o limitar determinado movimiento.

Enfermedad cerebrovascular: Ocurre cuando el suministro de sangre a una parte del cerebro se interrumpe o se reduce, lo que impide que el tejido cerebral reciba oxígeno y nutrientes. Las células cerebrales comienzan a morir en minutos.

Espasticidad: Rigidez o tensión inusual en los músculos.

Estimulación: Acción externa que promueve la realización o ejecución de una actividad.

Estimulación sensoriomotriz: Estimulación para potenciar la capacidad física, mental y comunicativa de la persona, aprovechando las posibilidades de plasticidad del sistema nervioso central.

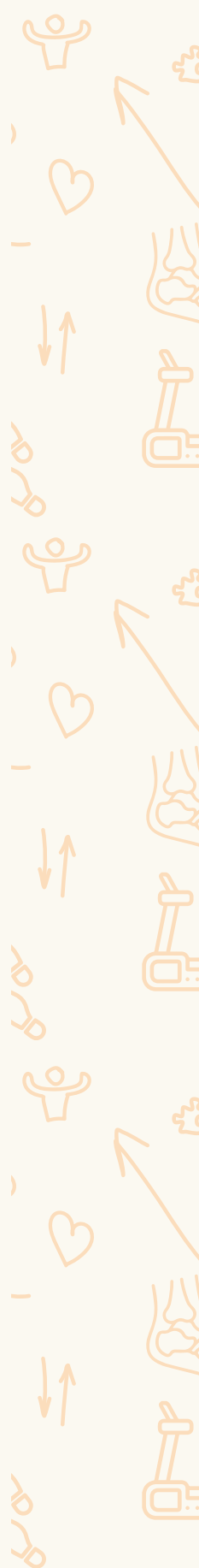
Estímulo háptico: Estímulo percibido por el sentido del tacto.

Exoesqueletos: Dispositivos mecánicos —normalmente accionados por motores— que se usan externamente a modo de “armadura”, para facilitar o apoyar el movimiento del cuerpo humano.

Flexión-extensión: Movimientos de los segmentos del cuerpo hacia adelante o hacia atrás, observados desde una perspectiva lateral.

Médula espinal: Estructura que se encuentra al interior de la columna vertebral y cumple la función de conectar el encéfalo (cabeza) con el resto del cuerpo, incluyendo las extremidades.

Microcomputador: Dispositivo electrónico de tamaño reducido que tiene la capacidad de procesar información de manera digital.



Miembros inferiores: Comúnmente conocidos como «piernas», son las estructuras compuestas por los muslos, las pantorrillas y los pies, y contienen las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo.

Neuroplasticidad: Capacidad propia del sistema nervioso para adaptarse a nuevas situaciones.

Patente: Es un tipo de protección de la propiedad intelectual de una idea, diseño o producto tecnológico.

Planos anatómicos: Son las diferentes perspectivas desde las que se puede observar el cuerpo humano. El plano sagital corresponde a la vista lateral; el plano coronal, a una vista frontal; y el plano transversal, a una vista superior.

Patrón de marcha: Movimientos propios que se realizan al caminar, los cuales son repetitivos.

Reaprendizaje motor: Reentrenamiento o rehabilitación enfocado al control grueso o fino de los movimientos del cuerpo humano.

Reentrenamiento: Proceso de aprendizaje sobre alguna habilidad específica, posterior a un entrenamiento o aprendizaje previo.

Rehabilitación: Proceso de recuperación de habilidades que fueron afectadas o disminuidas por alguna enfermedad o lesión.

Rehabilitación neurológica: Recuperación de habilidades propias del sistema nervioso.

Rehabilitación geriátrica: Rehabilitación enfocada de manera específica a la población de la tercera edad.

Rehabilitación ortopédica: Recuperación de habilidades relacionadas con el movimiento del cuerpo de manera total o parcial.

Reprogramable: Que puede cambiar su función o propósito por medio de la reconfiguración de sus elementos mecánicos y/o algoritmos.

Rotación: Orientación de los segmentos del cuerpo, ya sea hacia afuera o hacia adentro, observados desde una perspectiva superior.

Sensores: Dispositivos electrónicos que generan información a partir de fenómenos de la naturaleza o, en este caso, fenómenos propios del cuerpo humano.

Sistema nervioso: Conjunto de órganos y tejidos relacionados con la comunicación entre el cerebro y el resto del cuerpo.

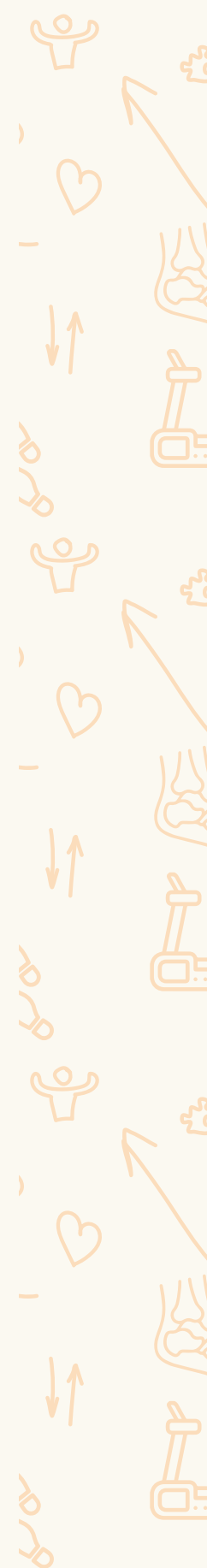
Trastornos de la marcha: Cambios o alteraciones en el patrón de la marcha, regularmente relacionados con enfermedades o lesiones.



Referencias

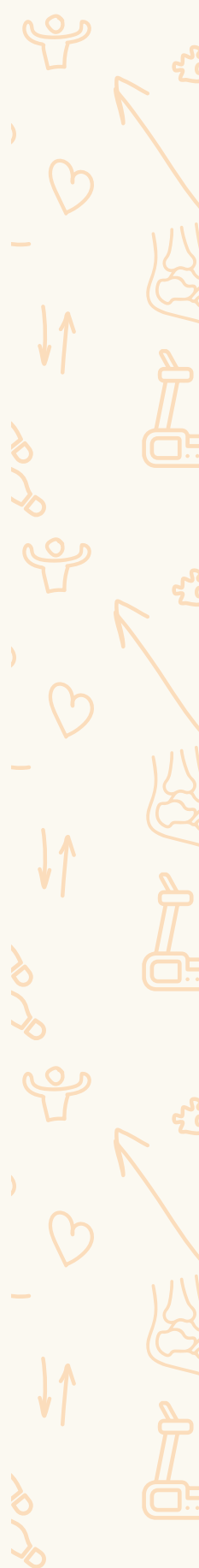
1. Daza-Lesmes J. Evaluación clínico-funcional del movimiento corporal humano. Bogotá: Editorial Médica Panamericana; 2007.
2. Perry J, Burnfield JM. Gait analysis: normal and pathological function. 2nd ed. Slack Incorporated; 2010.
3. Pereira-Monge E, Gonzales-Fernández P, Gómez-Cuesta A. Ciclo de la marcha: fases y parámetros espaciotemporales. En: Molina-Rueda F, Carratalá-Tejada M editores. La Marcha Humana: Biomecánica, evaluación y patología. Editorial Médica Panamericana; 2020. p. 13-18.
4. Jankovic J. Gait Disorders. Neurologic clinics [Internet]. 2015;33(1):249–68. Recuperado de: <https://europepmc.org/article/med/25432732> doi: 10.1016/j.ncl.2014.09.007.
5. Pirker W, Katzenschlager R. Gait disorders in adults and the elderly. Wien Klin Wochenschr [internet]. 2016;129(3-4):81–95. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27770207/> doi: 10.1007/s00508-016-1096-4.
6. Ziccardi, A. Pobreza, desigualdad social y ciudadanía: los límites de las políticas sociales en América Latina. Buenos Aires: Clacso; 2001. Recuperado de: <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/clacso/gt/20101029062411/ziccardi.pdf>
7. Ladino Diaz H. Rojas Fierro L. L. Modelo de medición de fatiga laboral para el personal de la salud en IPS privadas de Colombia. Tesis de maestría. Bogotá, Universidad del Rosario; 2019.
8. Rodríguez I. Entrenamiento robótico como medio de rehabilitación para la marcha. Evid Méd Inv Salud [Internet]. 2012; 5(2):46-54. Recuperado de: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=38198>
9. Equipos interferenciales. Avances tecnológicos y robóticos en rehabilitación [internet]. 2019 [citado el 2021, nov. 5]. Recuperado de: <https://interferenciales.com.mx/blogs/noticias/avances-tecnologicos-y-roboticos-en-rehabilitacion>

10. Hobbs B, Artemiadis P. A review of robot-assisted lower-limb stroke therapy: unexplored paths and future directions in gait rehabilitation. *Frontiers in Neurorobotics* [Internet]. 2020; 14(1). Recuperado de: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2020.00019/full>
11. Jezernik S, Colombo G, Keller T, Frueh H, Morari M. Robotic orthosis Lokomat: a rehabilitation and research tool. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*. 2008; 6(2):108–15. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1525-1403.2003.03017.x> doi: 10.1046/j.1525-1403.2003.03017.x.
12. Colombo G, Joerg M, Schreier R, Dietz V. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2000; 37(6):693-700. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11321005/>
13. Sistema Entrenador de Marcha, Patente WO2020016663, [Internet]. OMPI.; 2020 [citado el 2020 enero. 23]. Recuperado de: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2020016663&_cid=P22-LQ8I57-83262-1
14. Zoss A, Kazerooni H, Chu A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006; 11(2):128–38. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1618670> doi: 10.1109/TMECH.2006.871087.
15. Jung C-Y, Choi J, Park S, Lee JM, Kim C, Kim S-J. Design and control of an exoskeleton system for gait rehabilitation capable of natural pelvic movement. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [Internet]. 2014; Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6942843>
16. Rodilla protésica RHEO KNEE XC: Össur [Internet]. Life without limitations [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.ossur.com/es-es/protesica/rodillas/rheo-knee-xc>
17. Rajanoarivo T, Scaffidi M, Petithuguenin D, Häberli P, Diserens Dmed. K. Erigo® [Internet]. Hocoma. [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.hocoma.com/us/solutions/erigo-2/>



18. HFAD [Internet]. Ortopedia técnica en España y Portugal. Asturias. Ortoibérica. [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: https://www.ortoiberica.com/ortopedia-protésica-exógena-ortésica/hfad/hfad_1535_937_9716_0_1_pro.html
19. LegTutor [Internet]. MediTouch. 2021 [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://meditouch.co.il/products/legtutor/>
20. LiteGait. [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.litegait.com/product/lg-500>
21. Grillo gait trainer support walker for adults and children [Internet]. Ormesa. 2021 [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: https://www.ormesa.com/en/_grillo/
22. Honda Global: honda walking assist device [Internet]. Honda Global | honda walking assist device. [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://global.honda/products/power/walkingassist.html>
23. Cyberdyne [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.cyberdyne.jp/english/products/HAL/index.html>
24. Anti-Gravity Treadmill™ [Internet]. AlterG [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.alterg.com/anti-gravity-treadmills>
25. Rysen [Internet]. Motekmedical.com [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.motekmedical.com/solution/rysen/>
26. Indego: powering people forward [Internet]. Parker Hannifin Corporation [citado el 2021 nov. 5]. Available from: <http://www.indego.com/indego/us/en/home>
27. Rehawalk® - gait analysis and training in rehabilitation [Internet]. Zebris Medical GmbH: Rehawalk® - gait analysis and training in rehabilitation [citado el 2021 nov. 5]. Recuperado de: <https://www.zebris.de/en/medical/rehawalkr-gait-analysis-and-training-in-rehabilitation>
28. Chávez-Cardona, M.A, Spitia, F.R, Baradica-López A., Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. Revista Ingeniería Biomédica 2010; 4;7: 63-73.
29. Rodríguez C.I. Entrenamiento robótico como medio de rehabilitación para la marcha. Evidencia médica e investigación en salud.2012;5(2): 46-54

30. De Jong G, Horn D, Conroy B, Nichols D, Heaton EB. Opening the black box of post-stroke rehabilitation on: stroke rehabilitation on patients, processes, and outcomes. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005; 86 (12): S1-S7.
31. Norton R.L. *Design of Machinery.* 5th ed, McGraw-Hill, 2012.
32. Hesse, S, Schattat N, Mehrholz J, Werner C. Evidence of end-effector based gait machines in gait rehabilitation after CNS lesion. *NeuroRehabilitation* 2013; 33:77–84. Recuperado de: doi:10.3233/nre-130930
33. Hesse, S, Tomelleri C, Bardeleben A, Werner C, Waldner A. Robot-assisted practice of gait and stair climbing in nonambulatory stroke patients. *Journal of Rehabilitation Research & Development,* 2012;49:613–622. Recuperado de: doi:http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2011.08.0142
34. Franco-Márquez H. Diseño y construcción de un exoesqueleto para la asistencia en la marcha a pacientes con paraplejia flácida. Tesis de maestría, Manizales-Caldas, 2017
35. Rodríguez G. *Manual de diseño industrial.* 3ra. edición, Ediciones G. Gili, Mexico
36. Tsuge, B., & McCarthy, J. An Adjustable Single Degree-of-Freedom System to Guide Natural Walking Movement for Rehabilitation. *Journal of Medical Devices,* (2016), 10(4), 044501. Recuperado de: http://dx.doi.org/10.1115/1.4033329



Esta cartilla se imprimió en Matiz Taller Editorial
en marzo de 2024

Manizales, Caldas