

Entrenamiento robótico como medio de rehabilitación para la marcha

Iván Rodríguez Claudio*

RESUMEN

En la última década, los dispositivos automatizados que se utilizan para la neurorrehabilitación han aumentado con el objetivo de mejorar la función de alguna extremidad en personas con lesión traumática, congénita o neurológica. La marcha es una característica distintiva del ser humano que brinda autonomía, pero en ocasiones se ve alterada por diferentes factores. Pocos son los estudios que han investigado sobre los dispositivos robóticos como método de tratamiento en rehabilitación para la marcha. El presente estudio hace una revisión de estos sistemas de entrenamiento robóticos y sobre el entrenamiento de marcha robótica en niños con discapacidad neuromusculoesquelética. El beneficio de esta propuesta es aprovechar los resultados médicos que aseguran que las terapias con repetición del movimiento (entrenamiento robótico) permiten establecer rápidamente las conexiones entre las neuronas afectadas. Este sistema permite automatizar y optimizar las terapias, haciéndolas más intensivas, y facilita la labor del terapeuta en el entrenamiento de la marcha.

Palabras clave: Marcha humana, entrenamiento robótico, neurorrehabilitación.

ABSTRACT

In the last decade, automated devices used for neurorehabilitation have been altered in order to improve limb function in people who have undergone traumatic injuries or have congenital or neurological disorders. Upright walking is a characteristic distinctive of humans that gives autonomy, but there are different factors that can alter a person's ability to walk. Few studies have investigated the use of robotic devices for gait rehabilitation treatment. This study reviews these robotic training systems and the robotic gait training in children with neuromusculoskeletal disabilities. The benefit of this proposal is to use the results to prove that medical therapies involving repetitive movement allow the rapid establishment of affected neural connections. This system allows you to automate and optimize therapies, making them more intensive and decreasing the labor required of therapists in gait training.

Key words: Gait, robotic training, neurorehabilitation.

INTRODUCCIÓN

El hombre siempre se ha sentido atraído por la idea de diseñar máquinas semejantes a sí mismo. Estos robots humanoides podrían servir para sustituirnos en tareas pesadas o peligrosas, para el cuidado de personas con discapacidad, o simplemente como medios de entrenamiento. En

el presente trabajo se revisan los pasos que se han dado para desarrollar este concepto, recorriendo las principales ideas y el estado del arte.

Los humanos presentan complejos y especializados algoritmos naturales de control, que les brindan la capacidad de realizar tareas específicas y complicadas, en un rango de condiciones y con rápidos tiempos de respuesta. En contraste, los robots pueden realizar tareas que

* Licenciado en Terapia Física. Centro de Rehabilitación Infantil Teletón, Oaxaca.

requieren gran fuerza, dependiendo de la naturaleza de su estructura y de la potencia de sus actuadores. Es evidente, entonces, que combinando estas dos entidades, el ser humano y el robot en un solo sistema integrado, se pueden alcanzar soluciones interesantes que se beneficiarían de las ventajas que aporta cada subsistema. Así, la potencia mecánica de las máquinas integrada con el sistema de control inherente al humano llevaría a realizar tareas que necesitan aplicar grandes fuerzas de una manera eficiente, lo cual es el principio básico del diseño de los sistemas exoesqueléticos.

El desarrollo de plataformas robóticas para aplicaciones de rehabilitación es actualmente un foco de investigación en todo el mundo. Dentro de los principales avances se encuentran los sistemas exoesqueléticos, denominados en este caso aplicado de bioingeniería como ortesis activas. Los exoesqueletos consisten en un mecanismo estructural externo acoplado a la persona y cuyas uniones y eslabones corresponden a las de la parte del cuerpo humano que emula. Los robots humanoides siempre han despertado una gran fascinación en la comunidad científica y en la población en general. Además, durante las últimas décadas se espera la inclusión de estos sistemas robotizados para asistir al ser humano en ciertas tareas como mano de obra, o simplemente como medio de entrenamiento.

LA MARCHA HUMANA Y SU DESARROLLO

La marcha humana es un proceso aprendido, influenciado por diferentes factores ambientales.¹ La marcha puede definirse como una sucesión de pasos, entendiéndose por pasos aquellas acciones y movimientos que se producen entre el choque de talón de un pie y el choque de talón del pie contralateral.^{1,2} La marcha requiere un proceso de desarrollo y automatización. En el ser humano el desarrollo es cefalocaudal (*Cuadro I*).

Autores como Mc Graw y André Thomas estudiaron el reflejo de la marcha automática, concluyendo que es un proceso innato.² Para otros autores, sin embargo, la marcha es un proceso aprendido y no desarrollado de un reflejo innato.³ La marcha se adquiriría por imitación y aprendizaje, mediante el sistema de ensayo-error. La adquisición de la marcha tiene una gran importancia en el desarrollo psicomotor del niño.^{4,5}

Cuando existen patologías como trastornos neurológicos del aparato locomotor o afectación del desarrollo psicomotor, si se llega a adquirir la marcha será en etapas más tardías o con características patológicas.⁶ Entre los dos y tres años de edad ya se observan signos

Cuadro I. Desarrollo de la marcha.

Edad	Desarrollo
2 meses	Marcha automática
7 meses	Reptación o rastreo
8 meses	Se mantiene en pie si se le dan las manos
10 meses	Gateo (abdomen muy próximo al suelo)
11-12 meses	Gateo como oso
13-15 meses	Marcha independiente
5-7 años	Marcha parecida a la del adulto
Tomada de: Collado S. Desarrollo de la marcha. ¹	

de maduración de la marcha como aumento de la velocidad y duración de apoyo monopodal, empiezan a observarse rotaciones opuestas de la cintura escapular y pélvica, ha mejorado el equilibrio y han aumentado los ángulos de flexión de la rodilla y dorsiflexión del tobillo.⁷ Sutherland considera que entre los 6-7 años las características electromiográficas, cinéticas y cinemáticas se asemejan a las de un adulto.⁸ Popova y Bernshtein⁹ estudiaron el desarrollo de la marcha en el niño y comprobaron que el patrón propio del adulto lo alcanza entre los 7-9 años. Grieve y Gear⁹ consideran que el niño tiene una marcha similar a la del adulto a los 4-5 años. Para Viladot Voegeli, la marcha infantil se asemeja a la del adulto a los 7-9 años.⁹

FENÓMENOS Y FASES DE LA MARCHA

En este apartado se abarcarán únicamente los fenómenos que ocurren en las extremidades inferiores durante la marcha. De esta manera, cada una de ellas atraviesa por los siguientes estadios:¹⁰

- Posición inicial (fase de doble apoyo).
- Propulsión o impulso.
- Balanceo (fase de apoyo único).
- Apuntalamiento o refrenamiento.
- Apoyo (en este estadio el miembro opuesto se encuentra en balanceo).

Los mismos movimientos que se producen en una extremidad pélvica se observan también en su homóloga, con la circunstancia de que mientras aquella está en apoyo, la otra está en balanceo, existiendo un instante en el cual ambas se encuentran apoyadas en el piso¹¹ (*Figura 1*).

MARCHA PATOLÓGICA

El análisis sistemático de la marcha del individuo con trastornos esqueléticos o neuromusculares aporta grandes posibilidades para la evaluación clínica y seguimiento de las alteraciones y lesiones, permitiendo determinar la naturaleza y severidad de la misma.¹²

La semiología más común de los procesos patológicos es:

1. **Dolor:** las reacciones fisiológicas alteran la marcha introduciendo además otros elementos como limitación en el movimiento y debilidad muscular. El patrón característico de la marcha antiálgica es: disminución de la velocidad, disminución de la cadencia, disminución de la longitud de zancada, disminución del tiempo de apoyo, abducción de los miembros superiores para intentar levitación del centro de gravedad y disminución de las presiones sobre el miembro en apoyo.¹²
2. **Limitación del movimiento:** los tejidos no permiten una movilidad suficiente para adoptar posturas normales y rangos de movimiento fisiológico durante la marcha. La contractura o retracción suele ser la causa más habitual a consecuencia de una inmovilidad prolongada o como secuela de una lesión.¹²
3. **Debilidad muscular:** puede ser debida a una atrofia muscular por desuso, a lesiones neurológicas y miopatías.^{12,13}
4. **Control neurológico deficitario:** se puede presentar en patologías del sistema nervioso central o periférico, manifestándose en diferentes alteraciones básicas como:¹³
 - *Espasticidad:* por parálisis cerebral, accidente cerebrovascular, traumatismo craneoencefálico, lesión médula incompleta y esclerosis múltiple.
 - *Alteraciones de la coordinación:* impiden controlar el tiempo y la intensidad de la acción muscular, produciendo alteraciones de la secuencia de actuación muscular.

- *Patrones reflejos primitivos:* suponen una alternativa al control voluntario en la rehabilitación de la marcha, ya que permiten dar pasos mediante la combinación de un patrón de flexión y extensión.
- *Alteración de la propiocepción:* priva al paciente de la información sobre la posición articular, así como de la sensación de contacto con el suelo.¹³

Dentro de las alteraciones neurológicas del sistema nervioso central se encuentra la lesión de la neurona motora superior e inferior, puntualizando las diferencias de cada una¹⁴ (*Cuadro II*).

CLASIFICACIÓN DE LA MARCHA PATOLÓGICA

Existen múltiples posibilidades para clasificar las alteraciones de la marcha debidas a patologías. Se pueden clasificar según su etiología, diagnóstico, zona anatómica afectada, fase de la marcha alterada; sin embargo, la clasificación más usual es la de la región anatómica afectada:¹⁵

- **Alteraciones de tobillo:** se manifiestan por una flexión plantar exagerada que afecta la fase de apoyo, la fase media y la fase de oscilación. La flexión dorsal exagerada afecta la fase de apoyo y la oscilación.¹⁵
- **Alteraciones en rodilla:** las modificaciones más habituales de la marcha debidas a alteraciones de rodilla se producen en el plano sagital (flexión y extensión exageradas o inadecuadas). Menos frecuentes son las alteraciones en plano frontal (varo o valgo) y las causas son principalmente: debilidad o espasticidad en el cuádriceps, debilidad de los flexores de cadera, pie equino, dolor, contracturas en flexión de rodilla, deformaciones estáticas o dinámicas.¹⁵
- **Alteraciones en cadera:** por ser ésta una articulación del tipo de las enartrosis, es sensible a alteraciones en los tres planos del espacio. Los errores más frecuentes se

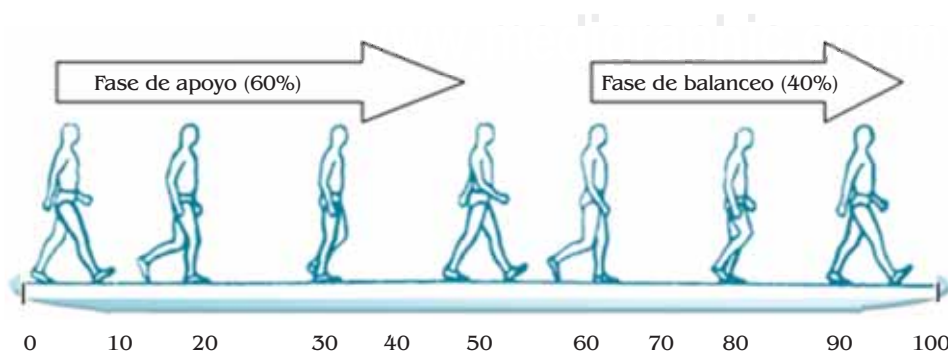


Figura 1.

Fases de la marcha.

Cuadro II. Comparación de lesión de la neurona motora superior e inferior.

	Neurona motora superior o lesión supranuclear	Neurona motora inferior o lesión nuclear o infra	
Localización	SNC	SNC	SNP
Causas	AVC, tumores, traumatismos, enfermedades desmielinizantes, enfermedades infecciosas	AVC, tumores, traumatismos	Traumatismos, alteraciones metabólicas
Estructuras afectadas	Neurona motora superior de la corteza cerebral, tracto corticoespinal y nuclear	Motoneuronas alfa del tronco espinal o cerebral	Fibras motoras de cada par craneal, excepto: II y VIII
Distribución	Nunca músculos individuales: grupo de músculos inervados por los núcleos motores debajo del nivel de la lesión corticonuclear /corticoespinal	Segmentaria: limitada a los músculos inervados por las motoneuronas alfa o sus axones lesionados	
Movimientos voluntarios	Deficiente: parálisis o paresia	Deficiente: vía común interrumpida (atonía/debilidad muscular)	
Masa muscular	Ligera atrofia debido a la falta de uso	Atrofia pronunciada 70-80%	
Descripción	Parálisis espástica	Parálisis flácida	
SNC: Sistema nervioso central, SNP: Sistema nervios periférico, AVC: Accidente vascular cerebral ¹⁴			

producen en el plano sagital, siendo los que más afectan la marcha una inadecuada extensión o una exagerada flexión.¹⁵ Las desviaciones en otros planos son exageradas aducciones, abducciones o rotaciones (*Figura 2*).

- **Alteraciones en plano transversal:** por anteversión del cuello femoral, o falta de rotaciones o disociación de la cintura escapular y pélvica.¹⁵

TERAPIA FUNCIONAL DE LOCOMOCIÓN ROBÓTICA. SISTEMA LOKOMAT

El concepto de aprendizaje basado en tareas específicas, como la neuroplasticidad, sugiere que las actividades de la vida cotidiana pueden entrenarse y mejorarse en pacientes neuromusculares mediante repeticiones continuas. La terapia de locomoción robótica cumple con estas funciones.¹⁶ El movimiento funcional y la estimulación sensorial desempeñan un papel muy importante en la rehabilitación de pacientes neurológicos tras sufrir una lesión.

El sistema robótico Lokomat se compone de una ortesis para la marcha robotizada y de un moderno sistema de descarga de peso corporal, combinados con una cinta rodante.¹⁶ Los pacientes en silla de ruedas son trasladados hasta la cinta rodante a través de una rampa. Una serie de motores controlados por ordenador y sincronizados con precisión con la velocidad de la cinta rodante mueven las

piernas del paciente trazando trayectorias que imitan patrones de marcha fisiológicos.¹⁶ Una interfaz de usuario permite al terapeuta manejar el sistema de locomoción robótica de manera sencilla y adaptar los parámetros de entrenamiento a las necesidades individuales de cada paciente. El sistema de descarga dinámica del peso corporal con poca inercia permite una descarga precisa del paciente y fomenta una marcha más fisiológica para una estimulación sensorial optimizada.¹⁶

La descarga del peso corporal de regulación continua facilita el entrenamiento de los niños y pacientes de poco peso. La elevación y descarga automatizada del paciente facilita el entrenamiento y permite realizar ajustes en el tiempo real durante las sesiones terapéuticas.¹⁶

BENEFICIOS DE TERAPIA DE LOCOMOCIÓN ROBÓTICA DEL SISTEMA LOKOMAT

Lokomat es una ortesis de marcha robotizada y automatizada que dirige las piernas del paciente sobre la cinta rodante ofreciendo una amplia variedad de entrenamientos (*Figura 3*). Disminuye el esfuerzo de los terapeutas. El progreso es más rápido mediante sesiones de entrenamiento funcional, largas e intensivas, en comparación con la cinta rodante sola.¹⁶ Permite su-

pervisar y evaluar fácilmente la marcha del paciente. El patrón de la marcha y la fuerza guía pueden ajustarse de forma individual a las necesidades de cada paciente, lo que optimiza el entrenamiento funcional. Así mismo, mejora la motivación del paciente gracias a la visualización *feedback* de rendimiento. El *feedback* aumentado y otras funciones adicionales (velocidad, tiempo, amplitud de movimiento, peso y resistencia) respaldan los programas terapéuticos de locomoción para cumplir con las necesidades individuales de los pacientes.

Este sistema de locomoción robótica (Lokomat) permite, además, medir la actividad del paciente por medio de transductores de fuerza ubicados directamente en las piernas del robot, ofreciendo la posibilidad de ajustar el nivel de asistencia de paso para cada pierna entre la fuerza de guía total y cero.¹⁶

El sistema de entrenamiento robótico puede emplearse en casos de apoplejía, esclerosis múltiple, parálisis cerebral, Parkinson, paraplejía, traumatismo craneoencefálico, endoprótesis (ej. endoprótesis de cadera), enfermedades degenerativas de las articulaciones (osteoartritis de rodilla), atrofia muscular, debilidad muscular por inmovilización, hemiplejías y paraplejías.¹⁶

Así mismo, se dan contraindicaciones del sistema de entrenamiento robótico: peso corporal superior a 135 kg, que el paciente presente contracturas fijas pronunciadas, inestabilidad ósea, lesiones dérmicas abiertas en tronco o miembros inferiores, circulación inestable, contraindicaciones cardíacas, comportamiento no cooperador; también cuando los pacientes son agresivos o hay deficiencia cognitiva severa, o en pacientes con infusiones (permanente), ventilación mecánica, trastornos vasculares en miembros inferiores o con crecimiento fuertemente desproporcionado de piernas y/o columna.^{16,17}

EVALUACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DEL PROGRESO DEL PACIENTE EN EL SISTEMA LOKOMAT

Incorpora las siguientes herramientas de medición para una evaluación adecuada del paciente.^{16,17}

- **L-WALK:** registra el rendimiento de la marcha del paciente en cada paso y almacena los datos para el análisis y documentación.
- **L-STIFF:** mide la rigidez de las articulaciones de la cadera y la rodilla del paciente mientras mueve las piernas, registra valores de fuerza desarrollada.
- **L-FORCE:** mide la fuerza isométrica generada por el paciente mientras se encuentra en una posición estática.
- **L-ROM:** mide con precisión el rango de movimiento pasivo de la cadera y rodilla del paciente sin ayuda de los acondicionamientos de locomoción robótica.

Respalda y registra las evaluaciones del paciente a través de una serie de herramientas de medición estándar mientras el paciente se encuentra en el sistema de locomoción robótica.^{16,17}

El sistema de locomoción robótica pediátrica Lokomat garantiza el ajuste óptimo y el confort del niño y ofrece los mismos beneficios que la versión para adultos. La faja de descarga y las abrazaderas especiales proporcionan un ajuste preciso de pacientes pequeños y reducen la probabilidad de irritaciones en la piel.¹⁷

Este sistema ha sido diseñado para adaptarse a pacientes con longitud de fémur (desde el trocánter a la cavidad de la articulación de la rodilla) entre 350 y 470 mm. El sistema robótico pediátrico para pacientes pequeños

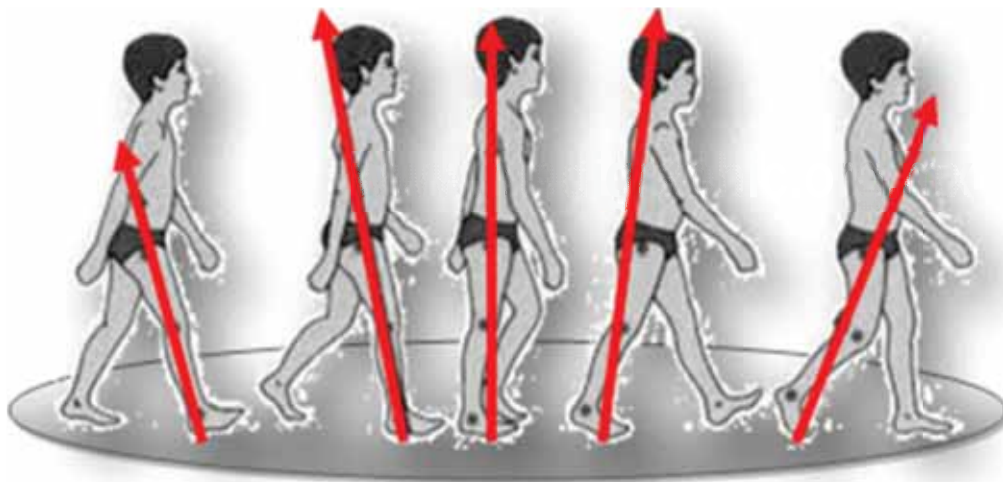


Figura 2.

Alteraciones en la marcha.

se adapta a una longitud de fémur entre 210 y 350 mm. Las piernas del sistema robótico pueden intercambiarse y ajustarse con facilidad ofreciendo así una terapia de locomoción optimizada para adultos y niños.^{17,18}

El diseño conceptual de un exoesqueleto biomecánico permite asistir la movilidad del miembro inferior, para dar soporte a una persona sana o para acelerar la rehabilitación de una persona mediante ventajas del movimiento cíclico reproducible, repetitivo, rítmico y fisiológico.¹⁸ Las ortesis robóticas propuestas poseen grados de libertad que actúan sobre cadera, rodilla, tobillo y pie.¹⁹

El diseño del exoesqueleto está dividido en dos componentes fundamentales: el diseño estructural compuesto por sistemas de adquisición y procesamiento de *software* y el diseño mecánico, conformado por un análisis biomecánico de la marcha y antropometría de la marcha.²⁰

EL PAPEL DE LA ROBÓTICA EN LA ACTUALIDAD

La restauración de la función motora es una prioridad en la rehabilitación después de una lesión o accidente con el objetivo de facilitar la reintegración a la sociedad.²¹ Los sistemas de exoesqueleto son una alternativa para rehabilitación y fuente de creación de investigaciones.

A principio de los 60, la Universidad de Waseda presentó el primer robot antropomórfico capaz de caminar.



Figura 3. Sistema de entrenamiento robótico pediátrico.

A partir de entonces, diversos grupos de investigación han desarrollado un considerable número de robots humanoides, la mayoría de ellos en Japón y España.^{21,22}

El sistema de locomoción robótico fue desarrollado a finales de los 90 para ayudar al entrenamiento automático sobre la cinta rodante. Éste es un exoesqueleto que conecta el exterior con las piernas y ayuda al movimiento. Es utilizado a partir de los cuatro años de edad.²²

La mayoría de los estudios recientes (que aún son pocos) han sido enfocados a la tecnología sin dejar a un lado el entrenamiento robótico o dispositivos automatizados; aquí una recopilación de algunos de ellos. Un estudio de Hesse y colaboradores²³ fue dirigido con el objetivo de probar el rendimiento de modelos de regresión lineales, calculando puntajes clínicos basados en entrenamiento del robótico, con una muestra de 11 pacientes crónicos con hemiplejía, utilizando las escalas de Ashworth y Fugl Meyer. En su conclusión reportan rendimientos bajos en los pacientes.

De Jong y asociados divulgaron en un primer estudio (la caja negra de la rehabilitación después de un accidente cerebrovascular [ACV]) en el que se hace un apartado del entrenamiento de la marcha humana durante el proceso de rehabilitación y que utiliza la cinta rodante en un inicio como medio de rehabilitación y posteriormente el entrenamiento de la marcha sin auxiliares, llegando a la conclusión de que para mayor beneficio en el entrenamiento de la marcha es importante tomar en cuenta la intensidad, el tiempo y la velocidad del entrenamiento, ya que puede variar en cada persona.²⁴ En un segundo estudio (el inicio del proceso de rehabilitación después de un AVC), retoma parte del anterior y habla de la importancia de la rehabilitación después de un AVC, en el que evalúa a 969 pacientes de seis diferentes hospitales de EUA, llegando a la conclusión de que entre más temprano sea el proceso de rehabilitación mayores serán los beneficios para la recuperación de la marcha.²⁵

Israel y colaboradores divulgaron un estudio reciente donde se comparó la activación de los músculos y respuestas metabólicas en personas con lesión medular incompleta sometidos al entrenamiento en cinta rodante, comparada con los cambios que se obtienen en el sistema Lokomat, supervisado por un terapeuta. Los resultados indican que la activación muscular y el consumo energético son similares en el entrenamiento con la cinta rodante y el sistema Lokomat.²⁶

Meyer y asociados²⁷ analizaron en un estudio la viabilidad de entrenamiento locomotor-automatizado en niños con problemas de la marcha, en los que utilizaron el sistema Lokomat. Sometieron a los pacientes a un sistema de entrenamiento y uso de ortesis, utilizando la escala de

evaluación de Función Motora Gruesa (GMFCS) como su instrumento de investigación, analizaron 16 pacientes de cuatro años de edad en adelante o por lo menos 21 cm de longitud de fémur. Los pacientes fueron sometidos a 15 sesiones de 20 a 45 minutos. En sus conclusiones mencionan que por lo menos el 47% de los pacientes mejoraron y refieren que el sistema Lokomat es una herramienta prometedora que muestra beneficios en niños con alteraciones de la marcha.²⁷

Prosser²⁸ realizó un estudio de entrenamiento locomotor intenso, después de una lesión medular incompleta, en el que participaron pacientes de cinco años en adelante, los que llevaron entrenamiento locomotor por cinco meses, en los cuales se les daba el entrenamiento de tres a cuatro veces por semana y el tiempo de cada sesión fue en un inicio de 10 minutos, y así se aumentó la intensidad hasta llegar a 25 minutos. Los resultados reportaron mejoría después del entrenamiento según la medida de independencia funcional para la movilidad del sistema WeeFIM II, el puntaje incrementó de 5/35 a 21/35, llegando a la conclusión que es más pronta la recuperación en el paciente pediátrico que en el adulto ya que la respuesta al entrenamiento locomotor respalda la creencia de que la plasticidad dentro de circuitos neurales existentes tiene un papel en la recuperación de la función.²⁸

Jezernik y colaboradores publicaron un estudio sobre la rehabilitación de locomoción robótica en personas con alteraciones de la médula espinal con el objetivo de evaluar el rendimiento y valorar la satisfacción de los pacientes. Se aplicó un cuestionario a los pacientes que permitió recabar datos al respecto. El análisis estadístico permitió cuantificar los datos y comparar los algoritmos, llegando a la conclusión de que existe mejoría en la rehabilitación de la locomoción, ya que incrementa y promueve el entrenamiento activo, y que la mayoría de los pacientes prefieren el entrenamiento robótico que el habitual.²⁹

Mehrholtz J realizó un estudio del entrenamiento locomotor para caminar después de una lesión en la médula espinal, con el objetivo de evaluar los efectos del entrenamiento locomotor en el proceso de la marcha. En esta revisión se incluyeron cuatro ensayos controlados aleatorios con 222 pacientes. Este estudio comparó el efecto del entrenamiento locomotor y el efecto de la cinta rodante, llegando a la conclusión de que aún no hay pruebas suficientes para decir que el sistema de entrenamiento locomotor es más efectivo que otro para mejorar la función de caminata en personas con lesión medular.³⁰

Borggraefe y colaboradores publicaron un estudio en el que sustentan los resultados motores después de la terapia asistida por un robot en niños y adolescentes con trastornos de la marcha, los cuales se sometieron a

una prueba de 12 sesiones de terapia asistida mediante robot rodante (Lokomat) durante un periodo de tres semanas. Los resultados fueron significativos de acuerdo con la Escala de Función Motora Gruesa (GMFCS) ($p = 0.008$); evaluaron así mismo la velocidad de la caminata, la cual mejoró después del entrenamiento en el Lokomat ($p = 0.006$), concluyendo la efectividad del entrenamiento en el sistema Lokomat.³¹

Frascarelli y colaboradores³² publicaron un estudio sobre el impacto de la rehabilitación robótica en niños con desórdenes congénitos o adquiridos del movimiento. Éste es un estudio piloto con un grupo control donde se estudiaron 12 niños de entre 5 y 15 años, cuatro niños con lesión por accidente vascular cerebral, seis por traumatismo craneoencefálico y dos por lesión cerebral tipo hemipléjica, los cuales asistieron a su tratamiento tres veces por semana; la duración de la sesión fue de una hora y el tratamiento duró seis semanas. Se utilizó como instrumento de evaluación el Fulg-Meyer, la escala de Ashworth y la *Reaching Performance Scale* (RPS). Los resultados pre y post de la evaluación clínica revelaron ganancias estadísticamente significativas: de acuerdo con la escala Fugl-Meyer ($p = 0.002$), la RPS ($p = 0.001$), concluyendo que la rehabilitación robótica muestra beneficios en niños con lesiones congénitas y adquiridas.³²

CONCLUSIONES

El uso de la robótica ha experimentado un importante desarrollo y continúa haciéndolo, creciendo en su campo de acción y en su base científica, ya que las nuevas tecnologías pueden servir para varios fines: para aumentar y favorecer el aprendizaje motriz o dotar a los profesionales de medidas objetivas del tratamiento.

Hasta el día de hoy es poca la información publicada de entrenamiento robótico, al igual que su comprensión como método de tratamiento ya que involucra sistemas complejos que interactúan entre sí con los sistemas musculoesquelético y nervioso. Sin embargo, se sabe que la dinámica intrínseca de las piernas tiene influencia con el movimiento, por lo que conocer los sistemas de entrenamiento robótico resulta importante. En cuanto al control de la marcha, existen abundantes evidencias neurofisiológicas que revelan los movimientos rítmicos básicos que se originan en neuronas situadas en la médula espinal: los llamados generadores centrales de patrones (GCPs).^{33,34} Éstos son capaces de provocar actividad, lo que genera simulaciones para el aprendizaje motor del sistema musculoesquelético. La mayor intensidad del tratamiento conseguida con el entrenamiento

robótico ha demostrado ser eficaz en ajustes terapéuticos, como menciona Waldner,³⁵ quien concluye que el entrenamiento robótico no sólo muestra mejoría en las características de marcha, sino también en el tono muscular, fuerza, equilibrio, control de tronco y la capacidad funcional, mencionando que esto se logra por repeticiones continuas que favorecen el aprendizaje motor. La indicación de entrenamiento de marcha robótica en buena parte se complementa con la intervención de la terapia física y un manejo adecuado del equipo multidisciplinario, ya que esto hace un tratamiento más eficaz y funcional para el paciente.³⁶ Mientras el futuro de la robótica en programas de neurorrehabilitación todavía es poco claro, pruebas actuales indican que la intervención del entrenamiento robótico ayuda a mejorar la marcha.³⁶ Sin embargo, usar dispositivos automatizados tiene algunas desventajas, como el costo y tal vez lo más importante: el «tacto», ya que es pobre el vínculo terapeuta-paciente. Así mismo, el sistema de entrenamiento robótico es capaz de trabajar aspectos neuroortopédicos y sobre los procesos de plasticidad neuronal que facilitan la recuperación de esquemas motores perdidos. Para lograr estos beneficios es importante que antes de establecer un programa de tratamiento se realice una adecuada valoración de las características de la marcha y aspectos motores de los pacientes.

El análisis de la marcha con este sistema permite estudiar, tanto la valoración global numérica, como la de los distintos parámetros de las fases de marcha y velocidad de la misma; ello proporciona un diagnóstico minucioso y objetivo, y es una herramienta para orientar el tratamiento a través de parámetros terapéuticos como 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 capacidad del paciente. El movimiento funcional y la estimulación sensorial desempeñan un papel muy importante en la rehabilitación del paciente neurológico. En pacientes postoperados o inmovilizados por algún periodo de tiempo el entrenamiento robótico tiene resultados eficaces ya que la bipedestación, la carga de peso regulada y la movilidad influyen positivamente en varias funciones, como es la marcha.^{16,17,35,37} La eficacia del entrenamiento robótico sería mejor tras la aplicación de toxina botulínica tipo A en músculos de miembros inferiores.³⁷ Es evidente que la marcha exige algunos requisitos indispensables: una capacidad mental suficiente, cooperación y no un comportamiento agresivo, esto con el propósito de asignar objetivos y generar las órdenes voluntarias necesarias para tener una mejor retroalimentación durante el entrenamiento robótico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Collado S. Desarrollo de la marcha. Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud 2005; 3: 4-13.
2. Plás F, Viel E, Blanc Y. Adquisición de la marcha humana: biomecánica, exploraciones, normas y alteraciones. Barcelona: Masson; 1996: 205-215.
3. Viladot R, Cohi O, Clavell S. Ortesis y prótesis del aparato locomotor, miembro inferior. 2ª ed. Barca: Masson.; 1999: 47-88.
4. Gesell A. El niño de 1 a 4 años. Barcelona: Paidós Ibérica; 2003.
5. Gassier J. Manual del desarrollo psicomotor del niño. 2a ed. Barcelona: Masson; 1990.
6. Rodríguez R, Dankloff C, Gómez L. Análisis de la marcha infantil (Tesis Doctoral) Madrid: Facultad de Medicina de Alcalá; 1993.
7. Macías L. Desarrollo motor y aprendizaje del movimiento. Conceptos contemporáneos. Fisioterapia en pediatría. Madrid: Mc Graw-Hill Interamericana; 2002: 1-29.
8. Sutherland D, Olshen R, Cooper L, Woo S. The development of mature gait. J Bone Joint Surg 1980; 62 (3): 336-353.
9. Viladot V. Estudio de la marcha humana. Lecciones básicas del aparato locomotor. Barcelona: Springer-Verlag; 2001.
10. Gutiérrez R. Claudicación de la marcha en Pediatría. Rev Hospital de Niños en Buenos Aires, Argentina 2006; 48: 134-166.
11. Guerra J. Manual de fisioterapia. México: El Manual Moderno; 2004.
12. Cifuentes C, Martínez F, Romero E. Análisis teórico y computacional de la marcha normal y patológica: una revisión. Rev Facultad de Medicina en Colombia 2010; 18 (2): 182-196.
13. Sánchez J, Prat J, Marco S. Biomecánica de la marcha humana patológica. Valencia: Instituto de Biomecánica; 1993: 115-191.
14. Youg P, Youg H. Neuroanatomía clínica funcional. Barcelona: Masson-Williams & Wilkins; 2001: 49-75.
15. Sanz C. Marcha patológica. Revista del Pie y Tobillo 2003; 17 (1): 1-7.
16. Hocoma. Terapia funcional de locomoción mejorada con *feedback* aumentado. Samarit Medibérica; 2005.
17. Zabaleta H, Bareau M, Eizmendi G, Olaiz E, Medina J, Pérez M. Exoeskeleton. Design for functional rehabilitation in patient with neurological disorders and stroke. 2007.
18. Grosso J, Tibaduiza D. Diseño conceptual de un exoesqueleto para rehabilitación del miembro inferior, 2009.
19. Urdaniz M, Ortiz M, Bonardi A, Gentiletti G. Diseño y simulación de una ortesis robótica para rehabilitación de la marcha. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Entre Ríos. 2007.
20. Gallego J, Forner A, Moreno J, Turowska E, Pons J. Síntesis de la marcha robótica mediante la aproximación del ciclo límite. Grupo de Bioingeniería. CSIC.
21. Hidler J, Larry H, Lichy A, Groah S. Automating activity-based interventions: The role of robotics. J Rehab Res Develop 2008; 45 (2): 337-345.
22. Waldner A, Tomelleri C, Hesse S. Transfer of scientific concepts to clinical practice: recent robot-assisted training studios. Fuctional Neurology 2009; 24 (4): 173 -178.
23. Hesse S, Malezic M, Schaffrin A, Mauritz K. Restoration of gait by combined treadmill training and multichannel electrical stimulation in non-ambulatory hemiparetic patients. Scand J Rehabil Med 1995; 27 (4): 199-204.
24. De Jong G, Horn D, Conroy B, Nichols D, Healtton EB. Opening the black box of post-stroke rehabilitation: stroke rehabilitation patients, processes, and outcomes. Med Rehabilitation 2005; 86 (12): SI-7.
25. Maulden A, Gassaway J, Horn D, Smout J, De Jong G. Timing of initiation of rehabilitation after stroke. Arch Phys Med Rehabil 2005; 86 (12 suppl 2): 34-40. (PMID: 16373138)

26. Israel F, Campbell D, Kahn H, Hornby G. Metabolic costs and muscle activity patterns during robotic-and therapist-assisted treadmill walking in individuals with incomplete spinal cord injury. *Phys Ther* 2006; 86 (11): 1466-1478.
27. Meyer H, Borggraefe D, Ammann R, Berweck, Sennhauser F, Knecht B, Heinen F. Feasibility of robotic assisted locomotor training in children with central gait impairment. *Develop Med Child Neurol (London)* 2007; 49 (12): 900-907.
28. Prosser L. Locomotor training within an in patient rehabilitation program after pediatric incomplete spinal cord injury. *Physical Therapy* 2007; 87: 1224-1232.
29. Jezemik S, Schärer R, Colombo G, Morari M. Adaptative robotic rehabilitation of locomotion a clinical study in spinally injured individuals. *Spinal Cord* 2003; 41: 657-666.
30. Mehrholz J, Kugler J, Pohl M. Entrenamiento locomotor para caminar después de una lesión en la médula espinal. *Biblioteca Cochrane Plus* 2008; 2: 1-33.
31. Borggraefe I, Kiwull L, Schaefer S, Koerte I, Blaschek A, Meyer A, Heinen F. Sustain ability of motor performance after robotic-assisted treadmill therapy children: an open, non – randomized baseline – treatment study. *J Phy Rehab Med* 2010; 46: 1-7.
32. Frascarelli F, Masia L, Di Rosa G, Cappa P, Petrarca M, Castell E, Krebs H. The impact of robotic rehabilitation in children with acquired or congenital movement disorders. *Phys Rehab* 2009; 45 (1): 135-141.
33. Wade T, Collen M, Robb G, Warlow C. Physiotherapy intervention late after stroke and mobility. *BMJ* 1992; 7: 304 (6826): 609-613.
34. Freivogel S, Mehrholz J, Schmalohr D. Improved walking ability and reduced therapeutic stress with an electromechanical gait device. *Rehab Med* 2009; 41: 734-739.
35. Colomer C, Noé E, Revert M, Bermejo C, Galán P, Gómez L, López R y cols. Nuevos avances en la reeducación de la marcha: el robot en la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido. *Rehabilitación Madrid* 2007; 41 (1): 1-32.
36. Midha M, Schmitt J, Sclater M. Exercise effect with the wheelchair aerobic fitness trainer on conditioning and metabolic function in disabled persons: a pilot study. *Arch Phys Med Rehab* 1999; 80 (3): 258-261.
37. Martínez I, Castellanos G, Rodríguez G. Eficacia de la aplicación del programa de rehabilitación física aplicado en la clínica de neuro-pediatría para la disminución de la espasticidad y el aumento en la capacidad motora en niños con parálisis cerebral infantil. *Revista Digital de Buenos Aires* 2003; 9: 67.

Correspondencia:

L.T.F. Iván Rodríguez Claudio

Blvd. Guadalupe Hinojosa de Murat núm. 1000,

San Raymundo Jalpan, 71248, Oaxaca.

Tel: 044 951 194 1313

Fax: 01951 502 1111

E-mail: irodriguez@teleton-oax.org.mx