

Prótesis biónicas, biología y tecnología

Isabel Sánchez Navarro*

RESUMEN

En las últimas décadas se han registrado grandes avances en el ámbito de las prótesis. Esto ha permitido que cada vez se asemejen más a las extremidades que intentan reemplazar, y hoy podemos hablar de prótesis robóticas o biónicas. Actualmente la investigación en prótesis ofrece sistemas capaces de formar una conexión mente-máquina, gracias a implantes de electrodos en los nervios, que interpretan las señales eléctricas y las traducen en movimientos mecánicos.

– **Sánchez Navarro I.** Prótesis biónicas, biología y tecnología. *Panorama Actual Med* 2018; 42(411): 256-259.

INTRODUCCIÓN

Se conoce como Ingeniería Biónica a la especializada en la producción de herramientas tecnológicas que simulen el funcionamiento o modelo de los seres vivos. Su objetivo es la combinación de sistemas electrónicos y biológicos, potenciando sus ventajas y características. Con el paso de los años la investigación ha experimentado una gran evolución, y actualmente, estas prótesis son capaces de recrear, por ejemplo, el sentido del tacto de zonas amputadas, función que era impensable hace unos años.

La primera prótesis de miembro superior registrada data del año 2000 a.C. Fue encontrada en una momia egipcia. La prótesis estaba sujeta al antebrazo por medio de un soporte adaptado al mismo¹. Existen registros entre los años 950 al 710 a.C. de una prótesis de un dedo del pie encontrada en Cairo, Egipto² (se cree que pertenecía a una mujer de la nobleza egipcia).

Posteriormente, con el manejo del hierro, en el año de 1400 se fabricó la mano de Alt-Ruppin¹. Constaba de un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles, los cuales eran flexionados pasivamente: éstos se podían fijar mediante un mecanismo de trinquete. Además tenía la muñeca móvil (**Figura 1**).

* Hospital Universitario Príncipe de Asturias de Alcalá de Henares (im.sancheznavarro@gmail.com).

En el siglo XIX se emplean el cuero, los polímeros naturales y la madera en la fabricación de prótesis, y en 1946 se crean sistemas de propulsión asistida, dando origen a las prótesis neumáticas y eléctricas.

En las últimas décadas las investigaciones en el desarrollo protésico han permitido importantes avances en sus aplicaciones. Cabe destacar la técnica de reinervación muscular dirigida (*Targeted Muscle Reinnervation*)³. Los nervios residuales del miembro amputado se transfieren a un grupo muscular conservado, que no tiene función biomecánica debido a la amputación. Durante la transferencia de los ner-



Figura 1. Mano protésica de Alt-Ruppin¹.

vios, los músculos seleccionados son denervados y reinervados de nuevo y sirven como amplificadores biológicos de los nervios amputados. En la piel correspondiente de estos músculos se retira el tejido celular subcutáneo para conseguir una mejor transmisión de las señales eléctricas que se generen. Por ejemplo, el transferir el nervio mediano al músculo pectoral, proporciona una señal mioléctrica de cierre de la mano. Así mismo, utilizando un segmento de piel cercano a la musculatura reinervada, se puede proporcionar al usuario sentido del tacto en su miembro amputado.

Como en toda investigación, el desarrollo de las Prótesis biónicas se apoya en un conjunto de áreas con un fin en común. Entre estas áreas, cabe destacar matemáticas, física, informática, electrónica, biología y anatomía. Las Matemáticas proporcionan ecuaciones y cálculos necesarios para el funcionamiento de una extremidad biónica. Mediante la Física se determina la actuación e interacción de las fuerzas en la dinámica de las prótesis. La Informática se utiliza para programar un lenguaje, y los movimientos de dicha extremidad biónica puedan ser entendidos por un computador. La Electrónica permite conocer los componentes físicos (resistencias, motores, etc.) que harán de la prótesis algo funcional. La Biología y Anatomía sirven como marco de referencia, ya que la finalidad de dicha prótesis es actuar lo más parecido posible a un miembro humano.

MODELOS DE PRÓTESIS BIÓNICAS

Se ha realizado una revisión de documentos de sociedades científicas y artículos dedicados a la evolución e investigación de Prótesis Biónicas, a través de bases de datos bibliográficas médicas como Medline®, UpToDate® y PubMed®.

Destacan las bases del diseño y modelación anatómica. Confección

bajo el criterio de recuperación del aspecto natural, aumento del confort, aumento de la seguridad de funcionamiento y mejora de la función. Este tipo de prótesis usa la energía eléctrica que se origina en el músculo que queda al nivel de la amputación y, a través de electrodos superficiales o electrodos implantados en los nervios periféricos, se recoge esa energía eléctrica y se utiliza como plataforma de control. Por medio de un patrón de contracción, el paciente puede dominar los movimientos.

En las Prótesis Biónicas destaca la figura actual de Hugh Herr⁴ (nacido en 1964) escalador, ingeniero y profesor de biofísica estadounidense. Había perdido sus piernas practicando montañismo, y se hizo famoso por sus avances en ingeniería biomecánica diseñando prótesis de tecnología avanzada. Fué galardonado con el Premio Princesa de Asturias de Investigación el 1 de junio de 2016, y dirige el grupo de investigación de biomecatrónica en el MIT Media Lab.

Los principales modelos de prótesis biónicas, miembros superior e inferior, se exponen a continuación.

PRÓTESIS BIÓNICA DE MANO

Suele estar fabricada en poliuretano que garantiza estabilidad y ligereza de peso. Es importante que para lograr un reemplazo casi natural de la mano perdida, el usuario debe recibir las sensaciones notorias que percibe al agarrar o manipular un objeto. Se conecta al sistema nervioso del huésped en dos de los nervios principales del brazo, el mediano y los nervios cubitales, a través de electrodos intrafasciculares multicanal transversales⁵.

En el artículo "Restoring Natural Sensory Feedback in Real-Time Bidirectional Hand Prostheses"⁵, se detalla que el participante pudo modular eficazmente la fuerza de agarre de la prótesis sin retroalimentación visual o auditiva. El sujeto distinguió tres niveles de fuerza diferentes. Los resultados también demuestran que se puede obtener una alta complejidad de percepción, permitiendo al sujeto identificar la rigidez y la forma de tres objetos diferentes. Este enfoque podría mejorar la eficacia y la calidad de las prótesis de mano, lo que da como resultado una estrategia clave para el reemplazo casi natural de las manos perdidas.

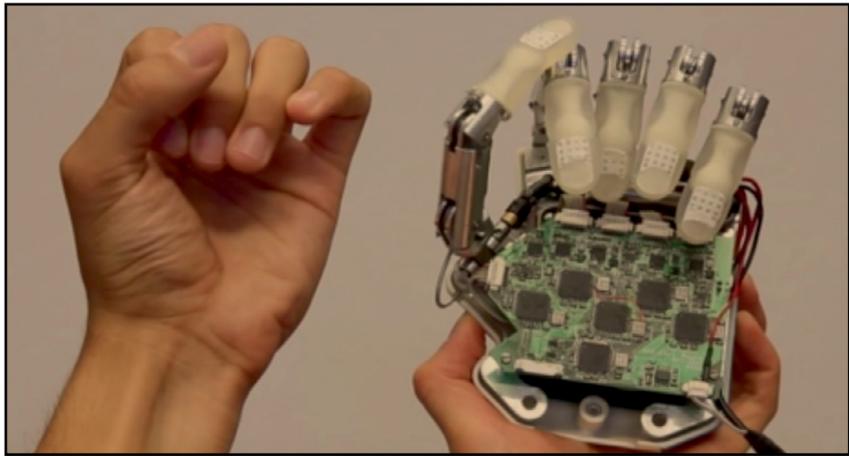


Figura 2. Mano biónica. Proyecto NEBIAS⁶.

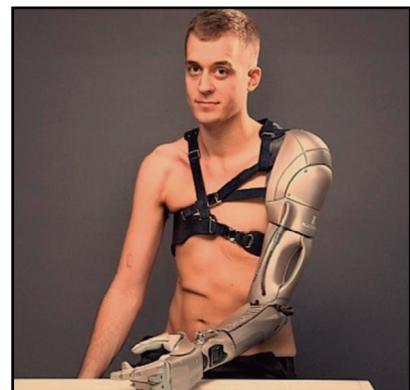
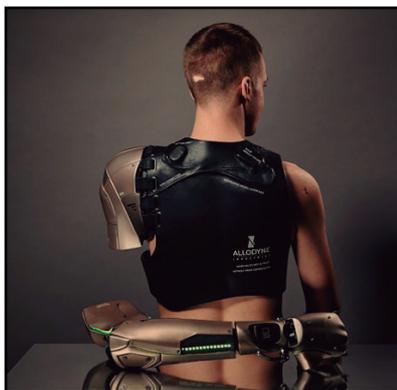
El proyecto NEBIAS⁶ (NEurocontrolled BIdirectional Artificial upper limb and hand prosthesis), es la continuación de una investigación multidisciplinaria intensiva en este ámbito que dio comienzo hace años con el proyecto CYBERHAND, perteneciente a la actividad "Tecnologías futuras y emergentes (FET) del Quinto Programa Marco (5PM, 2002-2005)". Logró crear un prototipo de mano mecánica y, en los "Programas Marco Sexto y Séptimo (6PM y 7PM)", se intensificó la investigación sobre la conexión de agentes robóticos y el sistema nervioso, hasta que se ensayó con éxito un prototipo de electrodo carente de información sensorial. En la Figura 2 se expone esta mano biónica considerada actualmente como el modelo más avanzado de los existentes.

PRÓTESIS BIÓNICA DE BRAZO

Es el tipo de prótesis más evolucionada. Sintetiza mejor el aspecto estético, es de gran fuerza y velocidad de prensión, y tiene otras muchas posibilidades de combinación o amplia-

ción. Las prótesis de brazo llevan incorporada una prótesis de mano, para cualquier nivel de amputación. Tiene la función de apertura y cierre, mediante un sistema de accionamiento miniaturizado. Incorpora un pequeño motor de alto desarrollo que mueve los dedos medio e índice, así como el pulgar abriendo y cerrando la mano.

La empresa Open Bionics⁷ creó el primer brazo biónico en el proyecto "Phantom Limb". Se trata de una prótesis robótica que se controla mediante sensores conectados a los músculos del hombro. Permite que esta prótesis robótica interprete las señales enviadas por el cerebro y las traduzca en ejecuciones. Este brazo biónico es capaz de abrir y cerrar el puño, mover el dedo pulgar de forma independiente, apuntar con los otros dedos, etc. Se controla de forma mioeléctrica y los sensores reconocen diferentes patrones de movimiento que el usuario realiza al tensar su hombro de forma específica. Estos sensores están conectados con cables a una unidad procesadora que se adapta bajo la ropa junto con su batería recargable. En las Figuras 3 y 4



Figuras 3 y 4. Brazo biónico. Proyecto Phantom Limb⁷.

se presenta la prótesis de brazo resultante de este proyecto.

PRÓTESIS BIÓNICA DE TOBILLO-PIE

Se ha desarrollado una prótesis biónica que emula la función de un tobillo-pie biológico durante la marcha⁸. La prótesis biónica tobillo y pie ha sido diseñada con componentes pasivos y activos que facilitan la generación de trabajo neto positivo en la articulación protésica del tobillo durante la marcha. La base de la prótesis consta de un pie compuesto de fibra de carbono (**Figura 5**).

La configuración general es autónoma. Todos los componentes electrónicos y una batería, de polímero de litio que proporciona energía al motor, están alojados dentro de la prótesis.

H. Herr y cols.⁸ compararon los costos de energía metabólica, las velocidades óptimas y los patrones biomecánicos de siete personas con una amputación transtibial unilateral, utilizando una prótesis biónica, y el uso de su propia prótesis elástica pasiva, a las de siete no amputados durante la marcha. En comparación con el uso de una prótesis elástica pasiva, alternativa anterior a las prótesis biónicas, el uso de la prótesis biónica disminuyó el costo metabólico en un 8%, aumentó el trabajo mecánico de la pierna protésica en un 57% y disminuyó el trabajo mecánico de la pierna biológica en un 10%.

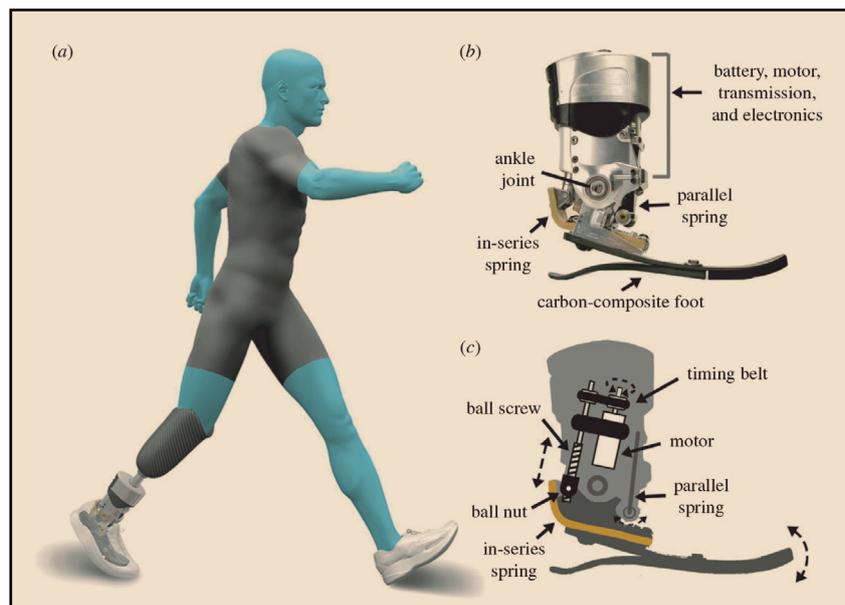


Figura 5. Prótesis biónica de tobillo-pie.

PRÓTESIS BIÓNICA DE RODILLA

H. Herr se centró en la combinación de microelectrónica y nanotecnología para desarrollar una rodilla artificial controlada por un microprocesador que funciona aprendiendo los pasos del usuario a medida que avanzan. Se encuentra disponible en el mercado como “*Rheo Knee*”.

La rodilla *Rheo Knee* contiene sensores incorporados que pueden medir el grado de doblez de la rodilla, así como la cantidad de fuerza que el usuario aplica mientras camina. Posteriormente un chip de computadora analiza el caminar del usuario y adapta, en consecuencia y continuamente, el movimiento y la resistencia de la rodilla (**Figura 6**).

Bellmann M y cols.¹⁰ realizaron un análisis biomecánico comparativo de varias articulaciones de rodilla protésicas controladas por microprocesador. Evaluaron e identificaron las diferencias funcionales de 4 articulaciones: *C-Leg*, *Hybrid Knee* (también llamada *Energy Knee*), *Rheo Knee* y *Adaptive 2*.

Rheo Knee proporciona suficiente extensión terminal; sin embargo, las resistencias a la flexión de la fase de oscilación parecen ser demasiado bajas. Los valores del consumo de energía metabólica muestran sólo ligeras diferencias durante el nivel de marcha. Este consumo no varía significativamente entre las rodillas probadas.

También, J. L. Johansson y cols.¹¹ estudian estas articulaciones, y observan que la fase de balanceo durante la marcha nivelado con *Rheo Knee*, era más fácil para el usuario que con *C-Leg*, especialmente para amputados con miembros residuales transfemorales cortos.

PRÓTESIS BIÓNICA DE PIERNA

Para que un ser humano se desenvuelva con naturalidad, es necesario que su cuerpo interactúe de manera armónica con su entorno. Una forma de interactuar con el medio es el hecho de desplazarse sobre diferentes terrenos.

El proyecto *EU FP7, CYBERLEGS (The CYBERnetic LowEr-Limb CoGnitive Ortho-prosthesis)*¹², tiene como objetivo global, científico y tecnológico, el desarrollo de un sistema cognitivo artificial para el reemplazo funcional de miembros inferiores transfemorales transvasculares, así como la asistencia en actividades cotidianas. *CYBERLEGS* es un sistema robótico constituido por una pierna artificial cognitiva activa para el reemplazo funcional de la extremidad amputada y una ortesis activa para poder ayudar a la extremidad sana contralateral. Permite al amputado caminar hacia adelante y hacia atrás, subir y bajar escaleras, moverse de un lugar a otro y pararse para sentarse con un mínimo esfuerzo cognitivo y energético (**Figura 7**).



Figura 6. Rodilla Rheo[®].

DISCUSIÓN

Se observa un aumento en la calidad de vida de las personas que por diferentes razones han perdido partes de su cuerpo y, con estas prótesis, buscan mejorar su apariencia física y reanudar su vida normal autónoma. Sin embargo se necesita un intenso entrenamiento físico y mental para desarrollar todo el potencial de estas prótesis. Por otra parte, la economía particular del paciente influye en el posible alcance de estos dispositivos. Su coste puede ser elevado para el usuario.

DIFICULTADES Y RETOS

Para obtener una prótesis que imite en buena forma la dinámica del miembro amputado es necesario que el diseño satisfaga ciertas especificaciones:

Tamaño y Masa: Las dimensiones de la prótesis deben ser las mismas, o muy similares, que las del miembro que sustituyen. Por otro lado, la masa debe ser igual o menor a la del miembro amputado para que el portador pueda manipularla con facilidad y no haga esfuerzos extraordinarios que puedan dañar los músculos que soportan la prótesis.

Baterías: La duración de las baterías debe permitir un funcionamiento de, al menos, 16 horas para que el usuario no tenga problemas de insu-



Figura 7. Prótesis biónica de pierna. Proyecto EU FP7 CYBERLEGS¹².

ficiencia de energía durante las actividades diarias.

CONCLUSIONES

La gran evolución por la que han pasado las prótesis biónicas y el gran avance tecnológico que les acompaña, han permitido que los pacientes que las utilizan puedan reanudar una actividad normal e independiente, mejorando su calidad de vida.

Actualmente existen múltiples líneas de investigación que prometen nuevos cambios revolucionarios en la interfaz mente-máquina. Es por esto, que es de vital importancia revisar constantemente la literatura científica para mantenerse a la vanguardia de lo que se va descubriendo y así poder aconsejar en forma apropiada a los

pacientes que acuden solicitando ayuda u opinión.

Otras aplicaciones: una vez que se controle a la perfección el proceso de envío de las señales cerebrales a un dispositivo para su tratamiento digital y su conversión en órdenes mecánicas, el abanico de posibilidades de esta tecnología es muy amplio. Ya no sólo será posible que un humano con una lesión severa pueda volver a caminar y realizar las actividades de la vida diaria, sino que se podría utilizar, en la industria, para controlar, y tele-controlar, herramientas y máquinas que ejerzan fuerzas mucho mayores, o más sutiles y livianas, de lo que el cuerpo humano es capaz. De este modo, la mente humana, directamente a través de este tipo de prótesis, podría tele-gobernar máquinas a distancia de cualquier potencia. ¿Podrá esto ser el gran futuro de la unión mente-máquina?

BIBLIOGRAFÍA

1. Dorador JM, et al. Robótica y prótesis inteligentes. *Revista Digital Universitaria*. Facultad de Ingeniería UNAM. 2004; 6(1); 1067-6079.
2. García D, Espinoza MJ. Avances en prótesis: una mirada al presente y al futuro. *Revista Médica Clínica Las Condes*. 2014; 25(2): 281-5.
3. Kuiken TA, Dumanian GA, Lipschutz RD, Miller LA, Stubblefield KA. The use of targeted muscle reinnervation for improved myoelectric prosthesis control in a bilateral shoulder disarticulation amputee. *Prosthet Orthot Int*. 2004; 28(3): 245-53.
4. Herr H. Premio Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2016. Fundación Princesa de Asturias. Disponible en: <http://www.fpa.es/es/premios-princesa-de-asturias/premiados/2016-hugh-herr.html?especifica=0&idCategoria=0&anio=2016>
5. Raspopovic S, Capogrosso M, Petrini FM, Bonizzato M, Rigosa J, Di Pino G, et al. Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses. *Sci Transl Med*. 2014; 6(222): 222ra19. doi: 10.1126/scitranslmed.3006820
6. CORDIS: Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo [Internet]. Nebias-Project.eu. Disponible en: http://cordis.europa.eu/project/rcn/209088_es.html.
7. OPENBIONICS. Open-Source robotic and bionic devices. Disponible en: <https://openbionics.org/>
8. Herr HM, Grabowski AM. Bionic ankle-foot prosthesis normalizes walking gait for persons with leg amputation. *Proc Biol Sci*. 2012; 279(1728): 457-64. doi: 10.1098/rspb.2011.1194.
9. Center For Prosthetics orthotics, Inc. CPO. The Rheo Knee®. Disponible en: <http://cpo.biz/the-rheo-knee/>
10. Bellmann M, Schmalz T, Blumentritt S. Comparative Biomechanical Analysis of Current Microprocessor-Controlled Prosthetic Knee Joints. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2010; 91(4): 644-52.
11. Johansson JL, Sherrill DM, Riley PO, Bonato P, Herr H. A clinical comparison of variable-damping and mechanically passive prosthetic knee devices. *Am J Phys Med Rehabil*. 2005; 84: 563-75.
12. Goršič M, et al. Online phase detection using wearable sensors for walking with a robotic prosthesis. *Sensors* 2014; 14(2): 2776-94.