

Álvaro Hernández Ramírez Llinás\*\*  
Pablo Daniel Bonaveri\*\*\*

# Biónica e implantes neuronales, nuevo paradigma para la rehabilitación\*

Bionics and neural implants,  
new paradigm for rehabilitation

Biônica e implantes neurais,  
um novo paradigma para a reabilitação

## Resumen

La microelectrónica avanzada para procesamiento de señales, está acercando el sueño de mezclar el hombre y la máquina a la realidad. En estos sistemas artificiales el flujo de información se realiza a través de cables, buses, y en algunos casos mediante enlaces de radio, mientras que en los seres vivos, la transmisión se realiza a través de los nervios, que actúan como el equivalente de esos cables. Los dos sistemas se han comunicado a través de dispositivos simples como teclado, mouse, pantallas táctiles, que se van sofisticando y aumentan su complejidad, como la estimulación

eléctrica o neuromuscular para provocar movimientos funcionales o las llamadas prótesis sensoriales, para restaurar la pérdida de algún órgano.

## Palabras clave

Biónica, interfase hombre-máquina, implantes neuronales, prótesis, neuroprótesis.

## Abstract

Microelectronics Advanced signal processing is really reaching the dream of bringing to the reality the fusion between mankind and machine. In these artificial systems, the flow of information is done through data cables, and in some cases, by means of radio links, and the equivalent process of communication occurs to living beings, but the transfer takes place through the nerves. The two systems are connected through simple devices such as keyboard, mouse, touch screens, which will become more sophisticated and increasing its complexity, as the example of neuromuscular electrical stimulation that causes functional movements or the so-called sensory prostheses, used to restore loss of some organ.

Fecha de recepción del artículo: 12 de febrero de 2010.

Fecha de aceptación del artículo: 16 de abril de 2010.

\* Artículo de investigación resultado del proyecto que adelantan los autores en el "Grupo de Investigación en Ingeniería Mecatrónica (GIIM)", línea de investigación "Bioingeniería", registro Colciencias COL0101301.

\*\* Ingeniero de sistemas y computación, Universidad de los Andes. Experto en inteligencia artificial y nanotecnología. Profesor Universidad Autónoma del Caribe. Investigador del "Grupo de Investigación en Ingeniería Mecatrónica (GIIM)". Correo electrónico: aramirez@uac.edu.co.

\*\*\*Tecnólogo electromecánico, Universidad Antonio Nariño. Ingeniero mecánico, Universidad Autónoma del Caribe. Especialista en sensorica, módulos de producción en serie y robótica, Sena colombo-alemán. Msc. of Science, Buffalo State University (New York, U.S.A). Candidato a doctor en Ingeniería mecatrónica, Atlantic International University, (Honolulu, Hawaii). Director del "Grupo de Investigación en Ingeniería Mecatrónica (GIIM)". Correo electrónico: pbonaveri@uac.edu.co.

**Keywords**

Bionics, human-machine interface, neural implants, prosthesis, neuroprosthesis.

**Resumo**

A microeletrônica avançada de processamento de sinais está realmente alcançando o sonho de tornar realidade a fusão entre homem e máquina. Nestes sistemas artificiais, o fluxo de informações é feito através de cabos de dados e, em alguns casos, por meio de ligações via rádio; enquanto nos seres vivos a transferência é realizada através dos nervos, que atuam como o equivalente destes cabos. Os dois sistemas são conectados por meio de dispositivos simples como teclado, mouse, telas sensíveis ao toque, que vão se sofisticando e aumentando sua complexidade, a exemplo da estimulação elétrica neuromuscular que provoca movimentos funcionais ou as chamadas de próteses sensoriais, utilizadas para restaurar a perda de algum órgão.

**Palavras-chave**

Biônica, interface homem-máquina, implantes neurais, prótese, neuroprótese.

**INTRODUCCIÓN**

El término prótesis se define como "el aparato o procedimiento mediante el cual se repara artificialmente la falta de un miembro, órgano o parte de él, como una pierna, un brazo, un diente, un ojo, etc. Las prótesis normalmente utilizadas, son estructuras, en su mayoría mecánicas, que tienen desventajas en su desempeño, algunas son pesadas, rígidas e incómodas. Otras son electromecánicas, aunque en este caso el accionamiento es mediante algún botón o interruptor, como por ejemplo, la prótesis de mano de pinza, que es todavía el único aparato disponible para la mayoría de los amputados, la cual funciona con cables que se mueven al presionar con la barbilla o el otro brazo las palancas de un arnés.

Por su parte la neuroprótesis, lleva a la implantación de un chip o circuito integrado, que permite accionar dispositivos protésicos que funcionan por electroestimulación y comunican al cerebro con la máquina (interfaz cerebro-máquina), la voluntad con la acción, permitiéndole enviar señales al propio organismo o a otras máquinas y "sin mover un dedo".

Esta convergencia entre máquinas y tejidos vivos, es complementada por los implantes neuronales, los cua-

les son dispositivos estimuladores electrónicos de los nervios, capaces de salvar las limitaciones espaciales o la pérdida de funciones motoras y sensoriales.

Los electrodos metálicos convencionales presentan algunas limitaciones, como la dificultad que entraña diseñarlos para que sean eficientes tanto en el envío como en la recepción de señales eléctricas. A fin de subsanar este problema, científicos de la Universidad de Texas, en Estados Unidos, podrían haber dado un importante paso en la resolución de este problema mediante el recubrimiento de los electrodos eléctricos con nanotubos de carbono.

La idea básica del proyecto inicial de interfaz neuronal, comenzó colocando un chip de silicio no mayor de 2mm cuadrados entre los extremos proximal y distal de un nervio seccionado, antes de que se produzca la regeneración axonal. Desde sus inicios, la placa contiene en su centro una matriz de microperforaciones, rodeadas cada una de ellas de un microelectrodo. Al producirse la regeneración, los axones pasan a través de las microperforaciones de la placa, de manera que cuando se recupera la funcionalidad del nervio es posible detectar a través de los microelectrodos las señales eléctricas transportadas por los axones y se pueden utilizar los microelectrodos para excitar eléctricamente los axones.

El proyecto se encaminó a desarrollar una interfaz permanente y bidireccional, que haga posible captar señales neuronales y enviar señales hacia el cerebro a través de los axones. La posibilidad de excitar eléctricamente los axones permitió pensar en nuevas prótesis avanzadas, en las que una serie de sensores tengan la capacidad de captar la señal o comando cerebral y trabajar sobre actuadores o motores en neuroprótesis, que en cierta medida reemplacen extremidades perdidas por un motivo u otro y que en lo posible, capten sensaciones como temperatura, presión, etc., y las envíen hacia el cerebro nuevamente, produciendo una verdadera retroalimentación o feedback.

Hoy día, reemplazar miembros amputados o hacer partes del cuerpo biónicas ya se está convirtiendo en realidad. Las neuroprótesis permiten mover de una manera más natural y compleja el miembro artificial, haciendo necesario para implantarla, que se localicen en el miembro dos músculos antagonistas, uno que realice flexiones y otro que haga extensiones de ese brazo, mano, pie o pierna. Se conectan ambos músculos con la neuroprótesis y mediante rehabilitación fi-

sioterapéutica se trabajan de manera que se “aprenda” a contraer cada músculo para flexionar o extender según interese. Esa neuroprótesis incluye unos sensores que recogen el movimiento de esos músculos, llevan el impulso a un servomotor, motor que gira en una u otra dirección según el impulso que le llegue y controla así la prótesis, haciendo que ésta se mueva en uno u otro sentido (Flores y otros, 2004).

Las nuevas investigaciones se concentran en seis temas principales: visión (implantes de retina), audición (implantes cocleares), movilidad (implantes corticales y espinales), interfaces hombre-máquina no invasivas (pilotado a distancia, robótica), micro- y nano-fabricación de implantes, y codificación neuronal (sensores de proceso de señal).

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Entre los problemas detectados durante la fase primaria del proyecto podemos enunciar:

\* La información detectada por los sensores en la mayoría de los casos se envía hacia algún sistema de adquisición y tratamiento de datos no implantado. Si bien la forma más simple de extraer esta información es mediante conectores percutáneos, este sistema suele presentar problemas de índole práctica, sobre todo cuando se pretende su utilización durante períodos prolongados: vías abiertas a través de las cuales es fácil que se produzcan infecciones, ulceraciones de las zonas cercanas a los puntos de salida de los cables, fragilidad de éstos, limitación en la libertad de movimientos del individuo, etc.

\* La transmisión sin cables, vía radiofrecuencia ultrasónica u óptica, o usando directamente la señal nerviosa requiere dispositivos más sofisticados. En las neuroprótesis, el procedimiento consiste en la implantación de chips de silicio dotados de finos electrodos, normalmente en el cerebro, pero también puede ser en diferentes partes del cuerpo, donde los nervios, conductores de señales eléctricas proporcionen una buena señal. El problema de hacer la conexión, es que no se puede unir un nervio a un cable o electrodo metálico, ya que puede ser rechazado por el organismo o generar algún tipo de infección. Utilizar los músculos es una solución, al contar con una señal amplificada, ya que cuando estos se contraen, disparan un pulso eléctrico suficiente para ser detectado por un electrodo puesto en la piel. En el caso de muñones donde los nervios están rotos y recogidos, es necesario desviar-

los hacia músculos que proporcionen la intensidad apropiada a las señales.

\* Además, así como es posible conectar la máquina con la mente, también es necesario destacar lo difícil que es mantener esa conexión, ya que si un electrodo se mueve, perjudicaría la conexión, llevando a un mal funcionamiento de la neuroprótesis.

\* El sistema de procesamiento de datos debe cerrar el bucle sensor-actuador, y para ello debe ser capaz, por un lado, de interpretar en forma conveniente la información extraída por los sensores, y por otro, tomar decisiones sobre las acciones que debe llevar a cabo el o los actuadores.

\* La cantidad de información extraída por los sensores es muy grande y se debe dotar al sistema de una cierta inteligencia para que sea capaz de interpretar las señales y actuar en consecuencia. Para que a partir de las señales sea posible controlar una prótesis, es necesario:

1- Identificar las señales motoras, esto es, establecer qué subconjuntos de todas las señales registradas por los electrodos de la interfaz (centenares de señales) son potenciales de acción que, de no haber existido la amputación, inervarían los músculos.

2- Identificar las señales sensitivas, es decir, aquellas que envían información (táctil, temperatura, etc.) al cerebro.

3- Identificar cómo se asocian los distintos patrones de señales motoras con los movimientos de la prótesis.

Como datos anecdóticos, contamos en la actualidad con corazón artificial, sangre artificial, hígado bio-artificial, ingeniería de tejidos con dermis y epidermis, xeno-transplantes con cerdos, chimpancés, biomateriales, implantes cocleares, reparación de médula espinal y finalmente, restauración de la movilidad a través de partes artificiales en el cuerpo.

La idea básica del proyecto inicial de interfaz neuronal, comenzó colocando un chip de silicio no mayor de 2mm cuadrados entre los extremos proximal y distal de un nervio seccionado, antes de que se produzca la regeneración axonal.

M É T O D O S	<b>DISPOSITIVO BIÓNICO</b> Con electrodos externos o implantados	<b>POSIBLES USUARIOS</b>	<b>ACTUADOR</b> + ejemplo
	<b>BMI</b> (Brain-Machine Interface)	Personas completamente paralizadas y desean dispositivos mecánicos	Motores. Vrgr: brazos robóticos.
	<b>BCI</b> (Brain-Computer Interface)	Personas completamente paralizadas que desean simplemente comunicarse	Pantalla de Computador. Vrgr: mover un cursor.
	<b>PMI</b> (Peripheral -Machine Interface)	Amputados ó con músculos débiles pero sistema nervioso central intacto.	Motores. Vrgr: Prótesis de mano.
	<b>HBMI</b> (Hybrid brain -Machine Interface)	Médula Espinal dañada, con músculos de extremidades intactos.	Músculos. Vrgr: Control directo del cerebro sobre una mano.
	<b>CBI</b> (Computer-Brain Interface)	Mal de Parkinson	Músculos

### Soluciones con dispositivos biónicos disponibles en la actualidad

Entre las soluciones con dispositivos biónicos que actualmente se encuentran, tenemos las que se relacionan en el cuadro anterior.

**El caso EMG (electromiográfico):** se ha diseñado un equipo que sirve de interfaz entre el ordenador y las señales eléctricas del cuerpo. Comienza con la amplificación de las señales EMG, en un factor de 10.000.

Otros circuitos lo convierten en un formato digital. Luego de un extenso procesamiento de dichas señales digitalizadas, el ordenador puede determinar cuándo y en qué medida se contraen las fibras musculares próximas a los electrodos, de esta manera, la actividad muscular puede dirigir la operación de un ordenador personal.

**El caso EEG (electroencefalograma):** Se ha intentado aislar ciertas señales que el sujeto pueda controlar a su voluntad. Desafortunadamente, las señales captadas se resisten al control. Lo que se hace, es medir continuamente una diversidad de señales EEG y eliminar por filtrado las partes indeseadas. Las diferentes ondas, se caracterizan por la frecuencia de sus emisiones, hay varios tipos: ALFA, se crean por acciones sencillas; BETA, se las asocia a un estado de alerta; TETHA, se originan por tensión emocional, como la frustración; MU, al parecer asociadas con la corteza motora (disminuyen con el movimiento o la intención de moverse).

Casi todas las tentativas de controlar un dispositivo por mediciones continuas de EEG se basan en la obtención de ondas ALFA o MU, ya que es posible aprender a cambiar la amplitud de estos dos ritmos mediante un esfuerzo mental apropiado por ejemplo un recuerdo.

Sobre las ondas MU es posible controlar su amplitud mediante representaciones de la sonrisa, la masticación, la deglución y otras actividades motoras. Existe un segundo tipo de aparato medidor de ondas cerebrales, por medio de un sistema llamado de potencial evocado o EP. La señal EP se produce en respuesta a ciertos estímulos, tales como un fuerte ruido o un destello de luz.

### METODOLOGÍA

El estudio del arte realizado, muestra que las prótesis de pies utilizados hoy en día, son estructuras, en su mayoría mecánicas, que tienen desventajas en su desempeño, algunas son pesadas, rígidas e incómodas. Normalmente cuentan con un mecanismo de acople o encaje (socket), elementos de conexión y alineación, conexiones y/o elementos de seguridad y el pie (estructura fija o con cierta suspensión debido al diseño y materiales con que se construye).

Las que se encuentran en fase investigación, como el Powered Ankle-Foot, del Dr. Hugh Herr y su equipo del MIT, de un grado de libertad, posee un sistema de control biomiméticos que permite que la prótesis pueda imitar el comportamiento normal del tobillo humano, capaz de producir potencia mecánica y un par normal

durante la marcha. O el Proprio Foot, de Össur's, que es el primer módulo de pie inteligente que ofrece ventajas fisiológicas a quienes han sufrido una amputación transtibial, responde a la perfección ante los cambios de terreno, modificando su comportamiento en escaleras y en pendientes, adopta automáticamente el ángulo adecuado de flexión plantar/dorsal según se necesite en estas situaciones.

Puede verse en estas prótesis en fase de investigación, que lo que se pretende es reproducir el comportamiento del miembro amputado de la manera más natural posible, y es aquí donde comienza a surgir la convergencia entre el hombre y la máquina, donde es necesario definir conceptos, que antiguamente parecían una fantasía, pero hoy día ya son una realidad, como la biónica. También, en West Point (New York), el Sargento 1st Patrick King está experimentando con un pie biónico, el West Point Bionic Foot, creado con los cadetes Ian Jones, Sarah Goss, Joe y Jonathan Marshall Kralick. El objetivo es mejorar la eficiencia metabólica de los soldados y producir una marcha simétrica y confortable, comparada con las prótesis convencionales, es decir prótesis pasiva.

De acuerdo con lo expresado anteriormente y al encuestar pacientes con este tipo de amputación, se encuentra la necesidad de diseñar una prótesis inteligente (interfaz hombre-máquina y cerebro-máquina), controlada por el sistema nervioso del propio paciente, desde la concepción de la estética y la funcionalidad, que mejore su calidad de vida, al reemplazar el miembro amputado.

### Aproximación metodológica

1. Realizar entrevistas a expertos en neurología, traumatología, ortopedia, electrónica, mecánica, sistemas y diseño.
2. Realizar entrevistas a personas que han sufrido amputaciones de pie, a fin de analizar sus necesidades.
3. Definir modelos físicos y matemáticos, que permitan la simulación de la biomecánica de la marcha del paciente.
4. Realizar un estudio de los nuevos materiales (materiales con memoria de forma) existentes.
5. Construir prototipos que permitan evaluar la biomecánica de la marcha del paciente.

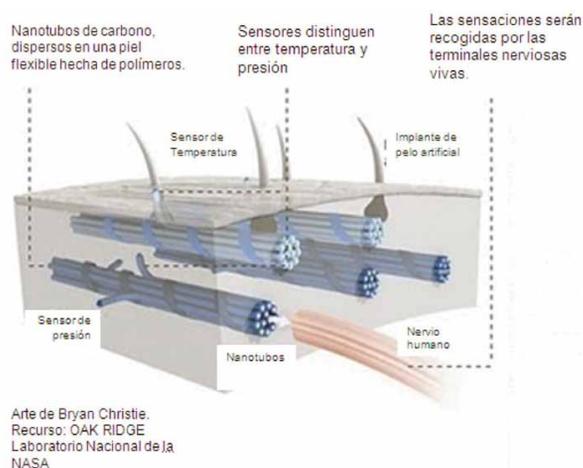
6. Validar el prototipo que reúna las condiciones de estética, funcionalidad y eficiencia en la marcha.

7. Construir la neuroprótesis.

### RESULTADOS

**Piel biónica.** Se prevé en unos veinte años, los miembros artificiales podrían tener piel sensible a la temperatura y al tacto. La utilización de nanotubos de carbono, dispersos en una piel flexible hecha de polímeros, conectarán de manera eficiente con los nervios humanos. Los sensores podrán distinguir temperatura y presión, como así también tendrán sensaciones al ser recogidas por las terminales nerviosas vivas (Figura 1).

Figura 1. Piel biónica



**Implantes de retina.** Los progresos alcanzados recientemente en retinas artificiales y con la interfaz hombre-máquina, han conseguido que la comunicación o la acción, sea únicamente a través del pensamiento, lo cual muestra un panorama que permite valorar las posibilidades para mejorar la vida de los minusválidos. El caso de Jo Ann Lewis, usando su nueva visión biónica, hace que pueda reconocer objetos que antes de perder su vista conocía, aunque los vea borroso, lo que con la práctica y la habilidad natural de su cerebro para el aprendizaje, le serán más fáciles de reconocer.

**Brazos biónicos.** Cinco pacientes con amputaciones más arriba del codo y en uno o ambos brazos, fueron intervenidos entre 2002 y 2006 por especialistas del Instituto de Rehabilitación de Chicago, dirigidos por el

doctor Todd Kuiken, fisiatra e ingeniero biomédico con amplia experiencia en prótesis biónicas. La cirugía consistió en transferir los nervios (reinervación muscular) que quedaron en el brazo amputado, ubicándolos en la parte superior del pecho o en los triceps o bíceps del muñón, con lo que basta, que la persona piense en el movimiento que quiere realizar con su brazo, para que la señal se transmita a la prótesis y se ejecute la acción, sin un esfuerzo consciente del paciente, a diferencia de lo que ocurre con las prótesis actuales.

**Rodilla biónica.** El experto en prótesis y órtesis de la empresa Ossur, Hilmar Janusson, junto a Hugh Herr del laboratorio de la inteligencia artificial MIT, diseñaron la rodilla biónica utilizando un sistema complejo de 'hardware' y de 'software' para supervisar y controlar los movimientos de los amputados, detectando y ajustando su movimiento en tiempo real.

La utilización de nanotubos de carbono, dispersos en una piel flexible hecha de polímeros, conectarán de manera eficiente con los nervios humanos.

**Pies iónicos.** Pueden citarse como ejemplos:

EL PROPRIO FOOT, lanzado al mercado mundial en noviembre de 2006. El dispositivo se ha diseñado para permitir la flexión dorsal durante la fase de balanceo a fin de aumentar el espacio libre para pasar la

punta del pie, mejorando de esta forma la simetría del paso y reduciendo la posibilidad de tropezos.

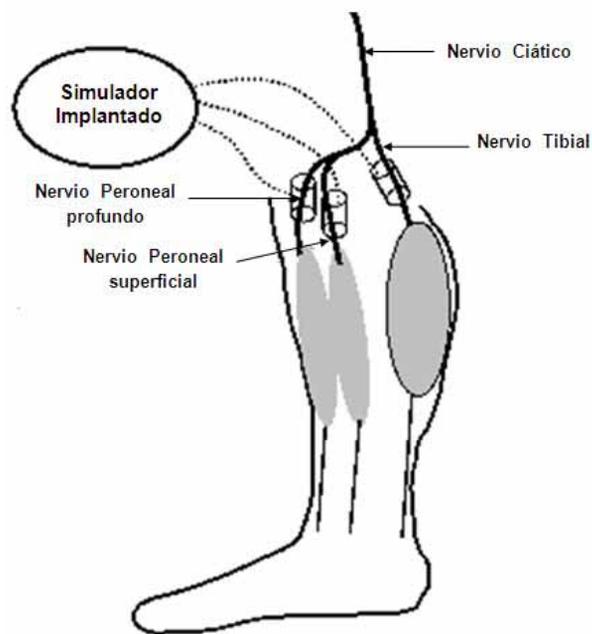
EL POWERED ANKLE-FOOT, del Doctor Hugh Herr y su grupo de investigación Biomecatrónica del MIT, quienes han desarrollado una prótesis de tobillo, que es capaz de propulsar al usuario hacia adelante y variando su rigidez en terreno irregular con éxito, mimetizando la acción de un tobillo biológico, proporcionando a los amputados una marcha verdaderamente humanoide. Herr creó el dispositivo a través del Centro para la Restauración y Medicina Regenerativa, una iniciativa de investigación de colaboración que incluye el Providence VA Medical Center, Brown University y el MIT.

El MF3DF (Mechatronics Foot with Three Degrees of Freedom), del ingeniero Pablo Bonaveri investigador principal y director de la línea de investigación y el in-

geniero Álvaro Hernando Ramírez Llinás, coinvestigador, ambos de la Universidad Autónoma del Caribe. El MF3DF, es una neuroprótesis en fase de desarrollo, que está diseñada desde la concepción de la estética y la funcionalidad de reemplazar el miembro amputado, controlada por el sistema nervioso del propio paciente, permitiendo así un absoluto control sobre ellas, dar tres grados de libertad al miembro artificial (flexión plantar, flexión dorsal, inversión y eversión). Partiendo de valores conocidos como el peso de la persona, el centro de articulación, la medida del pie, los ángulos de dorsiflexión y flexión deseado y la longitud del brazo de palanca, hacen que su funcionalidad esté dada por la utilización de implantes y sensores sobre el órgano residual, baterías, circuito inteligente, actuadores y sensores externos (Ver figuras 3 y 4).

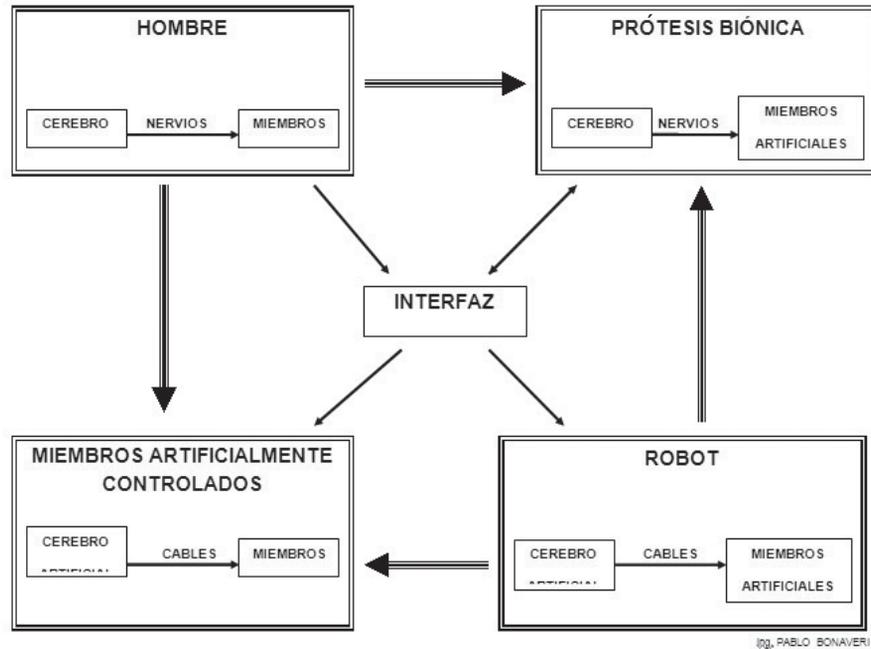
De aquí que la idea de la neuroprótesis, con sus implantes o alambres musculares en el tejido residual,

**Figura 2. Implante neuronal**



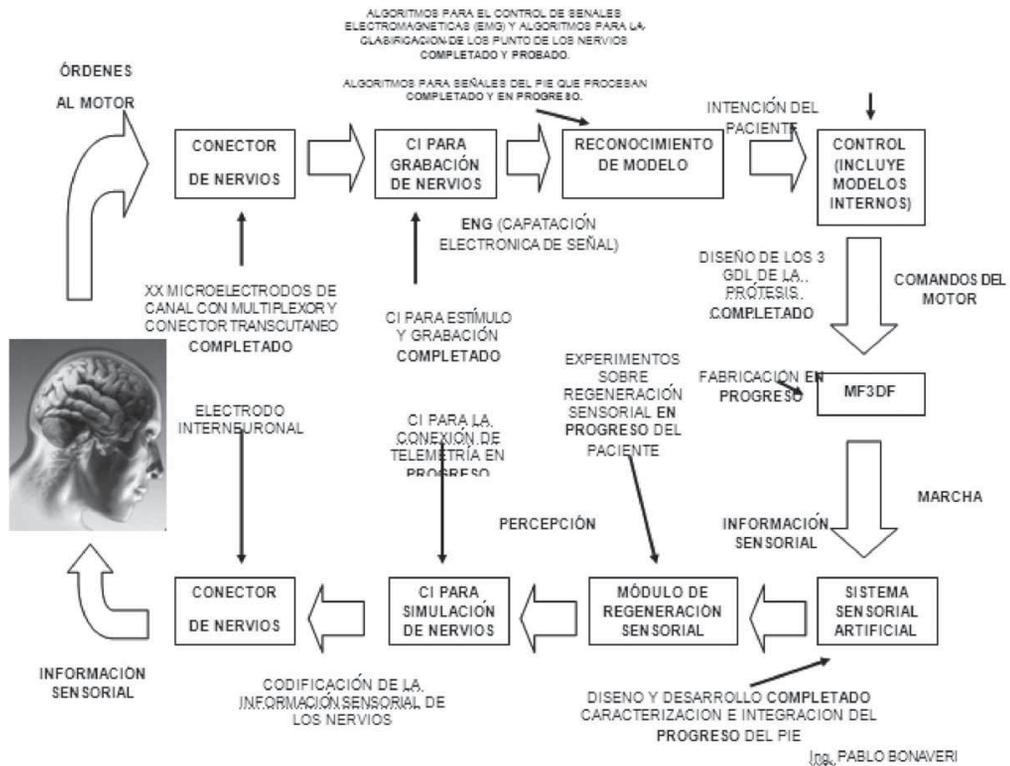
consiste en disponer de una máquina u ordenador, conectado al cerebro que registre las señales de la corteza cerebral y que envíe a los músculos esta información, bien a través de cables, bien por ondas de radio. El ordenador recogerá la información «de vuelta», a partir de las señales de los nervios periféricos y de los sensores externos, que serán enviadas de nuevo a la

Figura 3. Interfaz hombre-máquina



Ing. PABLO BONAVERI

Figura 4. Flujo del MF3DF



Ing. PABLO BONAVERI

corteza cerebral, en bucle cerrado, para ajustar la orden y así afinar los movimientos, e informar al cerebro de lo que está sucediendo con el cuerpo.

El chip debe interpretar las intenciones del amputado procesando las señales bioeléctricas de las neuronas y al mismo tiempo establecer una transmisión mediante el procesamiento de señales bioeléctricas de las neuronas y transmitir con precisión las órdenes del movimiento al pie artificial. La prótesis se diseña para que sea posible la recepción de datos de contacto, temperatura y presión, que se transmitirán al chip, de modo que serán enviadas al cerebro a través de las conexiones con los nervios (Figura 2).

El tobillo humano proporciona una cantidad significativa de trabajo neto positivo durante el período de postura o de marcha, por lo tanto, a la hora de diseñar el MF3DF, se pretende además de la estética, la funcionalidad al proporcionar un sistema bio-inspirado sensorial artificial (ver Fig. 3: Interfaz hombre-máquina y Fig. 4: flujo del MF3DF), que permita que la prótesis presente un comportamiento capaz de generar este trabajo neto positivo.

## CONCLUSIONES

El hecho de desarrollar dispositivos protésicos que funcionen por electroestimulación y comuniquen al cerebro con la máquina y la voluntad con la acción, es permitir el envío de señales al propio organismo o a otras máquinas. De esta manera, alguien que ha perdido un miembro o la facultad de moverlo, podría hacerlo sólo con pensarlo, al transmitirle a una máquina la orden de enviar las señales necesarias al músculo y a los nervios responsables de ese movimiento. Es claro que el sistema sólo puede ser utilizado por aquellas personas que conserven su masa muscular y tejido nervioso en buen estado,

De la bibliografía y sitios web revisados, puede verse que los alambres musculares presentan ventajas en cuanto a peso y tamaño con respecto a otros actuadores, requieren potencias relativamente altas para funcionar debido a que gran parte de la energía suministrada se disipa en calor, por lo que hace que éstos actuadores tengan eficiencias muy bajas. Además, un solo alambre muscular no tiene la fuerza necesaria para mover los actuadores de la prótesis, para lograr aunque fuera un pequeño movimiento, se tendría que realizar un arreglo en paralelo de varios alambres, lo cual eleva aún más la potencia requerida y la temperatura

resultante. Debido a estas elevadas temperaturas el material no puede estar en contacto directo con el actuador ya que se daña, habría que diseñar un disipador de calor muy eficiente, lo cual elevaría el costo, peso y tamaño de la prótesis.

También hay que recordar que al diseñar una prótesis exitosa, se tienen que cumplir varias especificaciones al necesitar potencias altas y no tener la posibilidad de conseguir una fuente portátil que nos la proporcione y que además sea de bajo peso, tamaño y costo, por lo que nos encontramos ante el principal problema del uso de las aleaciones con memoria de forma.

Además, los alambres musculares necesitan ser más estudiados y desarrollados para mejorar su funcionamiento en general y de esta manera poder ser utilizados exitosamente en una prótesis de miembro inferior. No se pueden despreciar las grandes ventajas que en general los materiales con memoria de forma poseen, por tal motivo hay que experimentar con alambres musculares de nitinol y con otros tipos de materiales de memoria de forma existentes (Ríos, Louth y Dorador, 2000). Con el adecuado control y corriente requerida, estos materiales pasarán a ser los más utilizados en las prótesis, resolviendo así el problema actual de los actuadores y como consecuencia mejorarán la funcionalidad y estética de las prótesis de miembro inferior.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALCIATORE, D. (2008). Mecatrónica. 1ª Edición. Buenos Aires: McGraw-Hill / Interamericana México.
- ASKELAND, D. y PHULE, P. (2004). Essentials of materials science and engineering. University of Missouri, University of Pittsburgh. Estados Unidos de América: Thompson.
- DUNLOP, G. R. (2003). A distributed controller for the Canterbury hand, ICOM2003. International Conference on Mechatronics. Professional Engineering Publishing, London, UK.
- FLORES y otros (2004). Actualidad y tendencias en el diseño de prótesis de miembro superior. Memorias del X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Querétaro, México.
- GILBERTSON, R. (2000). Muscle Wires: Project Book. 3ª edición. California: Ed. Mondo Tronics.
- GUTIÉRREZ R., RODRÍGUEZ J. y BOLTON W. (2001). Mecatrónica. Marcombo. 2ª Edición.
- HARRIS, M. y KYBERD, P. (2003). Design and development of a dextrous manipulator, ICOM2003. International Conference on Mechatronics. Professional Engineering Publishing, London, UK.

HURST, S. L. (1999). VLSI custom microelectronics: Digital, analog, and mixed-signal. USA: Marcel Dekker, Inc.

KAMRUZZAMAN J., BEGG R. y SARKER R. (2006). Artificial Neural Networks in Finance and Manufacturing. Francia: Hershey, PA Idea Group Publishing.

KUO, B. C. (1996). Sistemas de Control Automático. 7ª Edición. Buenos Aires: Prentice Hall.

KUTZ (2003). Standard Handbook of Biomedical Engineering and Design. New York: McGraw-Hill.

LANGER, RH. (2004). Limb reconstruction versus amputation decision making in massive lower extremity trauma. Clin Orthop.

PALLAS-ARENY, R. y VALDÉS, F. E. (2007). Microcontroladores. Fundamentos y aplicaciones con PIC. 1ª Edición. Barcelona: Marcombo S. A.

PÉREZ, A. (2004). Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing 1439-2232. New York: London Springer-Verlag.

POPOVIC, D. (1999). Mechatronics in engineering design and product development. USA: Marcel Dekker, Inc.

RÍOS, LOUETH, DORADOR (2004). Uso de materiales con memoria de forma para actuar los dedos de una prótesis de miembro superior. Memorias del X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Querétaro, México.

SANDER R., HELFET D. L., PAPAS J. (2004). The salvage of grade IIIB open ankle and talus fracture. Orthop Trans.

SEYMOUR, R. (2002). Prosthetics and Orthotics: Lower Limb and Spinal. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.