

Novedades en tecnología de la rehabilitación: una revisión acerca de la interfaz cerebro-computadora

D. Santana, M. Ramírez, F. Ostrosky-Solís

RECENT ADVANCES IN REHABILITATION TECHNOLOGY:
A REVIEW OF THE BRAIN-COMPUTER INTERFACE

Summary. Introduction and aims. *In this work we review some of the options available in rehabilitation technology that are used to aid people with severe neuromuscular disorders, and which take electrophysiological activity as a source of biological signals with which to design interfaces. Development. A number of different researchers have generated a novel communication and control system that utilises the electrical activity of the brain as a signal that represents the messages or commands an individual sends to the outside world, without using the normal output pathways of the brain, such as peripheral nerves and muscles; instead, this is achieved through an artificial system that extracts, encodes and applies them, called a brain-computer interface (BCI). The electrophysiological activity for a BCI can be obtained by means of superficial or implanted electrodes, and may therefore be classified as invasive or non-invasive. Five types of brain signals have been explored for use with a BCI: visual evoked potentials, slow cortical potentials, cortical neuronal activity, beta and mu rhythms, and event-related potentials. Conclusions. Thanks to recent improvements and developments in prototypes, this technology is sure to open up new possibilities of communication and control for the affected population; it also represents a valuable field of multidisciplinary research with numerous interesting applications in areas beyond the sphere of health care. [REV NEUROL 2004; 39: 447-50]*

Key words. Brain-computer interface. Communication and control. Electroencephalogram. Electrophysiological activity. Neuro-muscular diseases. Rehabilitation technology.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha incrementado considerablemente el número de personas que desarrollan o sufren algún tipo de alteración neuromuscular o trastornos que afectan gravemente su capacidad de comunicación. En respuesta a las crecientes demandas que se han generado en el campo médico, paulatinamente se ha logrado establecer diagnósticos más precisos, optimizar tratamientos y, en general, ofrecer un mejor pronóstico a los pacientes. Muchos de los avances se deben al mayor conocimiento sobre las enfermedades neurológicas y a la incursión de la computación y la microelectrónica en el área de la salud, con lo cual ha sido posible desarrollar mejores equipos e instrumentos, tanto para el uso clínico como para la investigación. Existen alteraciones neurodegenerativas, como el síndrome de enclaustramiento (*locked-in*), causadas por enfermedades como la esclerosis amiotrófica lateral, la parálisis cerebral, las distrofias musculares, las embolias, la esclerosis múltiple, etc., o lesiones en la médula espinal. Estas alteraciones ocasionan que el enfermo pierda prácticamente todas sus capacidades motrices voluntarias; al no poder interactuar y comunicarse con el entorno, quedan aislados, en muchos de los casos con un cerebro prácticamente intacto encapsulado dentro de su cuerpo y sin posibilidades de tratamiento, ya que, lamentablemente, los avances que permiten seguir con vida en estos casos no ofrecen

ninguna posibilidad de mejoría o alternativas para recuperar algunas de las funciones más elementales. Por otra parte, los avances recientes en la ciencia y la tecnología dan una esperanza cada vez más realista de mejorar su calidad de vida, al permitir que los enfermos con alteraciones graves del movimiento tengan acceso a diversos tipos de aparatos y prótesis, muchos de los cuales pueden hoy día controlarse a través del ordenador.

El propósito de esta revisión es abordar la aplicación clínica de una tecnología de asistencia basada en la actividad electrofisiológica cerebral de pacientes con graves alteraciones neuromusculares, como una alternativa novedosa de rehabilitación asistida por ordenador, con fines de comunicación y control.

OPCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA REHABILITACIÓN DE LAS ALTERACIONES NEUROMUSCULARES

Se han emprendido diversas investigaciones con objeto de desarrollar sistemas que enriquezcan el conjunto de posibilidades de atención, no como una opción terapéutica, sino como una alternativa a la rehabilitación sin que implique una mejora física, es decir, mediante el aumento o la restitución de las funciones perdidas a través del acoplamiento de dispositivos electrónicos externos. Tal acoplamiento se realiza mediante una interfaz, lo que lleva a crear una región común a dos sistemas para el intercambio de información, en este caso entre la actividad fisiológica de una persona y un aparato externo.

FUENTES DE ACTIVIDAD BIOLÓGICA PARA INTERFACES

Un tipo particular de interfaz utiliza la actividad del sistema nervioso como fuente de actividad biológica o, mejor dicho, como fuente o señal de actividad electrofisiológica. Las señales que más se emplean son el electromiograma (EMG), el electrooculograma (EOG) y, más recientemente, el electroencefalograma (EEG).

Recibido: 18.02.04. Aceptado tras revisión externa sin modificaciones: 14.05.04.

Laboratorio de Psicofisiología y Neuropsicología. Facultad de Psicología. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF, México.

Correspondencia: Dra. Feggy Ostrosky-Solís. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Psicología. Laboratorio de Psicofisiología y Neuropsicología. Rivera de Cupia, 110-71. Lomas de Reforma. Del. Miguel Hidalgo. CP 11930, México DF, México. E-mail: feggy@servidor.unam.mx

Para la realización del artículo se contó con el apoyo parcial del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica Universidad Nacional Autónoma de México (PAPITT), N.º de proyecto IN300603-3.

© 2004, REVISTA DE NEUROLOGÍA

El tipo de actividad que se extrae define el tipo de interfaz y su finalidad; por ejemplo, el EMG se ha usado para la operación de prótesis [1] con las que se restituyen funciones motoras utilizando zonas cercanas a la ruta que controla los músculos y que no están afectadas por la lesión. El EOG se utiliza para quienes carecen del control voluntario de los músculos, excepto los oculares, y sustituye a los músculos paralizados [2,3]. Tanto el EMG como el EOG se emplean para desarrollar prototipos que restauren algunas funciones de los enfermos con una discapacidad motora grave, pero que aún tienen algún control muscular. Para quienes no poseen ningún tipo de control voluntario, la alternativa es utilizar un canal totalmente independiente de las rutas de salida neuromusculares, es decir, emplear sólo la actividad del cerebro como fuente de información que pueda traducirse como la voluntad del sujeto.

INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA

Vidal [4,5] introdujo el término interfaz cerebro-computadora (BCI por sus siglas en inglés) para designar cualquier sistema computarizado que involucrara información obtenida a partir del funcionamiento del cerebro. Posteriormente, se definió la BCI como un sistema de comunicación o control que emplea la actividad eléctrica del cerebro como una bioseñal que representa mensajes u órdenes que un individuo envía al mundo externo, los cuales no utilizan las rutas normales de salida del cerebro, como los nervios periféricos y los músculos, sino un sistema artificial que las extrae, codifica y aplica. De forma ideal, una BCI cambia la señal electrofisiológica, de un mero reflejo de la actividad del cerebro, por productos intencionales de dicha actividad, los cuales pueden ser respuestas simples, mensajes u órdenes que controlen aparatos, procesen palabras y expresen frases, con lo que se puede aumentar la interacción con el entorno.

La actividad electrofisiológica para una BCI puede obtenerse mediante electrodos superficiales o implantados, por lo que se las interfaces se pueden clasificar como invasivas y no invasivas.

Son cinco los tipos de señales del cerebro que se pueden procesar para operar una BCI: potenciales visuales evocados (PVE), potenciales corticales lentos (PCL), actividad neuronal cortical (ANC), ritmos β y μ , y potenciales relacionados a eventos (PRE) [6]. A continuación se revisan brevemente estas señales.

Potenciales visuales evocados

Los PVE se registran sobre la corteza visual y con ello se determina la posición de la mirada. Son sistemas dependientes cuya base para comunicar es la determinación de los PVE y el movimiento ocular que se detecta mediante alguna técnica de seguimiento de la mirada, con el fin de dirigir un cursor en la dirección que desee el usuario [4,5]. Otro sistema, llamado *brain response interface*, interfaz cerebro-conducta, emplea una tabla con símbolos colocados en diferentes subgrupos que cambian de color en el monitor; el sujeto los selecciona y produce alrededor de 10-12 palabras por minuto [7]. Por último, Middendorf et al [8] determinaron la posición de la mirada midiendo la frecuencia de la respuesta a la luz en la corteza visual para seleccionar botones virtuales que destellaban en una pantalla.

Potenciales corticales lentos

Los PCL son variaciones de voltaje que se generan en la corteza cerebral y cambian cada 0,5-10 s. Con un entrenamiento que puede durar semanas o meses, una persona puede aprender a controlar este tipo de actividad. La interfaz que emplea esta cla-

se de señales tiene un dispositivo con el que se puede controlar el movimiento de un cursor en una pantalla, como en el 'mecanismo que traduce el pensamiento' o *tought translation device*. Si el usuario logra una exactitud igual o superior al 75%, pasa a la segunda fase, donde puede seleccionar letras para formar palabras en un programa especial de apoyo, con un rendimiento de 0,15-3 letras por minuto [6,9].

Ritmos β y μ

Los ritmos β (13-28 Hz) y μ (8-12 Hz) son patrones eléctricos que se observan en los seres humanos en estado de vigilia y se registran en la zona sensoriomotora y en las áreas de asociación [10]. La amplitud de estos ritmos disminuye o se desincroniza al realizar un movimiento, al igual que con la intención de realizarlo; es decir, se generan tanto al realizar como al imaginar una acción motora [11]. Su control se logra por medio de entrenamiento, de manera que el usuario puede modificar la amplitud máxima del ritmo, con el objetivo de controlar un cursor en un monitor de ordenador sin realizar ninguna actividad física, simplemente 'pensando' en mover dicho cursor hacia un blanco específico. En algunas sesiones de entrenamiento, el usuario aprende por ensayo y error a modular aquellos componentes del EEG que le permitan mover el cursor hacia un blanco que se localiza en la pantalla. Esta BCI se ha utilizado para proveer al usuario de control sobre diversos dispositivos que le permitan manejar su medio, comunicarse u operar programas que se controlan con un ratón. Además, provee al sujeto de retroalimentación continua acerca de su ejecución [12].

Potenciales relacionados a eventos

Un componente de los PRE, el P300, se ha empleado para desarrollar una BCI para la comunicación. El PRE 300 consiste en una onda positiva que aparece alrededor de los 300 ms, causada por la detección de estímulos infrecuentes particularmente significativos, que se presentan en menor proporción que estímulos frecuentes, ya sea en las modalidades visuales, auditivas o somatosensoriales. Se registran sobre el cuero cabelludo, con mayor amplitud en la zona parietal; el componente de interés se identifica y reconoce mediante algoritmos por su amplitud y latencia. Para una BCI, los estímulos se presentan en una pantalla como intensificaciones semialeatorias de columnas y filas que contienen letras dispuestas en una matriz de 6×6 [13,14]. Se forman palabras prescrites seleccionando una letra cada vez, de acuerdo a un cierto número de ensayos, y se logra un rendimiento de hasta 2,3 palabras por minuto.

COMUNICACIÓN BASADA EN EL EEG

Consideramos que el EEG es una de las opciones más viables para generar interfaces destinadas al control simple de aparatos y a la comunicación, puesto que se obtiene de forma no invasiva y corresponde a funciones normales del cerebro que pueden detectarse y procesarse en tiempo real. Existe una correlación en el tiempo, bien con la realización de tareas mentales mediante estímulos estereotipados o bien con la imaginación de movimientos [10,11,13,15]. Otras técnicas, como la tomografía por emisión de positrones (PET) y la resonancia magnética funcional (RMf), también tienen correlatos funcionales, pero precisan excesivos recursos y, para fines de comunicación o control, la obtención de las características deseables no es en tiempo real.

Una BCI que utiliza el EEG como fuente de bioseñal se basa en la extracción de componentes propios del EEG continuo

que el usuario se entrena para modificar con cierto grado de fiabilidad (ritmos β y μ , por ejemplo). No dependen de paradigmas específicos o de la conservación de la vía, o pueden emplear la actividad relacionada directa y específicamente con una tarea y tiempo (P300), con la mejor relación señal-ruido que se obtiene mediante un promedio de los dos tipos de estímulos. En ambos casos es importante eliminar los artefactos que contaminen el registro, como parpadeos, movimientos oculares, de cabeza, deglución, etc. Esto supone una desventaja con respecto a los registros que se obtienen con electrodos y microelectrodos implantados, los cuales se reservan para situaciones y sujetos con complicaciones graves.

APLICACIONES

La aplicación del EEG en una novedosa tecnología de asistencia tiene como objetivo mejorar las posibilidades de comunicación y control del ambiente de las personas con alteraciones neuromusculares. Aunque la mayoría de las personas con este tipo de alteraciones puede tener acceso a dispositivos más convencionales, como sintetizadores de voz, sillas de ruedas eléctricas o prótesis [16], la tecnología está dirigida a un grupo menor de pacientes, más afectados y, por consiguiente, un tanto más relegados, que ya alcanzaron un grado grave de alteración o lo tienen como pronóstico, que padecen parálisis cerebral o sufrieron un infarto de tallo cerebral. Tener acceso a una BCI repercute definitivamente en la mejora de la calidad de vida del usuario, le provee de una mayor independencia y capacidad de interacción, reduce la depresión y aumenta su motivación [17]. Por otra parte, además de requerir de la asesoría de personal especializado, al menos en su inicio, no todos son candidatos para utilizar una BCI, ya que ésta requiere que el usuario realice las tareas adecuadamente. Lo anterior lleva a evaluar a los pacientes y realizar un seguimiento para vigilar y controlar la aparición de otras afecciones, alteraciones, uso de medicamentos y estados anímicos que pudieran interferir con su correcto funcionamiento, además del inherente mantenimiento de los componentes electrónicos. El uso de la BCI no está res-

tringido al ámbito de las alteraciones neuromusculares, puesto que se ha propuesto su empleo en otro tipo de alteraciones, como las afasias, las apraxias y el autismo [18].

El diseño y desarrollo de una BCI no excluye la posibilidad de combinar varias técnicas (P300 con ritmos β y μ , PVE, etc.) o incluso con otros sistemas con fines similares (EEG con EMG o EOG). La creación de un sistema multimodal sería más eficiente, pues aprovecharía las actividades de los músculos, los nervios, el cerebro y los ordenadores [19].

Otro aspecto importante a explorar es su alcance para usos comerciales, ya que tienen un gran potencial para aumentar las capacidades humanas de automatización de funciones y actividades, permite al cerebro desarrollar nuevas habilidades y proporcionan una gama de opciones nuevas en los sistemas computacionales, tanto convencionales como virtuales, programas interactivos, etc.

CONCLUSIONES

Una BCI permite dar asistencia a las personas que padecen graves alteraciones neuromusculares o están en proceso de sufrirlas, como es el caso de las enfermedades degenerativas progresivas; ofrece una alternativa para recuperar o ampliar las capacidades para interactuar con el ambiente, al mejorar la calidad de vida, y amortigua, en parte, los elevados costos personales, familiares y sociales. En su diseño es crucial la selección del tipo de señal que interviene como fuente de actividad electrofisiológica, con lo que se determina el método y equipo necesario para su identificación, procesamiento y aplicación, ya sea comunicación o control. Además de ser una tecnología innovadora, favorece la investigación y participación interdisciplinaria con fines científicos. Integra los conocimientos actuales y combina aspectos psicológicos, neuroanatómicos y de ingeniería.

Las aplicaciones de la tecnología que se deriva del desarrollo de las BCI tienen utilidades inmediatas que dan una solución plausible para enfermedades que tienen pocas opciones de tratamiento, además de tener valiosas implicaciones y potencial, no sólo en el área clínica, sino también en el área comercial.

BIBLIOGRAFÍA

- Hoffer JA, Stein RB, Haugland MK, Sinkjaer T, Durfee WK, Schwartz AB, et al. Neural signals for command control and feedback in functional neuromuscular stimulation: a review. *J Rehabil Res Dev* 1996; 33: 145-57.
- Chen YL, Tang FT, Chang WH, Wong MK, Shih YY, Kuo TS. The new design of an infrared-controlled human-computer interface for the disabled. *IEEE Trans Rehabil Eng* 1999; 7: 474-81.
- LaCourse JR, Hladik FC. An eye movement communication-control system for the disabled. *IEEE Trans Biomed Eng* 1990; 37: 1215-20.
- Vidal JJ. Towards direct brain-computer communication. *Annu Rev Biophys Bioeng* 1973; 2: 157-80.
- Vidal JJ. Real-time detection of brain events in EEG. *IEEE Procedures* 1977; 65 [special issue on Biological Signal Processing and Analysis]: 633-64.
- Wolpaw JR, Birbaumer N, McFarland DJ, Pfurtscheller G, Vaughan TM. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clin Neurophysiol* 2002; 113: 767-91.
- Sutter EE. The brain response interface: communication through visually induced electrical brain responses. *Journal of Microcomputer Applications* 1992; 15: 31-45.
- Middendorf M, McMillan G, Calhoun G, Jones KS. Brain-computer interfaces based on steady-stare visual evoked response. *IEEE Trans Rehabil Eng* 2000; 8: 211-3.
- Birbaumer N, Kübler A, Ghanayim N, Hinterberger T, Perelmouter J, Kaiser J, et al. The tough translation device (TTD) for completely paralyzed patients. *IEEE Trans Rehabil Eng* 2000; 8: 190-2.
- Wolpaw JR, McFarland DJ, Vaughan TM. Brain-computer interface research at the Wadsworth Center. *IEEE Trans Rehabil Eng* 2000; 8: 222-5.
- McFarland DJ, Miner LA, Vaughan TM, Wolpaw JR. Mu and beta rhythms topographies during motor imagery and actual movements. *Brain Topogr* 2000; 3: 177-86.
- McFarland DJ, Lefkowitz AT, Wolpaw JR. Design and operation of an EEG-based brain-computer interface (BCI) with digital signal processing technology. *Behav Res Methods Instrum Comput* 1997; 27: 337-45.
- Farwell LA, Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing even-related brain potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1988; 70: 510-23.
- Donchin E, Spencer KM, Wijesinghe R. The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface. *IEEE Trans Rehabil Eng* 2000; 8: 174-9.
- Pfurtscheller G, Flotzinger D, Kalcher J. Brain-computer interface – a new communication device for handicapped persons. *Journal of Microcomputer Applications* 1993; 16: 293-9.
- Vaughan TM, Wolpaw JR, Donchin E. EEG-based communication: prospects and problems. *IEEE Trans Rehabil Eng* 1996; 4: 425-30.
- Robbins RA, Simmons Z, Bremer BA, Walsh SM, Fischer S. Quality of life in ALS in maintained as physical function declines. *Neurology* 2001; 56: 442-4.
- Birbaumer N, Ghanayim N, Hinterberger T, Iversen I, Kotchoubey B, Kübler A, et al. A spelling device for the paralyzed. *Nature* 1999; 398: 297-8.
- Millán JR. Brain-computer interfaces. In Arbib, MA, ed. *Handbook of brain theory and neural networks*. 2 ed. Cambridge, MA: MIT Press; 2000. p. 1-14.

**NOVEDADES EN TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN:
UNA REVISIÓN ACERCA DE LA INTERFAZ
CEREBRO-COMPUTADORA**

Resumen. Introducción y objetivo. *En el presente trabajo se revisan algunas opciones tecnológicas de rehabilitación que se emplean para asistir a personas con graves alteraciones neuromusculares, con base en la actividad electrofisiológica como fuente de señales biológicas para diseñar interfaces. Desarrollo. Diversos investigadores han desarrollado un novedoso sistema de comunicación y control que emplea la actividad eléctrica cerebral como una señal que representa mensajes u órdenes que un individuo envía al mundo externo, pero sin utilizar las rutas normales de salida del cerebro, como los nervios periféricos y los músculos, sino un sistema artificial que las extrae, codifica y aplica, la cual se denomina interfaz cerebro-computadora (BCI). La actividad electrofisiológica para una BCI puede obtenerse mediante electrodos superficiales o implantados, por lo que éstas se pueden clasificar como invasivas y no invasivas. Se han explorado cinco tipos de señales del cerebro para operar una BCI: potenciales visuales evocados, potenciales corticales lentos, actividad neuronal cortical, ritmos β y μ y potenciales relacionados con eventos. Conclusión. Con el desarrollo y la mejora de prototipos, esta reciente tecnología promete ampliar las posibilidades de comunicación y control de la población afectada; constituye un valioso ámbito de investigación multidisciplinar con múltiples e interesantes aplicaciones en áreas fuera del campo de la salud. [REV NEUROL 2004; 39: 447-50]*

Palabras clave. Actividad electrofisiológica. Comunicación y control. Electroencefalograma. Enfermedades neuromusculares. Interfaz cerebro-computadora. Tecnología de la rehabilitación.

**NOVIDADES NA TECNOLOGIA DA REABILITAÇÃO:
UMA REVISÃO ACERCA DA INTERFACE
CÉREBRO-COMPUTADOR**

Resumo. Introdução e objectivo. *No presente trabalho são revistas algumas opções tecnológicas de reabilitação que se empregam para ajudar pessoas com graves alterações neuromusculares, com base na actividade electrofisiológica como fonte de sinais biológicos no desenho de interfaces. Desenvolvimento. Diversos investigadores criaram um sistema inovador do sistema de comunicação e controlo que emprega a actividade eléctrica cerebral como um sinal que representa mensagens ou ordens que um indivíduo envia ao mundo exterior, sem utilizar as rotas normais de saída do cérebro, como os nervos periféricos e os músculos, utilizando invés um sistema artificial que as extrai, codifica e aplica, o qual se denomina interface cérebro-computador (BCI). A actividade electrofisiológica para uma BCI pode obter-se mediante eléctrodos superficiais ou implantados, pelo que podemos classificá-las como invasivas e não invasivas. São cinco os tipos de sinais do cérebro que foram explorados para operar uma BCI: potenciais visuais evocados, potenciais corticais lentos, actividade neurológica cortical, ritmos β e μ , e potenciais relacionados com acontecimentos. Conclusão. Com a melhoria e o desenvolvimento de protótipos, esta recente tecnologia promete ampliar as possibilidades de comunicação e controlo da população afectada; constitui um valioso âmbito de investigação multidisciplinar com múltiplas e interessantes aplicações em áreas fora do campo da saúde. [REV NEUROL 2004; 39: 447-50]*

Palavras chave. Actividade electrofisiológica. Comunicação e controlo. Doenças neuromusculares. Electroencefalograma. Interface cérebro-computador. Tecnologia de reabilitação.