

Los sistemas de interfaz cerebro-computadora: una herramienta para apoyar la rehabilitación de pacientes con discapacidad motora

Josefina Gutiérrez-Martínez,* Jessica Cantillo-Negrete,*[§]
Rubén I Cariño-Escobar,[‡] David Elías-Viñas[§]

- * Subdirección de Investigación Tecnológica. Instituto Nacional de Rehabilitación.
- ‡ Departamento de Desarrollo Tecnológico. Instituto Nacional de Rehabilitación.
- § Departamento de Ingeniería Eléctrica. Sección de Bioelectrónica. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN.

Dirección para correspondencia:
Josefina Gutiérrez Martínez
Instituto Nacional de Rehabilitación. Calzada México-Xochimilco Núm. 289 Colonia Arenal de Guadalupe, 14389, Tlalpan, Ciudad de México, D.F.
E-mail: jgutierrez@inr.gob.mx

Este artículo puede ser consultado en versión completa en:
<http://www.medigraphic.com/rid>

Palabras clave: Interfaces cerebro-computadora, rehabilitación, electroencefalografía, daño neuromotor.

Key words: Brain-computer interfaces, rehabilitation, electroencephalography, neuromotor disease.

Resumen

En los últimos 15 años se han desarrollado en diversas partes del mundo nuevos sistemas para la rehabilitación de pacientes con desórdenes neuromusculares severos, como esclerosis lateral amiotrófica, infarto cerebral y lesión medular. Estos sistemas han sido denominados como interfaces cerebro-computadora. Los sistemas de interfaz cerebro-computadora buscan proveer a sus usuarios de capacidades de comunicación básicas, como operar programas de selección de palabras en una computadora o controlar una neuroprótesis. Los sistemas de interfaz cerebro-computadora descifran la intención del usuario de moverse o comunicarse a través del análisis de señales eléctricas cerebrales que incluyen potenciales corticales lentos, potenciales evocados visuales, potencial P300, y ritmos beta o mu registrados sobre el cuero cabelludo, así como la actividad neuronal cortical registrada mediante electrodos implantados. Estas señales son convertidas en comandos para operar una computadora o algún otro dispositivo por medio de un procesamiento digital efectuado en tiempo real. En este artículo se muestra un panorama general de los sistemas de interfaz cerebro-computadora, sus características y aplicaciones con mayor relevancia orientadas a mejorar la calidad de vida de los pacientes con discapacidad motora.

Abstract

On the last 15 years a new field of technological research has arisen in order to develop rehabilitation devices, they are called, brain-computer interfaces. The main goal of these systems is to improve the quality of life of people with motor disabilities because of neuromuscular disorders like, amyotrophic lateral sclerosis, brain stroke and spinal cord injury. The brain-computer interfaces systems provide these users with communication capabilities, for example, operate software to select letters in a computer or control neuroprostheses. These systems determine the user's intentions to move or communicate, through the processing of electrical brain signals, typically, slow cortical potentials, visual evoked potentials, P300 potential, beta and mu rhythms, which are recorded on the scalp, and cortical neuronal activity, recorded by implanted electrodes in the brain. The recorded signals are translated into commands to operate in real-time a computer or another device. A successful operation requires that the user codes commands into brain signals and the brain computer interfaces system decodes the signals to identify these commands. This paper presents an introduction to brain computer interfaces research, characteristics, and the main applications to improve the quality life of people with motor disabilities.

www.medigraphic.org.mx

1. Introducción

La habilidad para comunicarse con otras personas es una de las características principales del ser humano. A través de la comunicación es posible expresar ideas, deseos, sentimientos y desarrollarse en las actividades de la vida diaria. Las personas

que se encuentran paralizadas, ya sea parcial o totalmente, debido a enfermedades como la esclerosis lateral amiotrófica, infarto cerebral o lesión medular no tienen las capacidades de comunicación mencionadas.

En varias partes del mundo se están desarrollando novedosos sistemas con el objetivo de mejorar la calidad

de vida de los pacientes con discapacidad motora. Se denominan sistemas de interfaz cerebro-computadora o BCI (*Brain-Computer Interface*, por sus siglas en inglés). La idea principal es capturar las manifestaciones eléctricas, magnéticas o de otro tipo de la actividad cerebral de los deseos de comunicación del usuario y traducirlas en órdenes que son interpretadas y ejecutadas por una computadora u otro dispositivo. Hoy en día los sistemas BCI se consideran una herramienta con un enorme potencial para establecer alternativas de comunicación, restablecer funciones y ofrecer procesos de rehabilitación a pacientes con discapacidad neuromotora.

En este artículo se describen los elementos de un sistema BCI, se examinan las señales cerebrales utilizadas, los métodos de adquisición y de procesamiento que se emplean para traducir las intenciones del usuario. Después se describe una revisión concreta y breve de las aplicaciones y el estado del arte actual. Finalmente, se mencionan algunas perspectivas y conclusiones de la investigación en sistemas BCI.

2. Componentes de un sistema BCI

En la *figura 1* se puede observar el modelo funcional genérico al que podrían responder prácticamente la totalidad de los sistemas BCI,^{1,2} como se describe a continuación:

1. Adquisición y acondicionamiento de la señal. Captura la actividad eléctrica cerebral mediante electrodos (colocados en el cuero cabelludo o im-

plantados en la superficie de la corteza cerebral) y se acondiciona la señal para su procesamiento posterior mediante etapas de amplificación, filtrado y digitalización. En esta etapa se puede incluir un dispositivo de almacenamiento de datos.

2. Procesamiento de la señal. Recibe la señal eléctrica cerebral digitalizada y la transforma en comandos que entiende el dispositivo y que el usuario desea controlar. Este bloque se divide en tres etapas que actúan de forma secuencial.
 - a. Cancelación de artefactos. Se encarga de eliminar artefactos debidos a otros tipos de actividades eléctricas producto del movimiento ocular y muscular o el producido por la línea eléctrica.
 - b. Extracción de características. En esta etapa se traduce la señal cerebral de entrada en un conjunto de características correlacionado con el fenómeno asociado a la señal.
 - c. Traducción de características. Se transforma el conjunto de características en una señal de control adecuada para el dispositivo que se pretende controlar.
3. Interfaz de control. Este bloque recibe los comandos de control y realiza las acciones correspondientes en el dispositivo. Puede incorporar una pantalla que proporcione retroalimentación al usuario.
4. Estimulador. Algunos sistemas incluyen un estimulador que es manejado por la interfaz de control. Señales de estimulación son enviadas al extractor de características para sincronizar la obtención de las mismas.
5. Configuración. Permite a un operador definir y ajustar los parámetros del sistema. El operador no tiene que ser una persona técnica, sino que puede ser

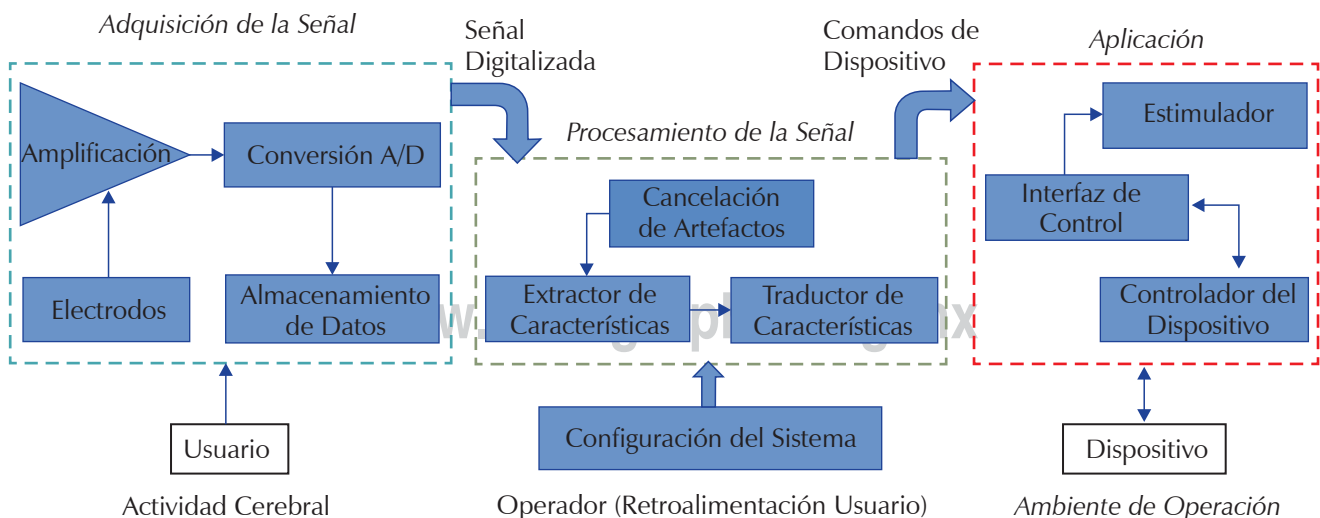


Figura 1. Elementos de un sistema de interfaz cerebro-computadora.

el propio usuario o en el caso más deseable, algoritmos automáticos que ajustan el comportamiento del sistema en función de los resultados obtenidos y la retroalimentación del usuario.

6. Dispositivo. Existe un rango ilimitado de dispositivos que pueden ser usados en un sistema BCI, como computadoras, sintetizadores de voz, neuroprótesis y otros objetos en el ambiente del usuario como la televisión o encender o apagar la luz de la habitación. Estos dispositivos usualmente son físicos, pero también pueden ser virtuales.
7. Ambiente de operación. Se refiere al ambiente físico (paredes, piso, superficies, temperatura ambiente y ruido), así como a objetos y personas en el ambiente que afectan o pueden afectar en el funcionamiento del sistema.

En seguida se describen las técnicas para registrar la actividad cerebral y las señales neurofisiológicas empleadas en el diseño de los sistemas de interfaz cerebro-computadora.

2.1. Métodos para registrar la actividad cerebral

Las señales cerebrales pueden ser detectadas mediante varias técnicas que se pueden agrupar en dos categorías: en métodos basados en obtención de imágenes, como son la resonancia magnética funcional (fMRI), la tomografía por emisión de positrones (PET) y la espectroscopia por infrarrojo cercano funcional (fNIR), y en métodos basados en el registro de campos magnéticos, como la magnetoencefalografía (MEG) y campos eléctricos que pueden ser registrados en el cuero cabelludo (electroencefalografía, EEG), en la superficie cortical (electrocorticografía, ECoG), o dentro del cerebro (potenciales de acción neuronal). La adquisición de la mayoría de estas señales no es conveniente para la aplicación de las interfaces cerebro-computadora (BCI) debido a sus requerimientos técnicos complejos, el costo y las capacidades de tiempo real limitadas. Solamente el registro de campos eléctricos ha demostrado tener valor práctico para su uso clínico. Pero tanto la ECoG como el registro de potenciales de acción neuronal tienen la desventaja de ser métodos invasivos, por lo que se deben vigilar las reacciones adversas del tejido, garantizar la seguridad del paciente y la estabilidad en registros de largo plazo.³ A pesar de que los registros de EEG de superficie son susceptibles a contaminación debido a la actividad de electrooculografía o electromiografía de los músculos craneales, es el único método que ha demostrado tener ventajas

debido a que no es invasivo, es simple y su costo es accesible. A la fecha existen pocos reportes de estudios de ECoG⁴, y de personas que han tenido electrodos implantados intracorticalmente.^{5,6} La mayoría de los BCI intracorticales han sido obtenidos de estudios en monos.⁷⁻⁹

2.2. Señales eléctricas cerebrales

Los BCI actuales pueden agruparse en cinco categorías de acuerdo con las señales neuronales que utilizan. En el primer grupo se encuentran los que utilizan potenciales evocados visuales y se denominan BCI dependientes, esto es, porque dependen del control muscular de la dirección de la vista. Los otros cuatro grupos, los que utilizan potenciales corticales lentos, potencial P300, ritmos beta, mu y potenciales de acción neuronal, son nombrados BCI independientes.

2.2.1. POTENCIALES EVOCADOS VISUALES (VEPs)

Son potenciales registrados sobre la corteza visual, derivados de una respuesta cerebral a un estímulo visual.¹⁰ Los más utilizados en sistemas BCI son los VEP de estado estable (*Steady-State Visual Evoked Potential, SSVEP*), cuya finalidad es conocer la dirección del ojo y no requieren entrenamiento previo. Para ello, se muestran en una pantalla varios botones o letras que parpadean a diferentes frecuencias, superiores a 4 Hz, de forma que el usuario debe mantener fija la mirada en uno de ellos para seleccionar el botón deseado. De esta forma se produce un SSVEP en la corteza visual, que consiste en una componente periódica de la misma frecuencia a la que parpadea el botón y una serie de armónicos secundarios.¹¹

2.2.2. POTENCIALES RELACIONADOS A EVENTOS (ERPs)

Son patrones espacio-temporales de la actividad cerebral, los cuales ocurren sincronizados a un evento, por ejemplo, después de la presentación de un estímulo, o antes de la ejecución de un movimiento.

Un ERP que se usa frecuentemente en los BCI es el llamado P300, el cual es una deflexión positiva en el EEG, aparece aproximadamente 300 ms después de la presentación de un estímulo raro o sorpresivo.¹² Para generar el P300 se le pide al sujeto que observe una secuencia aleatoria de dos tipos de estímulos. Un tipo de estímulo (el raro u objetivo) aparece ocasionalmente en la secuencia, mientras que el otro tipo de estímulo (el normal o no objetivo) aparece con mayor frecuencia. Cuando

sea que el estímulo aparece, se puede observar un P300 en el EEG. Este principio fue explorado por Farwell y Donchin en un BCI que permite escribir palabras por medio de selecciones secuenciales de símbolos colocados en una matriz.¹³

2.2.3. RITMOS SENSORIAL-MOTORES

La actividad cerebral oscilatoria ocurre en varias regiones del cerebro y cambia sus características de acuerdo con el estado de los sujetos; por ejemplo, entre estar dormido y despierto o entre concentrarse en el trabajo o relajarse. La actividad oscilatoria en el EEG se clasifica en diferentes bandas de frecuencia o ritmos. Las bandas observables típicamente son: delta (1-4 Hz), theta (4-8 Hz), alfa y mu (8-13 Hz), beta (14-30 Hz) y gamma (30-40 Hz). Entre éstos, el ritmo mu presenta un interés especial dado que la amplitud de las oscilaciones disminuye cuando se realiza o se imagina un movimiento. Los cambios en el ritmo mu son localizados sobre la corteza sensorial-motora correspondiente a la parte del cuerpo que se desea mover, y además existen estudios que demuestran que también los movimientos imaginados de diferentes partes del cuerpo pueden ser discriminadas.¹⁴ Dado que los cambios en el ritmo mu ocurren en usuarios no entrenados, éstos no son, usualmente, lo suficientemente fuertes para ser detectados por el algoritmo de clasificación, por lo que se tiene que llevar a cabo un entrenamiento con retroalimentación. Neuper y colaboradores realizaron un estudio con un paciente con debilidad motora severa con el objetivo de conocer si el paciente podía aprender a controlar su actividad cerebral. El estudio mostró que la imaginación de movimientos genera distintos patrones de EEG oscilatorios en el ritmo mu y en el ritmo beta central en pacientes con el cuerpo paralizado, no sólo en pacientes sanos.¹⁵ El grupo de investigación de Wolpaw, en Estados Unidos, utilizó un ritmo sensorial-motor para lograr el control rápido de un cursor en dos dimensiones.¹⁶

2.2.4. POTENCIALES CORTICALES LENTOS (SCPs)

Son corrimientos lentos de voltaje que se registran en el EEG colocando electrodos en la zona del vértice de la cabeza y que ocurren en un rango de frecuencias de 1-2 Hz.¹⁷ Se distinguen dos tipos: los SCP negativos, que están relacionados con la activación cortical asociada a la realización de movimientos y los SCP positivos que están relacionados con la reducción de la activación cortical.

Con entrenamiento adecuado, el sujeto puede aprender a controlar voluntariamente sus SCP. La producción de SCP positivos o negativos ha sido

explorada por Birbaumer¹⁸ para mostrar que los pacientes con ALS pueden utilizar un BCI para controlar un dispositivo al seleccionar letras de una pantalla y comunicarse así con su entorno.

2.2.5. ACTIVIDAD NEURONAL

Los potenciales de acción son considerados la unidad de información básica en el cerebro y son los que permiten la comunicación entre las diferentes neuronas. El número de potenciales de acción en un rango de tiempo (tasa de disparo) puede ser utilizado en un BCI para predecir el comportamiento del sujeto. Por ejemplo, una tasa de disparo de un conjunto de neuronas en la corteza motora y premotora puede ser utilizada para predecir la posición y velocidad de la mano, para lo cual es necesario utilizar arreglos de microelectrodos.⁶

Las señales cerebrales descritas también definen otra clasificación de los sistemas BCI, de acuerdo con la técnica de registro de la actividad cerebral, en sistemas no invasivos (los basados en EEG de superficie) y sistemas invasivos (los basados en el potencial de acción neuronal).

2.3. Métodos de procesamiento

En los sistemas BCI los algoritmos de procesamiento son utilizados para decodificar un conjunto de datos de entrenamiento y lograr clasificar las señales de un usuario específico. Los módulos de mayor relevancia de un BCI son la extracción de características y la clasificación (o traducción de características). En los siguientes párrafos se hace una revisión de los métodos de procesamiento que se utilizan típicamente en los BCI y se describen brevemente los métodos de clasificación.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Se les relaciona a los cambios en la amplitud de las señales cerebrales y ocurren sincronizadas a la presentación del estímulo o a las acciones del usuario. Las amplitudes P300 y los SCP son señales que pueden ser descritas con la ayuda de características en el dominio del tiempo. Una estrategia que se utiliza frecuentemente es separar las señales de los artefactos o ruido, para ello se aplica un filtrado pasabajas o pasabanda, seguido opcionalmente de una reducción de la tasa de muestreo de la señal. También es muy utilizada la caracterización de la señal por medio de la transformada *wavelet*, ya sea discreta o continua. Las características temporales

también son usadas en sistemas basados en potenciales de acción neuronal. Una medida que se utiliza frecuentemente es el número de espigas que ocurren en un intervalo de tiempo.¹⁹

2.3.2 CARACTERÍSTICAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Están relacionadas con los cambios en la amplitud de la actividad oscilatoria. Dado que la fase de la actividad oscilatoria no está sincronizada con la presentación del estímulo o con las acciones del usuario, se tienen que emplear técnicas que son invariantes a la evolución temporal de las señales; es decir, aplicar técnicas para evaluar su contenido espectral en una banda de frecuencia determinada. Por ejemplo, en sistemas basados en imaginación de movimientos, la potencia en las bandas de frecuencia del ritmo mu y beta en los electrodos colocados sobre la corteza sensoriomotora puede ser utilizada como característica. Para estimar la potencia espectral se han utilizado modelos auto-regresivos adaptativos,²⁰ el método de Welch,²¹ y la *wavelet* Morlet.²²

Otro tipo de características de frecuencia está relacionado con la sincronización entre señales de diferentes regiones del cerebro, lo cual puede indicar que estas regiones se comunican. Esto permite discriminar tareas cognitivas que involucran comunicación entre diferentes regiones del cerebro.²³

2.3.3 CARACTERÍSTICAS ESPACIALES

En muchos sistemas BCI se dispone de datos de más de un electrodo. En este caso, las características extraídas de varios electrodos pueden ser combinada en una forma eficiente. La meta de estos métodos es encontrar combinaciones eficientes de las características de más de un electrodo.

Probablemente la forma más simple de realizar una extracción espacial de características es utilizar solamente los electrodos que llevan información útil para discriminar un conjunto de tareas cognitivas dadas. Los electrodos pueden ser seleccionados manualmente o usando un algoritmo que seleccione automáticamente un conjunto de electrodos óptimo.

Un método de extracción de características espaciales que puede ser utilizado, además de la selección de electrodos, consiste en aplicar algoritmos de filtrado espacial; por ejemplo, el filtro laplaciano,²⁴ el algoritmo de patrones espaciales²⁵ y análisis de componentes independientes (ICA).²⁶

2.4. Métodos de traducción o clasificación de características

Después de la extracción de características es necesario clasificar las señales generadas por el usuario. Existen métodos muy simples, como ecuaciones lineales o análisis de discriminante lineal (LDA). Otro que ha resultado muy eficiente es el análisis de discriminante de Fisher (FDA), que tiene la ventaja de ser un método conceptual y computacionalmente simple, que alcanza buenos índices de exactitud en la clasificación.²⁷

Otro algoritmo de mayor complejidad que se usa muy frecuentemente en los BCI son las máquinas de soporte vectorial (SVM). La ventaja principal es que las SVM alcanzan una buena exactitud en la clasificación y que las funciones de clasificación no lineales pueden ser implementadas fácilmente utilizando *kernels*. Una desventaja es el costo computacional que implica el cálculo de los parámetros del *kernel* y que la función utilizada está diseñada para problemas con salidas binarias.

Existen muchos otros algoritmos para clasificar las señales que han sido probados en el contexto de los sistemas BCI. Para mayor información se puede consultar el trabajo de Schalk y colaboradores.²⁸

2.5. Aplicaciones

2.5.1. SELECCIÓN DE LETRAS Y SÍMBOLOS

Estos dispositivos permiten a usuarios discapacitados comunicarse con su entorno mediante la selección secuencial de símbolos del alfabeto. El primer dispositivo de este tipo mencionado en la literatura es el deletreador P30013. Otro grupo de investigadores han descrito un sistema BCI que presenta al usuario 36 letras organizadas en una matriz de seis filas y seis columnas. Cada una de las filas y columnas es iluminada en orden aleatorio. Cuando el usuario se fija en una letra, la infrecuente iluminación de ésta (dos veces por cada ciclo de 12 iluminaciones) hace que se produzca un potencial P300 cada vez que se ilumina, el cual es registrado por el sistema BCI.²⁹

2.5.2. CONTROL DOMÓTICO

El sistema BCI descrito por Gao y su equipo³⁰ permite controlar la televisión, el video o el aire acondicionado utilizando un conjunto de 48 diodos LED. Cada diodo representa una opción diferente y se ilumina a distinta frecuencia, de forma que al fijar la vista en un deter-

minado diodo se produce el potencial SSVEP con la misma frecuencia con la que éste se ilumina.

2.5.3. CONTROL DE SILLA DE RUEDAS

Schalk y colaboradores³¹ desarrollaron en Europa un sistema BCI en el que un usuario tetrapléjico podía mover una silla de ruedas en un entorno virtual sin más que pensar en mover sus pies paralizados. El sistema BCI utilizado en este caso se basaba en la detección del ritmo beta, de forma que en presencia de actividad en esa banda espectral el avatar que representa al usuario se desplaza hacia delante y en ausencia permanece parado.

Otro proyecto tecnológico³² describe el control de la silla de ruedas a través de un sistema BCI que además incorpora información del entorno captada por medio de sensores, para convertir los comandos del usuario en movimientos de la silla.

2.5.4. PRÓTESIS Y ÓRTESIS

La idea es utilizar un BCI para controlar el movimiento de una prótesis o de las extremidades utilizando una órtesis, con el fin de restaurar la función motora en pacientes tetrapléjicos o amputados. El desarrollo de neuroprótesis depende de la tasa de transferencia de información que el BCI provee. Si se utilizan registros intracorticales como señales de control, la tasa de transferencia de información es alta y pueden ser controlados brazos robóticos en 3D.³³ Si se utiliza un BCI basado en EEG, solamente se pueden realizar tareas de control simple. Por ejemplo, el sistema descrito por Pfurtscheller³⁴ utiliza ritmos sensoriomotores para controlar un sistema de estimulación eléctrica funcional (FES) colocado en los músculos de la mano y así restaurar la función de pinza en un paciente tetrapléjico (Ver Figura 2).

2.5.5. REHABILITACIÓN NEUROLÓGICA

La tecnología BCI también puede ser muy útil para ayudar a las personas que presentan desórdenes neurológicos, como la hiperactividad por falta de atención, problemas de memoria o epilepsia en la que se ha logrado reducir el número de ataques epilépticos gracias a la ayuda de un sistema BCI.³⁵

2.5.6. SISTEMAS COMERCIALES

El sistema intendiX, de la empresa austriaca g.Tec es el primer sistema BCI comercial. Consiste de un

paquete de *software* y *hardware* para escritura basada en el EEG. El sistema permite a los usuarios elegir y escribir símbolos de una colección de símbolos presentados en la pantalla, con sólo prestar atención al símbolo que el usuario desea comunicar; su funcionamiento está basado en la detección del potencial P300. Se menciona en la descripción que sólo se requieren 10 minutos de entrenamiento y que la mayoría de los usuarios sanos pueden alcanzar una tasa de escritura de cinco a 10 símbolos por minuto.³⁶

3. Conclusiones

Un sistema BCI permite a una persona con discapacidad motora interactuar con su entorno sin usar el sistema nervioso periférico, a través de codificar mensajes y comandos que se identifican al extraer características del EEG espontáneo, de potenciales evocados o de potenciales de acción neuronal. La operación de un BCI depende de la interacción del usuario, quien debe aprender a codificar su intención de realizar una tarea con el módulo de traducción y

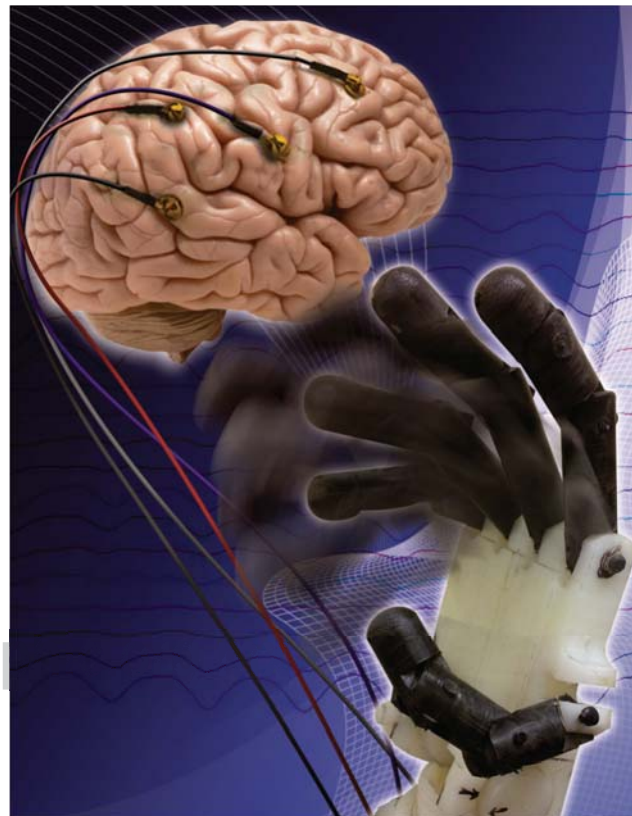


Figura 2. Representación del control de una mano protésica por sistema de interfaz cerebro-computadora.

decodificación de esas intenciones. El desarrollo de los BCI aún se encuentra en etapas tempranas. No está claro qué tan lejos pueda llegar, lo que es claro es que ello depende de un gran número de cuestiones, entre las que se incluyen las que se mencionan en seguida. Los BCI actuales aún tienen tasas de transferencia de información máxima de 10-25 bits/min. Esto limita la capacidad de que puedan ser valorados por personas con discapacidades motoras graves. Al mismo tiempo, muchas aplicaciones de la tecnología BCI, como el control de prótesis, pueden requerir altas tasas de transferencia de información.

Los avances en la investigación y desarrollo de sistemas BCI dependen principalmente de: a) crear grupos interdisciplinarios que involucren las especialidades de neurología, psicología, ingeniería, matemáticas y ciencias computacionales; b) la identificación y clasificación correcta de señales cerebrales que los usuarios sean capaces de controlar, independientemente de la actividad motora convencional; c) el desarrollo de métodos de entrenamiento para enseñar a los usuarios a manejar y mantener el control sobre sus señales cerebrales; d) seleccionar los mejores algoritmos para traducir estas señales en comandos para el dispositivo; e) la identificación y eliminación de los artefactos; f) adopción de procedimientos objetivos y precisos de evaluación del desempeño; g) identificación de aplicaciones BCI apropiadas para los usuarios y su correcta adaptación, así como h) atender factores que afectan la aceptación del usuario de esta tecnología, incluyendo facilidad de uso y cosmética.

Con un reconocimiento y el compromiso adecuado y eficaz de todos estos asuntos, los sistemas BCI podrían proveer una nueva e importante opción de comunicación y control para aquellas personas con deficiencias motoras y podrían dar también a aquellos con discapacidades un canal de control complementario o útil en circunstancias especiales.

Bibliografía

1. Mason SG, Birch GE. A general framework for brain-computer interface design. *IEEE Trans Neural Syst and Rehab Eng.* 2006; 11: 70-85.
2. Schalk G, McFarland DJ, Hinterberger T, Birbaumer N, Wolpaw JR. BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2004; 51: 1034-1043.
3. Rokni U, Richardson AG, Bizzi E, Seung HS. Motor learning with unstable neural representations. *Neuron.* 2007; 54: 653-666.
4. Leuthardt EC, Schalk G, Wolpaw JR, Ojemann JG, Moran DW. A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans. *J Neural Eng.* 2004; 1: 63-71.
5. Kennedy, PR, Bakay RAE, Moore MM, Adams KD, Goldwaithe J. Direct control of a computer from the human central nervous system. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 2000; 8: 198-202.
6. Hochberg L, Serruya MD, Fiebert GM, Mukand JA, Saleh M, Caplan AH et al. Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature.* 2006; 442: 164-171.
7. Taylor D, Tillery SI, Schwartz AB. Direct cortical control of 3D neuroprosthetic devices. *Science.* 2002; 296: 1829-1832.
8. Musallam S, Greger B, Scherberger H, Andersen RA. Cognitive control signals for neural prosthetics. *Science.* 2004; 305: 258-262.
9. Carmena JM, Lebedev MA, Crist RE, O'Doherty JE, Santucci DM, Dimitrov DF et al. Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates. *PLoS Biol.* 2003; 1: 42.
10. Wang R, Gao X, Hong B, Gao S. A practical VEP-based brain-computer interface. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2006; 14: 234-240.
11. Friman O, Volosyak I, Gräser A. Multiple channel detection of steady-state visual evoked potentials for brain-computer interfaces. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2007; 54: 742-750.
12. Sutton S, Braren M, Zubin J, John ER. Evoked-potentials correlates of stimulus uncertainty. *Science.* 1965; 150: 1187-1188.
13. Farwell LA, Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephal Clin Neurophys.* 1988; 70: 510-523.
14. Pfurtscheller G, Neuper C. Motor imagery activates primary sensorimotor area in humans. *Neurosci Lett.* 1997; 239: 65-68.
15. Neuper C, Müller GR, Kübler A, Birbaumer N, Pfurtscheller G. Clinical application of an EEG-based brain-computer interface: a case study in a patient with severe motor impairment. *J Clin Neurophysiol.* 2003; 114: 399-409.
16. Wolpaw J, McFarland DJ. Control of two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans. *PNAS.* 2004; 101: 17849-17854.
17. Wolpaw J, Birbaumer N, McFarland DJ, Pfurtscheller G, Vaughan TM. Brain-computer interfaces for communication and control. *J Clin Neurophysiol.* 2002; 113: 767-791.
18. Birbaumer N, Ghanayim N, Hinterberger T, Iversen I, Kotchoubey B, Kübler A, Perelmutter J et al. A spelling device for the paralysed. *Nature.* 1999; 398: 297-298.
19. Hoffmann U, Vesin JM, Ebrahimi, T. Recent advances in brain-computer interfaces (Invited Paper). 2007 MMSP; 1: 7-17.
20. Schlögl A, Lee F, Bischof H, Pfurtscheller G. Characterization of four-class motor imagery EEG data for the BCI-competition 2005. *J Neural Eng.* 2005; 1: 14-22.
21. Lalor E, Kelly SP, Finucane C, Burke R, Smith R, Reilly RB. Steady-state VEP-based brain-computer interface

- control in an immersive 3D gaming environment. *EURASIP J Appl Sig Proc.* 2005; 3156-3164.
22. Lemm S, Schafer C, Curio G. Probabilistic modeling of sensorimotor mu-rhythms for classification of imaginary hand movements. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2003; 51: 1077-1080.
23. Gysels E, Celka P. Phase synchronization for the recognition of mental tasks in a brain-computer interface. *IEEE Trans Neural Syst and Rehabil Eng.* 2003; 12: 406-415.
24. McFarland D, McCane LM, David SV, Wolpaw JR. Spatial filter selection for EEG-based communication. *Electroenceph clin Neurophysiol.* 1997; 103: 386-394.
25. Ramoser H, Muller-Gerking J, Pfurtscheller G. Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand movement. *IEEE Trans Rehabil Eng.* 2000; 8: 441-446.
26. Makeig S, Bell AJ, Jung TP, Sejnowski TJ. Independent component analysis of electroencephalographic data. *Adv NIPS.* 1997; 145-151.
27. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The elements of statistical learning. Data mining, inference, and prediction. 2nd edition Stanford CA: Springer; 2001.
28. Bashashati A, Fatourehchi M, Ward RK, Birch GE. A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals. *J Neural Eng.* 2007; 2: 32-57.
29. Thulasidas M, Guan C, Wu J. Robust classification of EEG signal for brain-computer interface. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2006; 14: 24-29.
30. Gao X Xu D, Cheng M, Gao SK. A BCI-based environmental controller for the motion-disabled. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2003; 11: 137-140.
31. Leeb R, Friedman D, Müller-Putz GR, Scherer R, Slater M, Pfurtscheller G. Self-paced (asynchronous) BCI control of a wheelchair in virtual environments: a case study with a tetraplegic. *J Comput Intell Neurosci.* 2007; 2007: 79642.
32. Galán F, Nuttin M, Lew E, Ferrez PW, Vanacker G, Philips J et al. A brain-actuated wheelchair: asynchronous and non-invasive brain-computer interfaces for continuous control of robots. *J Clin Neurophysiol.* 2008; 119: 2159-2169.
33. Taylor DM, Tillery SI, Schwartz AB. Information conveyed through brain-control: cursor versus robot. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2003; 11: 195-199.
34. Pfurtscheller G, Müller-Putz GR, Pfurtscheller J, Rupp R. EEG-Based asynchronous BCI controls functional electrical stimulation in a tetraplegic patient. *EURASIP J Appl Sig Proc.* 2005: 3152-3155.
35. Birbaumer N, Weber C, Neuper C, Buch E, Haapen K, Cohen L. Physiological regulation of thinking: brain-computer interface (BCI) research. *Prog Brain Res.* 2006; 159: 369-391.
36. g.Tec medical engineering. (2011). Intendix: User-Ready Brain-Computer Interface Applications. Fecha de Consulta: 1 de agosto de 2012. Disponible en: www.intendix.com