



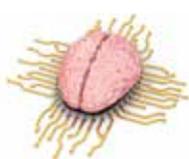
Fundamentos de las interfaces cerebro-máquina

Los sistemas conocidos como interfaces cerebro-máquina son un tipo particular de prótesis que aprovechan la actividad electrofisiológica que se origina en la corteza cerebral. Los registros de dicha actividad (por ejemplo, el electroencefalograma) son procesados con algoritmos, caracterizados y convertidos en comandos con los que es posible controlar varios tipos de dispositivos, como cursores en una pantalla, sillas de ruedas automatizadas o brazos robóticos. De esta manera, permiten a personas con discapacidades motoras severas restaurar o compensar las capacidades perdidas o ausentes, y así reestablecer las vías de interacción y comunicación con su entorno. Se trata, por lo tanto, de tecnologías asistenciales.

Este artículo busca ser una introducción al campo de las interfaces cerebro-máquina, dar una definición general, explicar el principio fundamental por el que operan, así como sus componentes principales, exponer una clasificación elemental según el método de registro utilizado, además de hacer referencia al trabajo de algunos grupos pioneros y representativos.

Introducción

La idea de que es posible acceder al sistema nervioso central de una persona y únicamente a partir de su actividad electrofisiológica permitirle comunicarse o controlar un dispositivo no pertenece a la ciencia ficción; es el principio fundamental en el campo de las interfaces cerebro-computador, también conocidas como interfaces cerebro-máquina (por brevedad, en adelante me referiré a estos sistemas como ICM). En el diseño de las ICM, la actividad electrofisiológica es registrada con diversos métodos y los registros obtenidos son procesados para ser convertidos en comandos que le permiten al usuario controlar



un sistema de comunicación o un dispositivo para realizar una acción. Se trata de tecnologías asistenciales, ya que buscan restaurar o compensar las funciones perdidas o ausentes en personas con discapacidades motoras severas y dotarlas así de nuevos canales o vías que les permitan mejorar su interacción con el entorno y con quienes las rodean.

El fundamento de las interfaces cerebro-máquina

Las ICM se fundamentan en la capacidad que tiene un sujeto para inducir variaciones –de manera voluntaria en humanos o por condicionamiento en animales– en la actividad electrofisiológica que tiene origen en su cerebro; tales variaciones están vinculadas con diferentes procesos sensoriales, motores y cognitivos. Utilizando el acervo de conocimientos en neurociencias y algoritmos avanzados de procesamiento de señales, se analizan estos registros para encontrar en ellos las variaciones producidas por el sujeto; esta operación recibe el nombre de extracción de rasgos característicos. Posteriormente, los distintos rasgos son clasificados y traducidos en distintos comandos que permiten a los usuarios comunicarse y controlar dispositivos.

Es posible afirmar entonces que el principio que permite operar a las ICM radica en descubrir una relación entre las variaciones en la actividad cognitiva –específica o no– y las variaciones que ésta provoca en los registros. Estas relaciones revelan pequeñas pis-

tas acerca de la manera en que funcionan los extensos y complejos circuitos del cerebro; en este campo en particular, estas pistas se aprovechan para el diseño de sistemas ICM.

Componentes de las interfaces cerebro-máquina

Las ICM son sistemas; esto es, están compuestas por varios elementos que interactúan. Precisamente, su diseño y funcionamiento están determinados por las características de cada componente. Existe un consenso en el campo que permite hablar de tres componentes principales e indispensables (véase la Figura 1):

- *Registro de la señal.* Se selecciona uno de los varios métodos existentes para registrar la actividad electrofisiológica del cerebro. Éste debe ser seguro para el usuario, así como entregar registros estables, duraderos y que revelen información útil.
- *Procesamiento de la señal.* Se subdivide en dos etapas. En la primera se extraen los rasgos característicos de los registros vinculados con las variaciones en la actividad cognitiva. En la segunda se traducen esos rasgos a comandos de control.
- *Dispositivo por controlar.* Es el dispositivo al que se destinan los comandos de control para que ejecute la acción deseada por el usuario. Los dispositivos pueden ir de simples a complejos, según la cantidad y complejidad de los comandos de control necesarios.

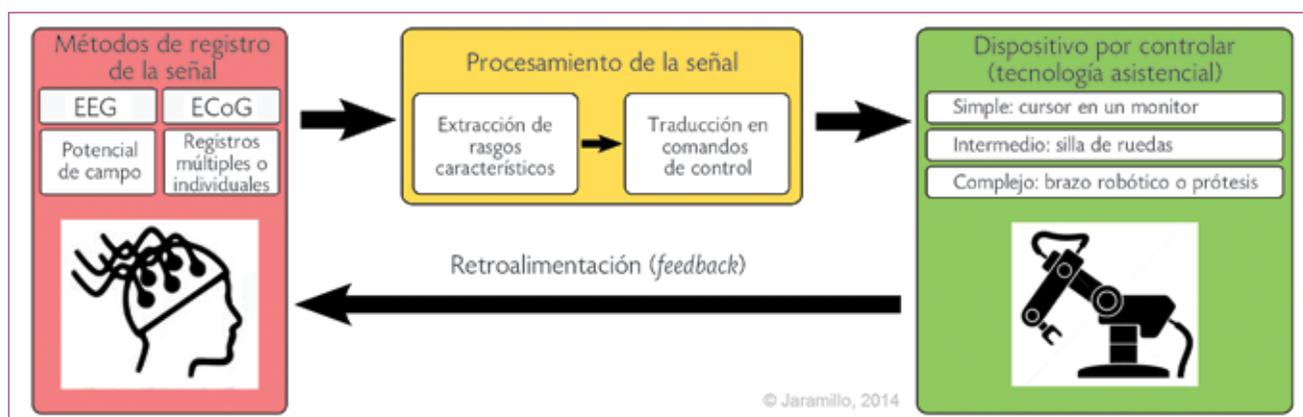


Figura 1. Componentes principales de un sistema ICM. En el diagrama se visualizan las tres etapas o componentes principales. Tan importante como las etapas es la retroalimentación al usuario por un estímulo o vía sensorial, que le muestra en tiempo real el desempeño de su actividad y le da oportunidad de modificarla.

Adicionalmente, y no menos importante, es la *retroalimentación* (aunque no aplique a todos los diseños de ICM, pero sí a una significativa mayoría). La retroalimentación permite que el usuario perciba en tiempo real el dominio que ejerce sobre sus registros y sobre los dispositivos que se deben controlar, para modificarlo o corregir errores.

Clasificación de las interfaces cerebro-máquina

Considerando un panorama introductorio, la clasificación más recurrente en el campo de las ICM se hace según el método de registro utilizado. Existen métodos no invasivos que registran la actividad electrofisiológica con electrodos colocados sobre el cuero cabelludo, como es el caso del electroencefalograma de superficie (EEG). Por otro lado, están las técnicas de registro invasivas, en las que es necesario intervenir quirúrgicamente, ya sea para colocar electrodos directamente sobre la superficie de la corteza cerebral, como es el caso de la electrocorticografía (ECoG), o electrodos al interior de la corteza que registran el potencial de campo eléctrico producido por neuronas en un pequeño volumen de tejido, o bien otros electrodos de mayor sensibilidad y que registran el disparo –o potencial de acción– de una sola neurona o de unas cuantas neuronas vecinas. Estas últimas dos técnicas son conocidas como registro de unidades individuales y registro de múltiples unidades, respectivamente.

Los distintos métodos obtienen registros de características eléctricas distintas; por lo tanto, el procesamiento que se requiere para cada una es diferente. Esas diferencias en el tipo de registro y su análisis definen el trabajo de los distintos laboratorios y centros dedicados a la investigación y el desarrollo de ICM (véase la Figura 2).

Electroencefalografía

Desde hace casi 100 años, Hans Berger, en la Universidad de Jena (Alemania), descubrió que la actividad cerebral puede ser registrada de manera no invasiva en la superficie del cuerpo cabelludo. El uso de esta técnica ha aportado mucha información para comprender el funcionamiento del cerebro, lo cual ha permitido ca-

racterizar diversos rasgos electrofisiológicos vinculados con procesos sensoriales, motores y cognitivos.

Es posible hablar de dos tipos de rasgos distintivos en EEG: los potenciales evocados y los rasgos oscilatorios. Los primeros son cambios estereotipados en la señal, producidos en respuesta a estímulos de distintas modalidades sensoriales o cognitivas, y son visibles en el dominio del tiempo. Los segundos pueden ocurrir en respuesta a estímulos, pero también a procesos mentales internos, y se pueden evidenciar mediante análisis en el dominio de la frecuencia. Ambos tipos de rasgos han sido aprovechados para el desarrollo de ICM. Por ser no invasivo, por la relativa facilidad con que se colocan los montajes de electrodos, así como por sus fuertes antecedentes teóricos y clínicos, el EEG ha sido el método de registro más utilizado para el desarrollo de ICM (véase la Figura 3).

En 1973 Jacques Vidal, del Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad de California en Los Ángeles (Estados Unidos), fue el primero en acuñar el término interfaz cerebro-computador para describir su sistema basado en potenciales visuales evocados. En dicha ICM el usuario visualizaba un tablero de lámparas prendidas e iba concentrando su atención visual en las diferentes esquinas del tablero, con lo cual se generaban los comandos “arriba”, “abajo”, “izquierda” y “derecha”; los potenciales generados por el movimiento ocular eran detectados y procesados para mover un puntero en un laberinto mostrado en un monitor.

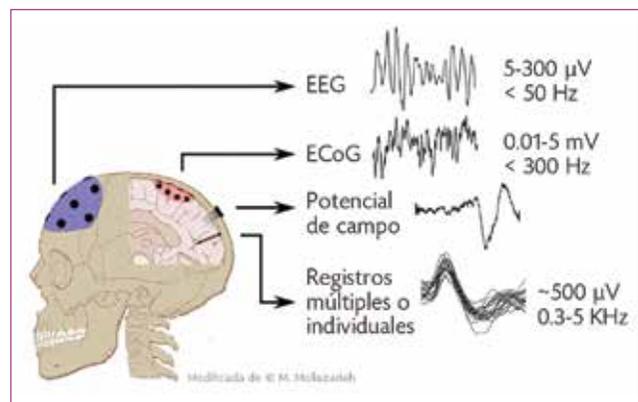


Figura 2. Métodos más utilizados en ICM para registrar la actividad electrofisiológica en la corteza cerebral. A la izquierda puede verse la colocación de cada tipo de sensor; a la derecha, las propiedades de cada tipo de registro. Las zonas en que están colocados los sensores y su tamaño son puramente ilustrativas. Imagen modificada de M. Mollazadeh, 2006.

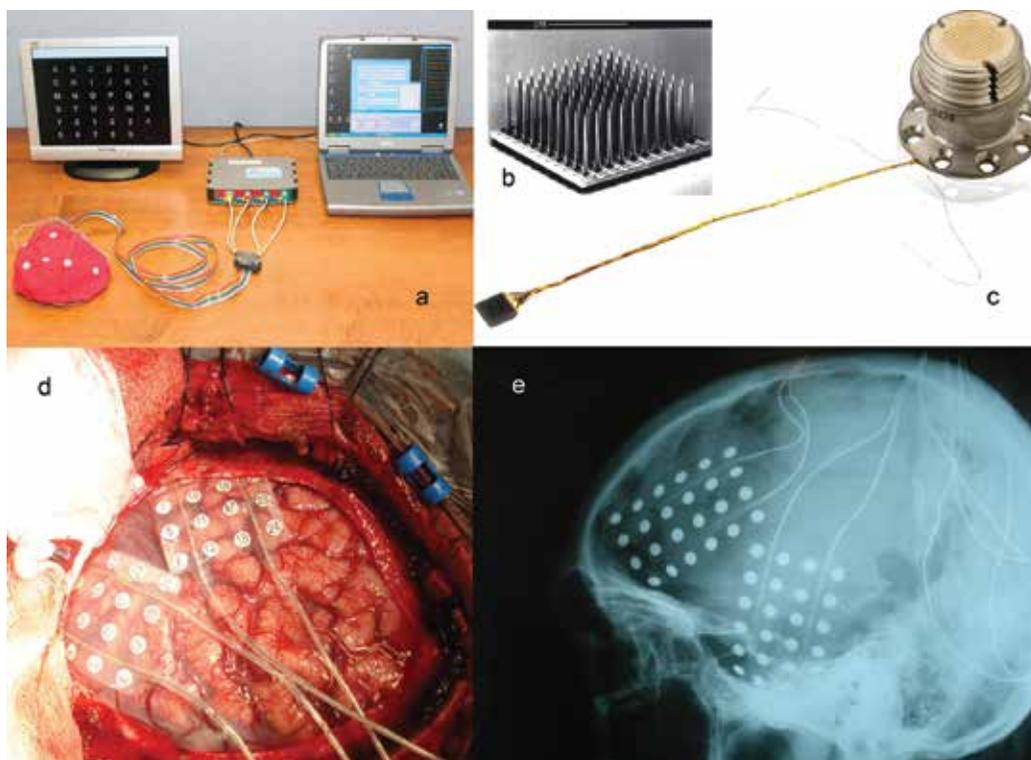
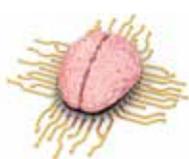


Figura 3. *a)* Elementos para una ICM para pruebas y uso comercial, tal cual se usa en el Centro Wadsworth (imagen tomada de: <http://cacm.acm.org/magazines/2011/5/107704-brain-computer-interfaces-for-communication-and-control/fulltext>); *b)* arreglo de microelectrodos tipo "Utah"; *c)* dicho arreglo con un conector tipo pedestal que se empotra al cráneo en sujetos humanos (imágenes tomadas de: <http://www.blackrockmicro.com>); *d)* colocación quirúrgica de dos mallas de electrodos para el registro de la zona epileptogénica, y *e)* placa de rayos X que muestra la posición de los electrodos colocados (imágenes tomadas por D. San Juan, 2013).

En 1988 Farwell y Donchin, del Laboratorio de Psicología y Psicofisiología en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (Estados Unidos), construyeron la primera ICM que permitía al usuario comunicarse usando un sistema de delecteo basado en potenciales evocados P300 (que aparece cuando el sujeto dirige su atención a uno de entre varios estímulos). El usuario visualizaba una matriz de 6×6 caracteres, en la cual columnas y filas brillaban intermitentemente, y concentraba su atención en el carácter de su elección; el P300 era detectado por un análisis en tiempo real que discriminaba la columna y la fila para definir la localización del carácter deseado. Así, el sujeto podía construir palabras letra por letra. A diferencia del sistema de Vidal, basado en una actividad muscular, el propuesto por Farwell y Donchin estaba basado en un proceso netamente cognitivo, como es la atención. Éste fue un paso definitivo en el diseño de ICM.

En 1991 el grupo de Jonathan Wolpaw, del Centro Wadsworth del Departamento de Salud Pública del estado de Nueva York (Estados Unidos), fue el primero en reportar –en usuarios con y sin discapacidades motoras– el uso de ritmos sensoriomotores (en la banda de frecuencias de 8 a 12 Hz) que se modulan cuando el individuo realiza o imagina realizar un movimiento. Desde los primeros experimentos en 1990, sus voluntarios se han valido del control de esos ritmos para mover cursores en una dimensión. El control de una ICM a partir de este tipo de rasgos fue el primero que requirió que el usuario realizara un cambio rápido entre dos estados mentales para provocar que el cursor cambiara rápidamente de dirección. Desde inicios del milenio, detectaron y emplearon hasta tres bandas de frecuencia diferenciadas (utilizando combinaciones de electrodos específicos) para extender el control del cursor en movimiento en dos y tres dimensiones, e incluso controlar actuadores robóticos.

Desde 1990 los investigadores del laboratorio de Niels Birbaumer, del Instituto de Psicología Médica y Neurobiología de la Conducta en la Universidad de Tubinga (Alemania), han aprovechado el control que voluntarios con cuadriplejía adquieren sobre sus potenciales corticales lentos (de origen en la región occipital del cerebro), en particular su amplitud. Gracias a ello desarrollaron un sistema de deletreo –el Dispositivo de Traducción de Pensamiento– que permite al usuario construir palabras, seleccionar entre grupos de objetos e incluso utilizar un navegador de Internet.

Por su parte, José Millán y sus colegas de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza) han trabajado durante más de una década con registros de EEG para lograr que los usuarios controlen, entre varios tipos de tecnologías asistenciales, un robot móvil configurado como silla de ruedas. Para ello distinguen diferentes estados mentales que son traducidos, por ejemplo, en los comandos “gira a la derecha”, “gira a la izquierda” y “muévete hacia delante”; un algoritmo de clasificación distingue los particulares estados mentales en cada usuario gracias a los rasgos en los registros. La navegación con este dispositivo ha demostrado ser exitosa y se realizan continuas mejoras al sistema para hacerlo más eficiente.

Electrocorticografía

A pesar de que la ECoG ha sido una herramienta de uso clínico durante décadas, los desarrollos de ICM con este tipo de registros comenzaron apenas a inicios del milenio. Como parte de la evaluación preoperatoria de cirugía de epilepsia, los pacientes con epilepsia resistente a medicamentos son candidatos para un registro ECoG prolongado en el que se coloca sobre la zona epileptogénica una o varias mallas de electrodos (véase la Figura 3); esto abre una ventana para realizar estudios neurofisiológicos en la corteza cerebral de pacientes voluntarios.

El registro de ECoG posee muchas ventajas sobre el de EEG. Los electrodos de ECoG entran en contacto directo con el tejido de la corteza, por lo que la actividad registrada –con mayor amplitud que en el EEG de superficie– corresponde prácticamente a las columnas de neuronas activas situadas bajo los electrodos (es de-

cir, tiene muy buena resolución espacial). También es mucho menos vulnerable a artefactos eléctricos provenientes del cuerpo, como parpadeos o el ritmo cardiaco.

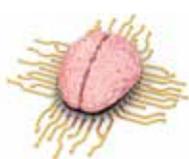
Lo más importante de este método es que permite el registro de oscilaciones de alta frecuencia (de hasta 500 Hz, según algunos investigadores); debido a que se piensa que estas oscilaciones más rápidas llevan información relevante sobre tareas cognitivas de alto nivel –por ejemplo, la planeación de una tarea motora o el procesamiento visoespacial de los eventos–, este aspecto es determinante para el diseño de ICM con mejor desempeño.

La primera ICM de ECoG con retroalimentación fue elaborada en 2004 por Eric Leuthardt, del Departamento de Cirugía Neurológica del Hospital Judío Barnes de la ciudad de San Luis en Misuri (Estados Unidos), y por Gerwin Schalk, miembro del ya mencionado Centro Wadsworth. En esta prueba se demostró que los voluntarios aprendieron, en menos de 30 minutos, a modular el ritmo en la banda gamma (de 80 a 100 Hz) registrado en áreas motoras de la corteza; y al utilizar imaginaciones motoras, controlaron el movimiento de un cursor en una dimensión.

Posteriormente, este mismo y otros grupos de investigadores extendieron las pruebas para cursores en dos dimensiones y descubrieron información específica de la codificación de los movimientos de brazos, manos y dedos. Otras pruebas de ICM exitosas realizadas por varios grupos involucran un grado de control similar mediante imaginaciones verbales registradas en el área de Broca, imaginaciones auditivas registradas en la corteza auditiva, además del control de un cursor en dos dimensiones a partir de imaginaciones motoras.

Registro de unidades individuales y registro de múltiples unidades

A inicios de la década de los setenta del siglo XX tuvo lugar un estallido de interés por la exploración de la corteza cerebral y el estudio de las funciones cognitivas desde una perspectiva neurofisiológica y conductual; varios grupos de científicos emprendieron la exploración –en primates no humanos– de la corteza motora, vinculada al control y la ejecución del movimiento. Por medio de electrodos al interior del tejido



podieron registrar la actividad de neuronas individuales, o de una pequeña cantidad de éstas, y con ello se obtuvo una cantidad de disparos o potenciales de acción de neuronas individuales que mediante algoritmos de clasificación fue posible correlacionar a varios parámetros de movimiento (cinemáticos) del brazo y de las articulaciones, así como velocidad, fuerza y *torque* (torsión). Conociendo estas relaciones, el paso siguiente consistió en la verificación de que los patrones de disparo de una pequeña población de neuronas registradas simultáneamente permitían predecir los parámetros cinemáticos del brazo y de la mano.

Para el campo de las ICM es relevante –entre otros– el experimento de 1969 de Eberhard Fetz, del Departamento de Fisiología y Biofísica de la Universidad de Washington en Seattle (Estados Unidos), que demostró que con el uso de retroalimentación visual y recompensas, los monos utilizados en las pruebas lograban modificar por condicionamiento la actividad de neuronas individuales en el área motora de la corteza. En 1999 el experimento de John Chapin y colaboradores, del Departamento de Neurobiología y Anatomía de la Escuela MCP Hahnemann de Medicina en Filadelfia (Estados Unidos), reveló que una rata puede ser condicionada para que modifique la actividad en su corteza sensoriomotora y controle así un sistema de un actuador simple con el que se suministra una recompensa. Éste fue uno de los experimentos pioneros en el diseño de ICM invasivas.

Importantes avances posteriores en las tecnologías de registro, en la capacidad de cómputo y el desarrollo de algoritmos más eficientes, propiciaron que en la primera década de este milenio varios grupos de investigación en laboratorios –principalmente en Estados Unidos– aprovecharan estos antecedentes teóricos y las mencionadas herramientas para desarrollar ICM basadas en el registro de unidades individuales y de múltiples unidades. Sus hallazgos y validaciones experimentales en monos llamaron la atención de la comunidad científica y del público en general, al demostrar que es posible condicionarlos para que controlen con sus registros neuronales un cursor en dos y tres dimensiones, así como brazos robóticos con hasta cuatro grados de libertad (véase la Figura 4).

De entre los varios grupos sobresalientes en este tipo de experimentos es necesario mencionar los dirigidos

por Andrew Schwartz, de los Departamentos de Neurobiología y Bioingeniería del Centro para Bases Neuronales de la Cognición en la Universidad de Pittsburgh (Estados Unidos); por John Donoghue, del Instituto Brown para Ciencias del Cerebro de la Universidad de Brown (Estados Unidos); y por Miguel Nicolelis, del NicolelisLab en el Centro Médico de la Universidad de Duke (Estados Unidos).

Un hallazgo interesante –que no se puede explicar del todo– y común a varios experimentos en distintos laboratorios consiste en que, después de un número variable de sesiones, las poblaciones de neuronas registradas se vuelven eficientes para controlar el movimiento del brazo robótico, pero dejan de provocar movimiento en el brazo real que en circunstancias normales es controlado por un patrón de actividad neuronal altamente similar; sin embargo, al propiciar que el mono vuelva a usar su brazo para realizar la tarea, el patrón de actividad normal reaparece sin problemas, e incluso es posible alternar entre el control de ambos tipos de brazos. Sin duda, este asombroso resultado es producto de las virtudes de la plasticidad cerebral.

Los avances y las validaciones de esta etapa en modelos animales abrieron la posibilidad a la exploración neurofisiológica de la corteza cerebral en humanos con los mismos métodos de registro invasivos; por lo tanto, desde hace casi 20 años inició la etapa de pruebas clínicas para el desarrollo de ICM, con un nivel cualitativo tentativamente superior al que puede lograrse con métodos no invasivos.



Figura 4. Mono Rhesus controlando un brazo robótico directamente con sus registros corticales para cumplir una tarea de posicionamiento. Imagen tomada de: <<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/medical-robots/060210-monkey-controls-advanced-robot-using-its-mind>>.

Los grupos de investigación que desarrollan estas ICM buscan reclutar voluntarios con discapacidades motoras severas, pero que conserven intactos los mecanismos cerebrales involucrados con el movimiento. De esos sujetos se sabe por estudios previos que conservan –aun años después de perder la capacidad de movimiento real– la capacidad de planificar e imaginar movimientos, lo cual es indispensable en estos diseños de ICM. Sin embargo, por motivos éticos, económicos y científicos, el número de voluntarios participantes en esta clase de pruebas es escaso. A pesar de eso, los descubrimientos realizados hasta hoy son asombrosos y alentadores.

Las primeras pruebas de ICM en humanos fueron reportadas en 1998 por Philip Kennedy y Roy Bakay, del Departamento de Neurología de la Universidad Emory en Atlanta (Estados Unidos). Su sistema utilizaba un electrodo (diseñado por Kennedy) con microcables enterrados en conos de vidrio rellenos de sustancias que permitían el crecimiento de conexiones neuronales en su interior, para lograr una mejor interacción con el tejido. Este electrodo se conectaba a un transmisor inalámbrico montado sobre el cráneo, el cual enviaba los registros a un receptor y a la computadora para realizar el procesamiento. Con unos cuantos canales registrados y retroalimentación visual, su voluntario, que sufría de cuadriplejía, pudo modular los disparos de las neuronas registradas para mover un cursor, seleccionar con él y elaborar sílabas para un sintetizador de voz.

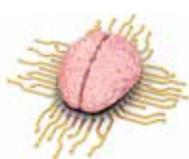
Las pruebas clínicas posteriores se diferencian por el uso de un tipo de electrodos que permite el registro de una cantidad mucho mayor de neuronas y, por lo tanto, la adquisición de un registro también mayor (difícil de transmitir inalámbricamente). Comúnmente conocidos como arreglos de microelectrodos, el modelo que se ha utilizado en humanos consiste en una matriz de puntas de silicio montadas en una base rectangular de 4×4 mm (véase la Figura 3). Por lo general, se colocan quirúrgicamente uno o más de estos electrodos para registrar simultáneamente varias regiones de la corteza motora. El primer registro con este sensor en humanos, en 2005, es de Leigh Hochberg, del Departamento de Neurología del Hospital General de Massachusetts (Estados Unidos), como parte del grupo de Donoghue (y su empresa Cyberkinetics). Su voluntario cuadripléjico

desarrolló la habilidad de controlar –con la actividad electrofisiológica vinculada al movimiento imaginario de la mano– el movimiento bidimensional de un cursor, además de poder abrir y cerrar una mano robótica. En 2012 el mismo equipo demostró que dos voluntarios en situación similar eran capaces de controlar un brazo robótico en tres dimensiones y cumplir tareas de alcanzar y sujetar con un alto porcentaje de éxito.

La prueba clínica quizá más destacada hasta ahora fue reportada en 2013 por Jennifer Collinger, del Centro Médico para Asuntos de Veteranos en Pittsburgh (Estados Unidos), y sus colaboradores del grupo de Schwartz. Tras la colocación quirúrgica de dos arreglos de microelectrodos en la corteza motora de la mano en el hemisferio izquierdo, la voluntaria –Jan Scheuermann, quien padece cuadriplejía desde hace más de diez años– desde el segundo día de entrenamiento fue capaz de realizar movimientos tridimensionales con el brazo robótico, y después de 13 semanas, con un porcentaje de éxito muy alto, pudo realizar tareas de alcanzar y sujetar objetos con la mano robótica realizando trayectorias cada vez más eficientes y en menor tiempo (véase la Figura 5). Ésta es quizá la ICM que reproduce al día de hoy, en la manera más cercana posible, la cinemática real de un brazo humano.

Interfaces cerebro-máquina en México

En nuestro país existe desde hace por lo menos 30 años una tradición de investigación en neurofisiología conductual, por ejemplo, con el reconocido trabajo de Ranulfo Romo, del Instituto de Fisiología Celular de la Universidad Nacional Autónoma de México; o mucho anterior si nos remitimos al gran Arturo Rosenblueth. Pero no es hasta fechas recientes que estalló el interés de investigadores de varias áreas y en diversos centros de investigación por el desarrollo de ICM. Esa misma novedad es la causa de que las investigaciones serias y las aportaciones a este campo realizadas en México no posean –al menos hasta ahora– gran cantidad de publicaciones y difusión. Pero gracias al arduo trabajo realizado, este escenario está cambiando rápidamente. Algunos grupos llevan hasta cinco años incursionando en este campo, con un número creciente de publicaciones y participaciones a nivel internacional.



Varios grupos en todo el país desarrollan sistemas ICM con registros EGG. Entre ellos encontramos a Verónica Medina Bañuelos y Óscar Yáñez Suárez, del Laboratorio de Neuroimagenología en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa; a Josefina Gutiérrez Martínez y Jessica Cantillo Negrete, del Instituto Nacional de Rehabilitación; a Dania Gutiérrez Ruiz, del Departamento de Bioingeniería del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados en Monterrey; a David Elías Viñas, del Departamento de Bioelectrónica del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados en Ticomán; a Carlos Reyes García y Luis Villaseñor Pineda, del área de Ciencias Computacionales del Instituto de Astrofísica, Óptica y Electrónica, en Puebla; y a varios otros que omitimos por cuestiones de espacio.

Con registros invasivos, yo y otros colaboradores realizamos en el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía el análisis de registros ECoG, adquiridos durante la ejecución de distintas tareas motoras reales e imaginarias, proponiendo algoritmos para una descodificación más eficiente para aplicaciones en ICM. En el laboratorio de Neurofisiología de Sistemas en Primates que dirige Hugo Merchant Nancy, del Instituto de Neurobiología de la Universidad Nacional Autónoma de México, en Juriquilla, Querétaro –donde desde hace varios años se estudia la codificación de la actividad neuronal motora en modelos animales–, pronto se podría poner en marcha un sistema ICM invasivo que permita a un mono controlar un brazo robótico.

Panorama

El campo de las ICM enfrenta múltiples críticas y dificultades intrínsecas. Comúnmente se cree que los métodos no invasivos carecen de la resolución espacial suficiente como para obtener con sus registros el control refinado necesario para dispositivos complejos. Por otro lado, las pruebas realizadas con ECoG están limitadas a voluntarios con epilepsia y, por lo tanto, a una ventana de tiempo muy breve en que se les realiza el monitoreo invasivo necesario para su diagnóstico, por lo cual se dispone acaso de horas –a causa del estado del paciente– para hacer la preparación y las pruebas. En el caso de los sistemas basados en electrodos colocados al interior de la corteza, se argumenta que la

variabilidad en la actividad de las neuronas registradas obliga –por razones estadísticas– a asentar el mayor número de neuronas posible. También está el problema de biocompatibilidad de los electrodos, ya que el tejido en la corteza reacciona ante elementos invasivos y va degradando la calidad del registro o impidiéndolo del todo, lo cual limita la vida útil del electrodo. Más relevante quizá es la escasa cantidad de voluntarios con que se cuenta para estas pruebas invasivas. Otra crítica común es que las ICM –de cualquier tipo– están limitadas a entornos clínicos y de laboratorio, y que su aplicabilidad a la gran variedad de tareas necesarias para la interacción de una persona sigue siendo muy limitada.

Pero estas críticas y los problemas que emergen son el síntoma saludable de un campo de investigación en expansión y desarrollo. Desde hace varios años, proveedores en varios países han puesto a la venta sistemas ICM no invasivos basados en los primeros desarrollos de los grupos mencionados; afortunadamente, hoy cientos de usuarios en condiciones de parálisis severa se valen de estos sistemas para mejorar su comunicación, en un grado elemental, pero para ellos invaluable.

Como otro ejemplo de la creciente popularidad de estos dispositivos, en la ceremonia de inauguración de la pasada Copa Mundial de Fútbol (Brasil 2014), Nicolelis y otros investigadores brasileños, del Instituto Internacional de Neurociencias en Natal, hicieron la demostración de un exoesqueleto que mediante EEG interpreta los parámetros cinemáticos de la marcha y permite a los usuarios caminar rudimentariamente (véase la Figura 5). Aunque éste es un logro ya de hace tiempo y reproducido por varios laboratorios en el mundo, es una demostración a todo el público de lo que se puede lograr con las ICM.

Asimismo, en los primeros días de marzo de 2015, investigadores del grupo de Schwartz dieron a conocer que Jan Scheuermann –con el mismo registro de electrodos que le fueron colocados en 2012– participó en un proyecto con el Departamento de Defensa de Estados Unidos en el que fue “conectada” al simulador de vuelo de un jet F-35 para controlarlo directamente con su actividad neuronal; se inaugura así una nueva era para las ICM y sus posibilidades.

Además de todas las aplicaciones asistenciales como las que mencioné arriba, los sistemas ICM basados



Figura 5. a) Miembros del equipo de Miguel Nicolelis con el usuario parapléjico portando el exoesqueleto que le permitió dar unos pasos durante la ceremonia de apertura del Mundial de Fútbol, Brasil 2014 (imagen tomada de: <<http://www.cbsnews.com/news/world-cup-2014-first-kick-made-by-mind-controlled-exoskeleton/>>); b) Jan Scheuermann acoplada a la ICM y manipulando una barra de chocolate con el brazo robótico "Hector" (imagen tomada de: <<http://www.upmc.com/media/media-kit/bci/Pages/images.aspx>>).

en registros invasivos han demostrado ser plataformas valiosas para proponer y validar hipótesis sobre la codificación de información en el cerebro y la corteza. Se espera que en un futuro inmediato se integren al campo de las ICM los avances obtenidos en varias disciplinas, reflejándose en la disponibilidad de nuevos biomateriales aplicados al registro, en la posibilidad de la transmisión veloz e inalámbrica de la alta cantidad de datos registrados y en el desarrollo de nuevos y más eficientes algoritmos para la descodificación de la actividad neuronal, entre otros. Por todas las razones citadas, el panorama para las ICM es optimista. Una intuición común entre los científicos más destacados del área es que tan sólo en un par de décadas podremos ver a personas con discapacidades motoras severas "caminando entre nosotros" auxiliadas por ICM.

Andrés Jaramillo González es ingeniero en mecatrónica por la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA) del Instituto Politécnico Nacional, con una maestría en Ciencias Cognitivas por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Actualmente realiza una estancia de investigación en el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, bajo la tutoría del neurocirujano Mario Alonso Vanegas y del neurofi-

siólogo Daniel San Juan Orta, en la que analiza la sincronización entre diferentes regiones de la corteza cerebral. También es docente interino en la UPIITA. Sus áreas de interés son los sistemas complejos y sus propiedades emergentes, la fisiología del sistema nervioso y la neuroprostética.

jaramillo.gonzalez.andres@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Hatsopoulos, N. G. y J. P. Donoghue (2008), "The Science of Neural Interface Systems", *Annual Review of Neuroscience*, 32:249-266.
- Lebedev, M. A. y M. A. L. Nicolelis (2006), "Brain-Machine Interfaces: past, present and future", *Trends in Neurosciences*, 29:536-546.
- Purves, D. et al. (eds.) (2008), *Neurociencias*, trad. D. Klajn, Buenos Aires, Editorial Médica Panamericana.
- Rudomín, P. y R. Romo (coords.) (2008), *Acople cerebro-computadora: ¿matrimonio en ciernes?*, México, El Colegio de México.
- Schwartz, A. B., X. T. Cui, D. J. Weber y D.W. Moran (2006), "Brain-controlled interfaces: movement restoration with neural prostheses", *Neuron*, 52:205-220.
- Silva Pereyra, J. (2011), *Métodos en neurociencias cognoscitivas*, México, Manual Moderno.