



# Interfaces cerebro-máquina, un encuentro entre neurociencias y robótica

♦ Andrés Jaramillo González  
Jorge Hermosillo Valadez

El imaginario contemporáneo concibe “la mente” como un producto que, solventadas ciertas circunstancias técnicas, es posible leer, guardar o traspasar. José Luis Díaz sustrae de la ciencia ficción el concepto de *cerebroscopio* y lo acota acertadamente al definir que tal artefacto —al menos en el estado actual de la ciencia y la técnica— solo permitiría el acceso a los correlatos electrofisiológicos vinculados con la actividad mental, dejando fuera de nuestro alcance la naturaleza fenomenológica y subjetiva de la mente.<sup>1</sup>

Pero esa imposibilidad de “leer la mente” no debe resultar desalentadora; los “simples” correlatos electrofisiológicos de las variaciones conductuales, cognitivas o mentales, permiten desarrollar sistemas no menos propios de la ciencia ficción: las interfaces cerebro-máquina (ICM).

Hans Berger demostró hace noventa años que las oscilaciones eléctricas descubiertas por él —en el nivel del cuero cabelludo en seres humanos— vinculadas con la actividad cerebral (el electroencefalograma o EEG), eran reactivas a la luz y otros estímulos.<sup>2</sup> En consonancia, estudios realizados a principios de los años setenta demos-

traron que las neuronas individuales en primates, los ritmos registrados en el hipocampo de perros y los ritmos sensorimotores en humanos podían ser modificados voluntariamente —por entrenamiento en humanos, por condicionamiento en animales— y, por tanto, que los rasgos electrofisiológicos de esas señales cerebrales registradas reflejaban estas modificaciones.<sup>3</sup>

Esa capacidad de controlar las señales condujo a pensar que era posible utilizar esa actividad cerebral para proyectar directamente “hacia el exterior”, sin utilizar las vías neuromusculares habituales, las intenciones de los individuos. Este es el principio fundamental en desarrollo de las ICM, que desde hace tres décadas al menos han permitido explorar y explotar los correlatos electrofisiológicos de las variaciones conductuales, cognitivas o mentales, para desarrollar tecnologías asistenciales que buscan ayudar a individuos con discapacidad motora severa a manipular dispositivos de comunicación y control.

Cómo y en qué etapas han evolucionado las ICM, son preguntas que pretendemos aclarar en el presente artículo.

<sup>1</sup> José Luis Díaz, “Cerebro, conciencia y neurotécnica”, en Pablo Rudomin y Ranulfo Romo (coords.), *Acople cerebro-computadoras: ¿matrimonio en ciernes?*, El Colegio Nacional, México DF, 2008, p. 194.

<sup>2</sup> Ernst Niedermeyer, “Historical aspects of EEG”, en Ernst Niedermeyer y Fernando Lopes da Silva (eds.), *Electroencephalography*, Lippincott Williams & Wilkins, Filadelfia, 2005, p. 5.

<sup>3</sup> Dennis J. McFarland y Jonathan R. Wolpaw, “Brain-computer interfaces for communication and control”, *Communications of the ACM*, vol. 54, núm. 5, 2011, p. 63.



### Clasificación

Para entender la evolución de las ICM es necesario explicar brevemente cómo se clasifican. La clasificación más conveniente de estos sistemas se hace en función del método de registro. Los métodos no invasivos, como el EEG, registran la actividad electrofisiológica sincronizada de un número considerable de neuronas en la corteza cerebral que es posible obtener (con muy baja resolución espacial y poco voltaje) en el nivel del cuero cabelludo.<sup>4</sup>

Por otro lado, los métodos invasivos requieren de intervenciones quirúrgicas para colocar los electrodos de registro, ya sea directamente en la superficie de la corteza cerebral, como en el caso del electrocorticograma (ECOG),<sup>5</sup> o al interior del tejido mismo, con sensores de potencial de campo o electrodos de mayor sensibilidad que registran el potencial de acción de neuronas individuales (registro de unidades individuales) o de algunas neuronas vecinas (registro de múltiples unidades).<sup>6</sup>

Cada método obtiene registros de características diferentes y, por tanto, el tipo de procesamiento requerido es distinto en cada caso. ¿Pero qué tipo de información podemos extraer de los registros de esas señales y por qué el interés en ellas?

### ICM invasivas en modelos animales

Hace cuatro décadas comenzó una era de exploración de la corteza cerebral en primates con gran-

des esfuerzos por decodificar la información que ahí se procesa. Utilizando métodos invasivos de registro y avanzados algoritmos, fue posible decodificar los parámetros cinemáticos propios del movimiento del brazo y de la mano;<sup>7</sup> es decir, que a partir de la actividad de las articulaciones se obtuvieron los patrones de disparo de las neuronas vinculadas con su movimiento. El siguiente paso en la investigación consistió en la verificación inversa, es decir, que a partir de esos patrones de disparo —de una pequeña población de neuronas registradas simultáneamente— fuera posible predecir el movimiento —o los parámetros de movimiento— de los miembros.<sup>8</sup>

Para las ICM es trascendente el experimento de Eberhard Fetz, quien demostró en 1969 que con retroalimentación visual y recompensas, ciertos primates poseen la capacidad de modificar a voluntad la actividad de neuronas individuales ubicadas en el área motora.<sup>9</sup> Tres décadas después, propiciados por avances técnicos y tecnológicos, grupos de investigadores —en Estados Unidos principalmente— aprovecharon el conocimiento ya acumulado en neurofisiología para desarrollar en modelos animales, sistemas ICM a partir del registro de neuronas individuales o de grupos de neuronas. Desde entonces, sus hallazgos han llamado poderosamente la atención de la comunidad científica y el público en general.

<sup>4</sup> Andrew B. Schwartz, X. Tracy Cui, Douglas J. Weber y Daniel W. Moran, "Brain-controlled interfaces: movement restoration with neural prosthetics", *Neuron*, vol. 52, núm. 1, 2006, p. 206.

<sup>5</sup> *Ibid.*, p. 207.

<sup>6</sup> *Ibid.*, p. 208.

<sup>7</sup> *Ibid.*, p. 211.

<sup>8</sup> *Ibid.*, pp. 211-215.

<sup>9</sup> Eberhard E. Fetz, "Operant conditioning of cortical unit activity", *Science*, vol. 163, núm. 3870, 1969, pp. 955-958.

John Chapin y sus colaboradores fueron los primeros en demostrar, en 1999, el control robótico a partir de registros cerebrales. Entrenaron ratas para controlar un mecanismo con el que se suministraban agua a sí mismas, mientras se registraba la actividad en su corteza motora. Seis animales aprendieron a controlar el mecanismo, únicamente a partir de los registros neuronales.<sup>10</sup> Casi de inmediato, varias pruebas con primates confirmaron y extendieron estos hallazgos hasta límites insospechados, realizando a la par asombrosos descubrimientos en decodificación de la actividad cortical y en plasticidad neuronal.

En 2003, José Carmena —entonces en el grupo del famoso neurocientífico Miguel Nicolelis—, junto con otros investigadores, entrenó monos para realizar una tarea de posicionamiento de un cursor en un monitor usando una palanca y para ejercer con su mano fuerza de sujeción.<sup>11</sup>

En la fase inicial, los investigadores obtuvieron registros de las neuronas en la corteza motora durante esas tareas. En la fase posterior, los monos realizaban la tarea utilizando solo los registros y sin mover los brazos.

Posteriormente, Mikhail Lebedev analizó los registros obtenidos y reportó que mientras el entrenamiento progresaba, la actividad neuronal se volvía menos representativa de los movimientos reales de la mano y más representativa del actuador robótico,<sup>12</sup> sugiriendo con este hallazgo que la actividad neuronal se había sintonizado con la tarea robótica como resultado de la plasticidad neuronal. Años después, Carmena demostraría que el grupo de neuronas registradas pueden desarrollar más de un patrón estable para controlar el brazo robótico.<sup>13</sup>

Dawn Taylor y colaboradores del grupo de Andrew Schwartz, en 2002, confirmaron resultados similares en monos, con tareas de posicionamiento de un cursor, logrando un exitoso “control cerebral”,<sup>14</sup> pero además, al analizar *off line* los registros y la cinemática, encontraron que el patrón de disparo de las neuronas que controlaban el robot se había adecuado a las cualidades (limitaciones) dinámicas del brazo robótico.<sup>15</sup> Este mismo grupo de investigadores, aprovechando su conocimiento en decodificación de la actividad neuronal, entrenaron otro par de monos para mover un brazo

<sup>10</sup> John K. Chapin, Karen A. Moxon, Ronald S. Markowitz y Miguel A. L. Nicolelis, “Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex”, *Nature Neuroscience*, vol. 2, núm. 7, 1999, pp. 664-667.

<sup>11</sup> José M. Carmena, Mikhail A. Lebedev, Roy E. Crist, Joseph E. O’Doherty, David M. Santucci *et al.*, “Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates”, *PLOS Biology*, vol. 1, núm. 2, 2003, pp. 193-208.

<sup>12</sup> Mikhail A. Lebedev, José M. Carmena, Joseph E. O’Doherty, Miriam Saksenhouse, Craig S. Henriquez *et al.*, “Cortical ensemble adaptation to represent velocity of an artificial actuator controlled by a brain-machine interface”, *The Journal of Neuroscience*, vol. 25, núm. 19, pp. 4681-4693.

<sup>13</sup> Karunesh Ganguly y José M. Carmena, “Emergence of a stable cortical map for neuroprosthetic control”, *PLOS Biology*, vol. 7, núm. 7, 2009, pp. 1-13.

<sup>14</sup> Dawn M. Taylor, Stephen I. Helms Tillery y Andrew B. Schwartz, “Direct cortical control of 3D neuroprosthetic devices”, *Science*, vol. 296, núm. 5574, 2002, pp. 1829-1832.

<sup>15</sup> Dawn M. Taylor, Stephen I. Helms Tillery y Andrew B. Schwartz, “Information conveyed through brain-control: cursor vs robot”, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 11, núm. 2, 2003, pp. 195-199.



robótico en tres dimensiones y controlar una pinza de sujeción, dejando que se alimentaran a sí mismos.<sup>16</sup>

En 2008, Nicolelis y su grupo demostraron que era posible hacer registros en regiones motoras y sensoriales de la corteza de un mono, involucrada en la generación del “programa motor para la marcha”, y decodificar los patrones para enviarlos a un robot bípedo que reproducía el movimiento.<sup>17</sup>

Reportar todos los hallazgos interesantes realizados en esta etapa experimental requeriría de gran extensión. Daremos un paso adelante diciendo que, como consecuencia de los avances y descubrimientos en modelos animales, desde hace diez años se abrieron las puertas al desarrollo de sistemas ICM con humanos, utilizando los mismos métodos de registro altamente invasivos.

### ICM no invasivos en humanos

Los primeros desarrollos de ICM en humanos fueron realizados con EEG. Al ser no invasivo y accesible, este ha sido el método de registro más utilizado en el desarrollo de ICM. Este método permite dos clases de paradigmas de estudio de la señal: los potenciales evocados y la actividad rítmica u oscilatoria.<sup>18</sup> Cada uno de ellos ha sido aprovecha-

do para el desarrollo de ICM. Mencionaremos aquí algunos logros históricamente representativos.

Jacques Vidal, quien en 1973 acuñó el término “interfaz cerebro-computadora”, construyó un sistema que aprovechaba los potenciales visuales evocados del movimiento de los ojos al mirar un conjunto de lámparas distribuidas en un tablero para obtener, por medio del análisis computacional, comandos direccionales que movieran un cursor en una terminal gráfica.<sup>19</sup>

En 1988, Farwell y Donchin reportaron el primer sistema basado en el potencial evocado P300 (potencial cognitivo que ocurre cuando el sujeto dirige su atención a uno entre varios estímulos). Este sistema permitía a sus usuarios seleccionar un carácter de una matriz en la que columnas y filas brillaban alternadamente; el algoritmo implementado permitía discernir la columna y la fila que contenían el carácter deseado gracias a la detección del potencial P300 y, de esa manera, construir palabras de un elemento a la vez.<sup>20</sup>

El prolífico grupo de Jonathan Wolpaw reportó en 1991 que era posible, en usuarios con y sin discapacidad motora, controlar sus ritmos sensoriomotores (en una banda del espectro de 8 a 12 Hz), aumentando o disminuyendo la potencia de

<sup>16</sup> Meel Velliste, Sagi Perel, M. Chance Spaling, Andrew S. Whitford y Andrew B. Schwartz, “Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding”, *Nature*, vol. 453, núm. 7198, 2008, pp. 1098-1101.

<sup>17</sup> Nathan A. Fitzsimmons, Mikhail A. Lebedev, Ian D. Peikon y Miguel A. L. Nicolelis, “Extracting kinematic parameters for monkey bipedal walking from cortical neuronal ensemble activity”, *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 3, 2009, pp. 1-19.

<sup>18</sup> Jonathan R. Wolpaw *et al.*, “Brain-computer interfaces...”, *op. cit.*, p. 781.

<sup>19</sup> Jacques J. Vidal, “Toward direct brain-computer communication”, *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, vol. 2, 1973, pp. 157-180.

<sup>20</sup> Lawrence A. Farwell y Emanuel Donchin, “Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials”, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 70, núm. 6, 1988, pp. 510-523.

esa banda por medio de movimiento y la imaginación de movimiento.<sup>21</sup> Con esta propuesta nacía un nuevo paradigma para las ICM en el cual se requiere que el usuario modifique rápidamente los rasgos de las señales, para que el dispositivo responda con rapidez. Desde entonces, este grupo ha aprovechado el uso de estos ritmos y otros para, entre muchas otras pruebas, controlar el movimiento de un cursor en dos dimensiones y en un espacio tridimensional.<sup>22</sup>

Niels Birbaumer y sus colaboradores han desarrollado varios tipos de ICM. El más reconocido es el “dispositivo de traducción del pensamiento”, que se basa en el control que los usuarios, casi todos con discapacidad motora severa, obtienen por entrenamiento de las oscilaciones conocidas como *potenciales corticales lentos*. De esta forma logran controlar un dispositivo de deletreo con base en selecciones binarias,<sup>23</sup> el cual ha sido implementado incluso para el manejo de un navegador de internet.

José Millán y sus colegas lograron clasificar en registros EEG hasta tres diferentes tipos de variables conductuales. Un algoritmo clasificador distingue esos estados por las diferencias en sus rasgos, con los que se obtienen los comandos direccionales de una silla de ruedas robotizada.<sup>24</sup>

### ICM en humanos con métodos invasivos

Por motivos éticos, económicos y científicos, el número de voluntarios para pruebas con registros invasivos es, hasta el día de hoy, escaso; a pesar de ello, los descubrimientos realizados en este ámbito son asombrosos y alentadores.

Un tipo de registro invasivo utilizado en humanos es el ECOG, similar al EEG, en principio, pero con muchas ventajas en términos de la señal registrada. Por más de cincuenta años, la técnica de ECOG ha sido una importante herramienta clínica en cirugía de epilepsia. Pacientes con epilepsia resistente a medicación son candidatos para la resección quirúrgica de la zona epileptogénica, por lo que es necesario un monitoreo con registro ECOG para delimitar esa zona y evitar comprometer funciones cognitivas.<sup>25</sup> Desde inicios del milenio se pensó en aprovechar esa ventana de tiempo breve —casi nunca mayor a cinco días— para realizar pruebas de sistemas ICM con pacientes voluntarios.

Al colocarse los electrodos directamente en la superficie de la corteza y en contacto con el tejido, se registra la actividad electrofisiológica con gran precisión espacial y mayor voltaje, además de ser menos susceptible de artefactos provenientes del cuerpo, como los parpadeos. Pero su principal virtud para el desarrollo de ICM —y para la explora-

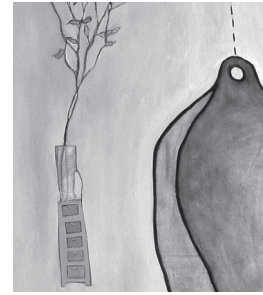
<sup>21</sup> Jonathan R. Wolpaw, Dennis J. McFarland, Gregory W. Neat y Catherine A. Forneris, “An EEG-based brain-computer interface for cursor control”, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 78, 1991, pp. 252-259.

<sup>22</sup> Dennis J. McFarland y Jonathan R. Wolpaw, “Brain-computer interface operation of robotic and prosthetic devices”, *Computer*, vol. 41, núm. 10, 2008, pp. 54-55.

<sup>23</sup> Niels Birbaumer, Nimr Ghanayim, Thilo Hinterberger, Iver Iversen, Boris Kotchoubey *et al.*, “A spelling device for the paralyzed”, *Nature*, vol. 385, núm. 6725, 1999, pp. 297-298.

<sup>24</sup> José del R. Millán, Frederic Renkens, Joseph Mourino, Wulfram Gerstner, “Non-invasive brain actuated control of a mobile robot by human EEG”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, núm. 6, 2004, pp. 1026-1033.

<sup>25</sup> Ramiro del Valle Robles y Raúl Alvarado Calvillo, “Tratamiento quirúrgico de la epilepsia”, en Alfredo Fera Velasco, Dalila Martínez de Muñoz y Francisco Rubio Donnadiu (eds.), *Epilepsia: aspectos neurológicos, médicos y sociales*, INNN, México DF, 1997, p. 197.



ción neurofisiológica en general— es que permite registrar, además del mismo rango de frecuencias que el EEG (de 0 a 40 Hz), frecuencias rápidas de hasta 500 Hz, de las cuales se ha reportado que varias bandas gama contienen información relacionada con aspectos motores, del lenguaje y de diversas funciones cognitivas.<sup>26</sup>

Como ejemplo representativo tenemos el trabajo de Eric Leuthardt y Gerwin Schalk, quienes en 2004 demostraron que sus voluntarios aprendían rápidamente a controlar los ritmos registrados en la corteza motora utilizando movimientos reales o imaginarios de la mano, y los ritmos de áreas vinculadas con la producción del habla al pronunciar o imaginar la pronunciación de una palabra, logrando con ello mover un cursor unidimensional.<sup>27</sup> Posteriormente, los mismos investigadores y otros grupos demostraron que otros procesos del habla y auditivos pueden ser decodificados en el ECOG para implementar un control unidimensional, y que es factible sustraer información detallada de varios parámetros cinemáticos del brazo y de la mano para obtener un control bidimensional.<sup>28</sup>

Otro tipo de registro invasivo en humanos está basado en el uso de sensores que penetran en el tejido de la corteza para detectar la actividad

directamente en las neuronas. Los grupos que llevan a cabo estas pruebas teniendo en cuenta la finalidad asistencial de estos sistemas, buscan voluntarios con discapacidad motora severa, pero que conserven intactos los mecanismos corticales involucrados en el movimiento; ello, porque se sabe de estudios previos que estas personas conservan —incluso años después de manifestarse su déficit— la capacidad de planificar e imaginar movimientos y, por tanto, de modificar la actividad electrofisiológica vinculada.<sup>29</sup>

Las pruebas pioneras de ICM en humanos con esta clase de registros invasivos fueron realizadas en 1998 por Philip Kennedy, quien desarrolló un electrodo con microcables enfundados en un cono de vidrio relleno de sustancias que favorecían el crecimiento neuronal para lograr una mejor interacción con el tejido. La parte externa del electrodo se conectó a un transmisor inalámbrico que, dada la baja cantidad de datos, era posible transmitir inalámbricamente a un receptor y una computadora que realizaba el análisis.<sup>30</sup> Utilizando retroalimentación visual, los usuarios con tetraplejía mostraron que podían controlar, a partir del potencial de campo registrado, un cursor para escoger en un menú de opciones y una aplicación para construir palabras.

---

<sup>26</sup> Gerwin Schalk y Eric C. Leuthardt, "Brain-computer interfaces using electrocorticographic signals", *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 4, 2011, pp. 141-143.

<sup>27</sup> Eric C. Leuthardt, Gerwin Schalk, Jonathan R. Wolpaw, Jeffrey G. Ojemann y Daniel W. Moran, "A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans", *Journal of Neural Engineering*, vol. 1, núm. 2, 2004, pp. 63-71.

<sup>28</sup> Gerwin Schalk y Eric C. Leuthardt, "Brain computer-interfaces...", *op. cit.*, pp. 146-148.

<sup>29</sup> John Donoghue, "Bridging the brain...", *op. cit.*, p. 517.

<sup>30</sup> Philip R. Kennedy, Roy A. E. Backay, Melody M. Moore, K. Adams y J. Goldwaithe, "Direct control of a computer from the human central nervous system", *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8, núm. 2, 2000, pp. 198-202.

A partir de 2008, las pruebas posteriores en humanos consideraban la necesidad, confirmada en modelos animales, de registrar un número mucho mayor de neuronas para lograr una mejor decodificación y un control más preciso. La tendencia se volcó hacia el uso de otro tipo de electrodos que permiten el contacto con un mayor número de neuronas y, por tanto, el registro de una mayor cantidad de información.<sup>31</sup> Estos electrodos se conocen comúnmente como arreglo de microelectrodos y tienen hasta 10 x 10 de pequeñas puntas de 3 mm de largo, montadas en una base de 4 x 4 mm.

El primer registro de este tipo en humanos lo reportaron en 2006 Leigh Hochberg y sus colaboradores, del grupo de John Donoghue —que denominan a su ICM *Brain Gate*—. A su primer voluntario, con lesión de la médula espinal alta, le fue colocado un solo arreglo en la región motora de la mano, y a partir de los registros neuronales se demostró que podía controlar un “cursor neural” para seleccionar en menú; además, podía abrir y cerrar una mano protésica y controlar —según los autores, en tan solo diez minutos— un brazo robótico simple en dos dimensiones.<sup>32</sup>

Posteriores pruebas de este equipo realizadas en 2012 demostraron que dos usuarios con tetraplejía pudieron controlar un brazo robótico para

realizar en tres dimensiones una tarea de alcanzar y sujetar algo, a partir de los registros de un solo arreglo de microelectrodos.<sup>33</sup> Aunque la velocidad y precisión obtenidas en los movimientos distan de los de un brazo real, es una prueba válida de que los sujetos con esos padecimientos pueden, incluso sin haber realizado movimientos reales durante años, elaborar movimientos tridimensionales de dispositivos complejos.

La prueba de ICM en humanos más destacada hasta ahora es la desarrollada por Jennifer Collinger y colaboradores del grupo de Andrew Schwartz. A su voluntario, con tetraplejía desde hace más de diez años, le fueron colocados dos arreglos de microelectrodos en el área de la corteza vinculada con el movimiento de la mano del hemisferio izquierdo; posterior a su recuperación y a partir del segundo día de entrenamiento, fue capaz de realizar movimientos tridimensionales con un brazo robótico de siete grados de libertad, y a las trece semanas realizar, con un alto porcentaje de éxito, tareas de alcanzar y sujetar objetos, mostrando una mejora continua en las trayectorias de la tarea realizadas en cada vez menos tiempo.<sup>34</sup> Recientemente, en marzo de 2015, el mismo paciente voluntario formó parte de una prueba conjunta con el Departamento de Defensa de Estados Unidos, en donde se le acopló directamente

<sup>31</sup> Mark L. Homer, Arto V. Nurmikko, John P. Donoghue y Leigh R. Hochberg, “Sensors and decoding for intracortical brain-computer interfaces”, *Annual Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 15, 2013, pp. 387-388.

<sup>32</sup> Leigh R. Hochberg, Mijail D. Serruya, Gerhard M. Fiehs, Jon A. Mukand, Maryam Saleh *et al.*, “Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia”, *Nature*, vol. 442, núm. 7099, 2006, pp. 164-171.

<sup>33</sup> Leigh R. Hochberg, Daniel Bacher, Beata Jarosiewicz, Nicolas Y. Masse, John D. Simeral *et al.*, “Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm”, *Nature*, vol. 485, núm. 7398, 2012, pp. 372-375.

<sup>34</sup> Jennifer L. Collinger, Brian Wodlinger, John E. Downey, Wei Wang, Elizabeth C. Tyler-Kabara *et al.*, “High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia”, *Lancet*, vol. 381, núm. 9866, 2013, pp. 557-564.

con el simulador de vuelo de un jet F-35, que pudo manipular con éxito.<sup>35</sup>

### **Limitaciones y potencial de las ICM**

La facultad de modificar voluntariamente la actividad electrofisiológica ha planteado muchas interrogantes y expectativas acerca del potencial que tienen las ICM para ayudar en la rehabilitación motriz y en la reintegración social de individuos con discapacidad motora severa, mediante el control de dispositivos prostéticos y de comunicación, dando lugar a todos los trabajos de investigación, primero en fase experimental y, recientemente, en fase clínica, de los que hablamos ya.

A pesar de todas estas bondades y beneficios, las ICM están sujetas a varias limitaciones, problemáticas y críticas. Se piensa que los registros no invasivos no poseen la capacidad para entregar un control refinado y elegante, como lo requerirían dispositivos más complejos. Las pruebas en EEG están limitadas hasta ahora a entornos clínicos y tiempos muy limitados. Las invasivas con arreglos de microelectrodos aún no han demostrado del todo que los registros puedan ser dura-

bles, confiables e inofensivos para los voluntarios; es necesario seguir trabajando en la biocompatibilidad de los materiales de registro. Pero quizá la crítica más aguda a todos los tipos de ICM es que están limitados a entornos clínicos o de laboratorio, y que en su estado actual no proveen el control rápido, preciso y confiable, necesario a la gran variedad de tareas requeridas para facilitar la vida de una persona aquejada por padecimientos motores severos.

No obstante, esas observaciones son síntoma saludable de un campo que se encuentra en pleno desarrollo. En tan solo veinte años, los avances y logros obtenidos son innumerables. Los primeros sistemas ICM de deletreo y selección desarrollados hace veinte años con EEG ya están disponibles comercialmente y permiten a cientos de usuarios con impedimentos motores mejorar, en grado mínimo pero invaluable, su calidad de vida.

Dado el panorama optimista que arrojan todos los descubrimientos citados, es probable que en otros veinte años podamos ver logros igual de impresionantes que por ahora, solo pertenecen al dominio de la ciencia ficción.

---

<sup>35</sup> Abby Phillip, "A paralyzed woman flew an F-35 fighter jet in a simulator – using only her mind", *The Washington Post*, 3 de marzo de 2015, <http://wapo.st/17OxGZk>, consultado en junio de 2015.