



Interfaces cerebro-máquina: hacia una nueva simbiosis

Brain-machine interfaces: towards a new symbiosis

Rubén F. Hernán-Gómez

Servicio de Neurología, Hospital Universitario Puerta de Hierro de Majadahonda,
Majadahonda, Madrid, España

Resumen

El presente artículo desarrolla una revisión narrativa sobre interfaces cerebro-máquina: puentes digitales entre la corteza cerebral y dispositivos electrónicos, destinados a la rehabilitación o reemplazo de diversas funciones neurológicas gravemente deterioradas. Mediante un recorrido por la historia de su desarrollo, la estructura y funcionamiento de sus principales componentes, estudios clínicos de relevancia, indicaciones médicas, capacidad de integración con la inteligencia artificial y los marcos regulatorios que les atan, el lector puede adquirir una perspectiva completa del estado de viabilidad actual de estas interfaces. En áreas como los trastornos de la comunicación y déficits motores, los resultados publicados hasta la fecha son prometedores (más modestos en lo relativo a alteraciones de la sensibilidad), si bien estos complejos sistemas permanecen en fases iniciales de desarrollo. A fin de que los pacientes puedan beneficiarse de dicha biotecnología de vanguardia en la práctica clínica habitual, será necesario llevar a cabo rigurosos ensayos clínicos a gran escala, capaces de determinar su efectividad real y potencial de generalización.

Palabras clave: Interfaz neuronal. Interfaz cerebro-máquina. Interfaz cerebro-computadora. Neurotecnología. Inteligencia artificial.

Abstract

The following article encompasses a narrative review on brain-machine interfaces: digital links between the cerebral cortex and electronic devices, aimed for the rehabilitation or replacement of severely impaired neurological functions. Through a concise review of the history of their development, the structure and functioning of their main components, relevant clinical studies, medical purposes, artificial intelligence integration capabilities, and the regulatory frameworks that concern them, comprehensive understanding of the current state of viability of these interfaces is obtained. In areas such as speech disorders and motor deficits, the evidence available to date is promising (not as significant when it comes to impaired sensitivity), although these complex tools are not fully developed yet. For patients to benefit from such cutting-edge interfaces in routine clinical practice, their actual effectiveness and potential for generalization must be assessed by carrying out standardized large-scale clinical trials.

Keywords: Neural interface. Brain-machine interface. Brain-computer interface. Neurotechnology. Artificial intelligence.

Correspondencia:

Rubén F. Hernán-Gómez

E-mail: rubenhernan.neuro@gmail.com

Fecha de recepción: 04-11-2024

Fecha de aceptación: 18-11-2024

DOI: 10.24875/KRANION.M24000085

Disponible en internet: 11-12-2024

Kranion. 2024;19:99-109

www.kranion.es

INTRODUCCIÓN: CIENCIA LÍMITE

La idea de manipular el entorno que nos rodea con el pensamiento no es en absoluto ajena a la historia del ser humano. Diversas referencias, principalmente implícitas, al fenómeno de control de la materia con el poder de la mente o a la transferencia directa del contenido de esta sin mediación de la palabra (con la finalidad de ejercer una reacción externa) impregnán los mitos y leyendas de las civilizaciones antiguas, e incluso los escritos sagrados de diversas religiones mayoritarias¹. Sin embargo, no sería hasta tiempos recientes cuando la fascinación occidental por el espiritismo propia del siglo xix y las investigaciones en parapsicología llevadas a cabo durante el siglo xx, de la mano de la industria literaria y cinematográfica, popularizarían el término *telekinesis* (acuñado por el escritor e «investigador psíquico» Alexander Aksakov *circa* 1890) para referirse a la manipulación de objetos sin la utilización de medios físicos. Fue posteriormente englobado bajo la idea de *psicokinesis*, un concepto que ha dado pie a todo tipo de especulaciones incluso en el ámbito de la física cuántica². El ser humano sufre la pulsión de interactuar con el mundo que le rodea por medio del pleno ejercicio de sus funciones neurológicas, en una época en la que la capacidad de desenvolverse con soltura en entornos digitales cobra más relevancia que nunca³. En ese límite donde la medicina y la ciencia ficción entran en contacto, las interfaces cerebro-máquina (ICM) surgen como soluciones innovadoras para devolver la capacidad de interacción a aquellas personas que se han visto privadas de esta a causa de lesiones neurológicas de diversa índole⁴. Un modo de interacción ante todo heterodoxo y, de la forma más inesperada, científicamente telequinético.

UN ÁPICE DE HISTORIA

La técnica de electroencefalografía (EEG) inventada por Hans Berger permitió registrar la actividad eléctrica cerebral de un ser humano por primera vez en el año 1924. Por otro lado, el primer intento de estimulación eléctrica del sistema nervioso con la finalidad de restituir una función neurológica (en este caso la audición) tendría lugar unos 30 años después. En 1973, el ingeniero y científico Jacques Vidal acuñó el término «interfaz cerebro-computadora», tras lograr transformar actividad cerebral de electroencefalografía en señales interpretables por un ordenador. El principal avance en años posteriores fue el desarrollo de interfaces no invasivas (no quirúrgicas). En 1997 la *Food and Drug Administration* (FDA) aprobó la utilización de técnicas de estimulación cerebral profunda (ECP) para el tratamiento sintomático de determinados trastornos del movimiento. A comienzos del siglo xxi surgen publicaciones que demuestran la posibilidad de controlar dispositivos externos complejos mediante este tipo de interfaces, siendo en el momento actual uno de los campos de la neurotecnología que más desarrollo está

experimentando^{3,4}. Las compañías más relevantes de la industria tecnológica (Neuralink de Elon Musk, Reality Labs de Meta...) centran sus esfuerzos en crear aplicaciones comerciales para dicha tecnología⁵.

¿QUÉ SON LAS INTERFACES CEREBRO-MÁQUINA?

Al conjunto de tecnologías que sirven de enlace entre distintas estructuras del sistema nervioso (central, periférico, autónomo...) y dispositivos electrónicos se les denomina interfaces neuronales. Dentro de este grupo se hallan las ICM, sistemas híbridos capaces de registrar la actividad eléctrica cortical en tiempo real y transformarla en datos interpretables por maquinaria de diverso tipo, con la finalidad de manipularla, prescindiendo parcial o totalmente de determinadas vías del sistema nervioso y de la musculatura dependiente de estas^{3,6,7}. Es fundamental tener presente que el ser humano es parte de la interfaz en sí misma⁸. ICM es un concepto amplio que engloba, entre otras, a las interfaces cerebro-computadora (término utilizado con frecuencia como equivalente de ICM, si bien el objetivo final de la interacción no tiene por qué ser exclusivamente controlar un ordenador). Existe cierta disparidad de criterio en torno al lugar que deben ocupar las técnicas de neuromodulación y la ECP en esta clasificación^{8,9}, pudiéndose argumentar como diferencia fundamental con las ICM que las primeras obedecen a una serie de parámetros preestablecidos y fijos, no siendo capaces de interpretar información en tiempo real para regular de forma autónoma la necesidad, calidad o intensidad de la acción que pueden ejecutar. En esta revisión, por lo tanto, serán consideradas como posibles elementos formes de dichas interfaces, pero no como ICM en sí mismas. Cabe destacar que los rápidos avances en esta área biotecnológica no se han visto correspondidos por una unificación de la terminología más utilizada en estudios; una cuestión que debería ser abordada prioritariamente por la comunidad científica e instituciones correspondientes para evitar ambigüedades y riesgos por insuficiente regulación de cara al futuro próximo¹⁰.

COMPONENTES DE UNA INTERFAZ CEREBRO-MÁQUINA

Entre los elementos imprescindibles que conforman una ICM encontramos los siguientes: en primer lugar el córtex cerebral, en segundo lugar un dispositivo capaz de registrar o inferir la actividad cortical derivada de procesos mentales, en tercer lugar una unidad de procesamiento de señales (implantable o externa, encargada de eliminar ruido/artefactos y de traducir las señales en código interpretable) y por último, un dispositivo electrónico efector. Los elementos segundo y tercero pueden estar contenidos en un único *hardware*, siendo el ejemplo más simple un ordenador portátil. El último elemento puede interactuar directamente (de forma física o digital) con el entorno o

bien desencadenar la activación de partes corporales del paciente para permitir dicha interacción^{4,6,11}. Como veremos más adelante, que una ICM conste de dichas partes no quiere decir que el orden de activación de estas siga siempre el sentido cerebro → máquina, se puede invertir en aplicaciones concretas de esta tecnología^{9,12,13}. Por otro lado, la interfaz puede verse complementada por distintos tipos de accesorios como sistemas de neuromodulación, de ECP o de *neurofeedback*⁸. Esto último supone que el flujo de información puede ser bidireccional, dando lugar a una «ICM de bucle cerrado», en las que el último elemento de la secuencia vuelve a ser biológico (la corteza cerebral, una región concreta del sistema nervioso autónomo, nervios periféricos y sus receptores...)^{4,9}. Precisamente son las interfaces de bucle cerrado las más prometedoras por su efectividad en aplicaciones médicas a estudio¹⁴.

¿CÓMO FUNCIONA UNA INTERFAZ CEREBRO-MÁQUINA?

Todo comienza en la mente del sujeto (animal o humano), que debe ser capaz de generar determinados patrones de actividad cortical deseada para su futura captación e interpretación. En épocas tempranas era muy común entrenar a los pacientes para ser capaces de potenciar su respuesta cortical eléctrica a estímulos externos concretos, por lo que las interfaces partían del análisis de la amplitud y latencia de señales como P300 o los potenciales evocados visuales en estado estable (SSVEP)⁷. El primero es un potencial de EEG que se detecta 300 ms tras presentarse un estímulo que capta la atención de la persona, mientras que los SSVEP son señales que aparecen ante la exposición a estimulación lumínica de frecuencia fija. Ambos son fácilmente reconocibles, si bien aportan información escasa y el proceso de entrenamiento de los sujetos requiere de un largo periodo de tiempo. Su utilidad se ve limitada a seleccionar «mentalmente» entre un grupo reducido de acciones en un monitor electrónico que han sido previamente establecidas por los investigadores y diseñadores del estudio^{4,6,7}.

Con el paso del tiempo la imaginería motora se ha ido abriendo paso en el mundo de las ICM. Esta técnica consiste en imaginar la realización de acciones (generalmente movimiento de una extremidad, pero también la expresión de lenguaje hablado o escrito, entre otros) sin llevarlas a cabo físicamente. Analizando los cambios en la actividad cortical que acontecen durante la simulación de distintas tareas es posible inferir, de forma aproximada, la intencionalidad del usuario tras varias sesiones de entrenamiento. Entre sus ventajas destaca su gran adaptabilidad a situaciones clínicas diferentes, pues no requiere que el sujeto sea capaz de llevar a cabo la acción real; sin embargo, pueden producirse errores a la hora de reconocer patrones (a tener en cuenta que las tareas reales e imaginadas pueden activar áreas corticales muy similares) y existe un mayor riesgo de fatiga mental, con

la consecuente necesidad de descansos programados durante las sesiones⁶.

Sea cual sea el paradigma elegido para la ICM, para que un *software* sofisticado y un *hardware* específico permitan en última instancia la consecución de la acción deseada, es crucial la capacidad de colaboración del sujeto humano y el poder de adaptabilidad de la «máquina»⁷. Este proceso puede optimizarse mediante la recepción de *feedback* en tiempo real, pero es sabido que un porcentaje significativo de pacientes pueden ser incapaces de desenvolverse adecuadamente en la utilización de ICM, lo que en inglés ha venido a denominarse *BCI-illiteracy* («sin aptitud para las ICM»), aunque su origen no siempre esté en el usuario¹⁵.

TIPOS DE INTERFAZ CEREBRO-MÁQUINA

Existen diversas formas de clasificar las ICM: la tabla 1 lo hace atendiendo al tipo de plataforma que rige todo el funcionamiento de las interfaces no invasivas (aquellas que no requieren intervención quirúrgica alguna)^{6,11,16,17} y la tabla 2, a continuación, hace lo propio con las interfaces invasivas (aquellas en las que algunos componentes son implantados quirúrgicamente en el paciente)^{6,11,17-20}. En el campo de la investigación biomédica, la utilización de estas últimas es cada vez más frecuente. Algunos autores consideran que existe una tercera categoría de ICM, las «semiinvasivas», siendo este argumento discutible, pues implican la necesidad de neurocirugía en todo caso⁶.

INTERFAZ EN ACCIÓN

En los últimos años, los avances en el desarrollo de ICM están dando lugar a toda clase de aplicaciones potenciales, principalmente encaminadas a la recuperación de funciones neurológicas comprometidas (interfaces de rehabilitación) y a la creación de vías alternativas para suplir daños irreversibles difícilmente rehabilitables a nivel del sistema nervioso (interfaces de asistencia)²¹. Estrictamente, se puede hablar de un tercer subtipo de interfaz diseñada para elevar la precisión y adaptabilidad de tratamientos sintomáticos que se administran mediante dispositivos electrónicos (interfaces terapéuticas). Estos tres objetivos se llevan a cabo por medio de la comunicación con *gadgets* específicamente diseñados: la tabla 3 contiene una relación de aquellos que se emplean con mayor frecuencia en función del tipo de ICM utilizada (algunos de ellos en etapas tempranas de implementación)^{6-8,17,22}. Múltiples estudios han sido diseñados con la finalidad de mejorar la calidad de vida de pacientes que padecen enfermedades con elevada carga de discapacidad secundaria: enfermedades de motoneurona, ictus isquémico, lesiones traumáticas intracraneales, síndrome de enclaustramiento, trastornos del movimiento, lesiones medulares, distrofias musculares, pérdida de extremidades por necesidad de

TABLA 1. Clasificación de las interfaces cerebro-máquina no invasivas

Adquisición de señales	Ventajas	Inconvenientes	Aplicación principal
EEG (electrodos secos generalmente)	Portabilidad, facilidad de uso, resolución temporal de calidad	Resolución espacial pobre, muy susceptible a artefactos de diversa índole. Precisa recolocación y calibración frecuente	Investigación clínica Industria del entretenimiento y <i>marketing</i>
MEG (registro de campos magnéticos neuronales)	Alta resolución temporal y espacial	Nula portabilidad, manejo complejo (requiere personal especializado), susceptible a artefactos electromagnéticos, elevado coste	Investigación clínica
RMf (análisis de cambios del flujo sanguíneo cerebral)	Muy alta resolución espacial (hasta regiones profundas)	Nula portabilidad, baja resolución temporal, manejo complejo, susceptible a artefactos electromagnéticos, elevado coste	Investigación clínica
fNIRs (detección de cambios en oxigenación sanguínea cerebral)	Cierta portabilidad Resolución espacial de muy alta calidad	Baja resolución temporal, dificultad de registro de señales (leve intensidad de estas), elevado coste	Investigación clínica Entretenimiento y <i>marketing</i> (fases iniciales)
fUS (análisis de variaciones del flujo sanguíneo cerebral)	Portabilidad relativa, alta resolución espaciotemporal	Técnica compleja, muy sensible a artefactos de movimiento, de contacto y anatómicos	Investigación clínica

EEG: electroencefalografía de superficie; fNIRs: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; fUS: ecografía funcional mediante Doppler ultrarrápido;

MEG: magnetoencefalografía; RMf: resonancia magnética funcional.

Adaptada de Peksa et al., 2023⁶, Mitchell et al., 2023¹¹, Zheng et al., 2023¹⁶ y Khan et al., 2024¹⁷.

TABLA 2. Clasificación de las interfaces cerebro-máquina invasivas

Adquisición de señales	Ventajas	Inconvenientes	Desarrollos destacables
ECoG	Elevada resolución temporal y espacial. Excelente calidad de señal	Riesgos derivados de neurocirugía Deterioro de sensores con el paso del tiempo (biocompatibilidad, respuesta inmunitaria, reacción cicatricial glial, sofisticación de materiales necesarios...)	Técnicas mínimamente invasivas: – Electrodos de tipo «carpa»: inyectables (mediante jeringuilla), desplegables y biodegradables – Electrodos tipo «origami»: desplegables y replegables a través de orificio de 6 mm en la duramadre
iEEG	Resolución espacial, temporal y calidad de señal extremadamente alta, pudiendo captar actividad de grupos selectos de neuronas	Riesgos derivados de neurocirugía Deterioro de sensores con el paso del tiempo	Neuralink (ensayos clínicos)
Stentrode (stent-electrode)	Calidad de señal y resolución temporal muy elevadas. La vía endovenosa presenta menor agresividad que la neuroquirúrgica Basada en técnicas ampliamente conocidas	Menor resolución espacial que iEEG Potencial riesgo de trombosis/ migración del stent	Synchron (ensayos clínicos)

ECoG: electrocorticografía; iEEG: electroencefalografía intracortical (incluyendo varios tipos de redes de electrodos implantables, matrices de microelectrodos, microhilos...).

Adaptada de Peksa et al., 2023⁶, Mitchell et al., 2023¹¹, Khan et al., 2024¹⁷, Jiao et al., 2023¹⁸, Coles et al., 2024¹⁹ y Bae et al., 2024²⁰.

amputación, etc. De forma paralela, estas interfaces han ido adquiriendo capacidades «colaterales» derivadas de mejoras tecnológicas progresivas, que no formaban parte de su objetivo inicial, y que se discutirán más adelante^{6,7,8,11}. El *neurofeedback* es la capacidad de aprender a regular voluntariamente parámetros biológicos medibles que habitualmente obedecen a procesos inconscientes.

Dado el carácter fundamentalmente sensitivo de la retroalimentación que sustenta este aprendizaje (ya sea mediante estímulos hapticos, visuales, auditivos, electromagnéticos o híbridos), el sujeto debe preservar la capacidad de interpretar dichos estímulos para poder beneficiarse de este^{9,12}. Su inclusión en ICM ha supuesto una mejoría significativa en términos de efectividad con respecto a te-

TABLA 3. Dispositivos electrónicos más utilizados según finalidad principal de una ICM

Dispositivo	ICM-A	ICM-R	ICM-T
Comunicador	✓		
Equipo de realidad extendida	✓	✓	
Domótica inteligente	✓		
ECP y tDCS			✓
Estimulación cortical	✓	✓	
Estimulación del nervio vago			✓
Estimulación eléctrica epidural medular	✓	✓	
Estimulación eléctrica funcional (SNP)	✓	✓	
Exoesqueleto robótico	✓	✓	
Ordenador/smartphone/tablet (software)	✓		
Ortesis inteligente		✓	
Prótesis robótica	✓		
Robot de asistencia	✓		
Silla de ruedas eléctrica	✓		
Sistema de <i>neurofeedback</i>	✓	✓	

ECP: estimulación cerebral profunda; ICM-A: interfaz cerebro-máquina de asistencia; ICM-R: interfaz cerebro-máquina de rehabilitación; ICM-T: interfaz cerebro-máquina con finalidad terapéutica; SNP: sistema nervioso periférico; tDCS: estimulación transcraneal de corriente directa.

Adaptada de Peksa et al., 2023⁶, Alkaff et al., 2024⁷, Chen et al., 2024⁸, Khan et al., 2024¹⁷ y Hossain et al., 2023²².

rapias que prescinden de esta. Mediante su aplicación se pretende inducir un mayor grado de neuroplasticidad en los pacientes (remodelación de circuitos neuronales basada en la teoría del aprendizaje hebbiano)^{23,24}.

Enfermedades cerebrovasculares

Se considera que este es uno de los ámbitos de aplicación más relevantes, ante la disponibilidad creciente de interfaces con finalidad rehabilitadora (la mayoría en proceso de validación). En los últimos años, los resultados de diversos estudios con tamaño muestral reducido, si bien variable, han llevado a la conclusión de que la utilización de ICM acelera el proceso de recuperación tras lesiones cerebrovasculares, tanto en lo funcional como en lo respectivo a conectividad cerebral, promoviendo la neuroplasticidad más rápidamente que técnicas convencionales de rehabilitación^{3,7,17}. Recientemente se han proyectado dos ensayos clínicos piloto aleatorizados, controlados y con carácter ciego: el primero pretende evaluar la capacidad de una ICM con estimulación eléctrica funcional para la rehabilitación de la marcha en pacientes con

antecedente de ictus isquémico o hemorrágico crónico (> 6 meses desde inicio de sintomatología)²⁵; el segundo analizará la recuperación de movilidad distal de miembros superiores en pacientes con antecedente de ictus subagudo (entre 1 y 6 meses desde inicio de la clínica) en función de si reciben *neurofeedback*, o no, durante las sesiones de entrenamiento con ICM²⁶.

Alteraciones de la comunicación

En la actualidad es posible generar lenguaje sintético a partir de la actividad eléctrica neuronal de pacientes que presentan trastornos de la articulación, de la fonación o de la emisión del lenguaje debido a lesiones a distintos niveles del sistema nervioso^{27,28}, con resultados variables en función de la ICM empleada y características propias de cada paciente. Los avances en este campo se organizan en torno a tres grandes ideas: la selección de texto digital predeterminado (mediante el control de *gadgets* como *tablets*), la escritura «libre» digital (alcanzando tasas de caracteres por minuto aceptables y tasas de errores relativamente bajas) y la producción de voz artificial⁷. Cabe destacar el caso de una paciente que ha recuperado la capacidad de comunicarse mediante un avatar digital tras un ictus bulbar, llegando a producir un lenguaje relativamente fluido de aproximadamente 80 palabras por minuto (voz sintética). En este caso las estructuras corticales implicadas en el lenguaje estaban respetadas, pero con cierta reestructuración de la tecnología sería posible aplicarla a ictus corticales²⁹. Muy recientemente se ha publicado la historia de otro paciente, con antecedente de tetraparesia y disartria grave (ambas secundarias a esclerosis lateral amiotrófica [ELA]), que mediante una ICM invasiva que produce texto y voz es capaz de mantener conversaciones a un ritmo modulable cercano al natural, empleando un enorme abanico de palabras (más de 120.000), con una tasa de acierto (intención-emisión) extraordinaria³⁰. Más allá de la dificultad que entraña la traducción del contenido mental a lenguaje comprensible, estas tecnologías se enfrentan a la complejidad de establecer un adecuado control ejecutorio. ¿Cómo diferenciar los pensamientos que deben ser expresados por la ICM y aquellos que deben quedar reservados únicamente para el usuario cuando la actividad neuronal que se produce a la hora de imaginar una acción y de llevarla a cabo puede ser difícil de distinguir entre sí? Como posible solución se ha planteado separar los módulos de interpretación y de emisión, condicionando la función del segundo a una tarea de imaginería motora no relacionada con el lenguaje. Una alternativa sería proporcionar una primera escucha privada del mensaje que la ICM va a transmitir en un auricular que porte el usuario, que deberá después confirmar o rechazar la emisión de este, sabiendo de la influencia negativa de esta estrategia en la fluidez de la comunicación²⁷.

Déficits sensoriales

Estrictamente hablando, hoy en día no se ha desarrollado una ICM capaz de devolver el sentido del tacto o la vista a una persona. Sin embargo, sí que han surgido aportaciones de relevancia a este respecto en los últimos años, que se exponen a continuación.

Sensibilidad táctil

En 2016, investigadores de la Universidad de Pittsburgh consiguieron evocar sensibilidad táctil en pacientes con lesiones medulares crónicas aplicando microestimulación intracortical (ICMS) sobre el área correspondiente a la mano en el córtex somatosensorial. Este descubrimiento podría revolucionar el aprendizaje mediante *neurofeedback* (ya no limitado a pacientes con integridad completa de la vía sensitiva)^{9,14}. En 2018 se publicó el primer diseño funcional de un dedo artificial, con sensores inspirados en mecanorreceptores humanos y capacidad para discernir entre distintas texturas naturales, incluso cuando la orientación del objeto analizado cambia, siendo la intención final de sus creadores integrarlo en una hipotética interfaz neuronal^{12,31}.

Sensibilidad algésica

En un estudio llevado a cabo con seis pacientes aquejados de dolor crónico en miembros superiores (secundario a lesiones radiculares, traumatológicas o iatrogenia posquirúrgica) y que precisaban analgesia a diario, se aplicó una ICM con estimulación vibro-táctil que se potenciaba cuando los pacientes lograban incrementar la actividad *theta* en regiones corticales frontales contralaterales al miembro doloroso (mientras recibían *feedback* visual del estado de dicha actividad en EEG). En líneas generales, el aumento de ritmo *theta* se ha asociado a disminución de dolor a nivel central y la interfaz permite capacitar al paciente para incrementar la presencia de dicho ritmo a voluntad. A las seis semanas del inicio se objetivó una disminución significativa de la intensidad del dolor y de la interferencia en actividades diarias que correlacionaba positivamente con el aumento de actividad *theta*²³.

Visión

Los intentos por restituir este sentido en pacientes ciegos mediante estimulación eléctrica se remontan unos 50 años en el pasado, siendo posible inducir la aparición de fosfenos en el campo visual de estos. En la actualidad, varios grupos de científicos están tratando de desarrollar neuroprótesis relacionadas con la visión, con el inconveniente de que estimular de forma concurrente varios puntos de la corteza visual no permite generar formas reconocibles. Se ha descubierto que al modificar el patrón espaciotemporal según el cual se activan los electrodos,

sujetos invidentes pueden percibir contornos de objetos cotidianos o reconocer letras y dibujarlas con una tasa de acierto muy elevada^{9,32,33}. Combinando esta tecnología con una cámara inteligente capaz de traducir lo que sucede en el mundo exterior sería posible crear una ICM que paliara este déficit sensitivo tan invalidante. Es precisamente en este panorama que comienza a dibujarse donde Neuralink pretende hacerse un nombre con su interfaz Blindsight, que parece haber demostrado éxito modesto en sus primeros ensayos clínicos en modelos animales (simios)¹³.

Audición

Los implantes cocleares son la tecnología actualmente disponible más próxima a una hipotética ICM auditiva y forman parte del amplio grupo de las interfaces neuronales. Se están llevando a cabo estudios para tratar de evocar percepciones cognitivas complejas de forma consistente mediante estimulación cortical multiparamétrica, pero nuestro conocimiento del mapa funcional del cerebro es limitado¹⁴. Aunque la sordera cortical es una condición clínica infrecuente, en las próximas décadas es posible que pacientes que la padeczan puedan beneficiarse de complejas ICM capaces de interpretar en tiempo real el lenguaje de sus interlocutores y estimular las regiones corticales adecuadas para que puedan comprenderlo.

Lesiones medulares

El conjunto de ICM diseñadas para abordar este grupo de patologías suelen utilizar como dispositivo efector un estimulador eléctrico, generalmente no invasivo (de tipo manga/banda); de forma muy ocasional se ha experimentado con estimuladores implantables (a nivel epidural medular caudal a la lesión)³⁴. La mayoría de los estudios en este campo se han centrado en interfaces destinadas a recuperar la movilidad de miembros superiores y han demostrado mayor efectividad a nivel distal, en especial sobre la prensión de la mano, que a nivel proximal (la estimulación eléctrica de musculatura del hombro provoca fatiga muscular muy significativa)²¹. En 2021, investigadores del Hospital Universitario de Miami lograron que un paciente cuadripléjico recuperara el control voluntario de varios movimientos intrínsecos de la mano gracias a una ICM que incorporaba un estimulador eléctrico de tipo guante^{7,35}. Recientemente, se ha descrito el caso de un paciente capaz de controlar con su actividad cortical un exoesqueleto de miembros superiores e inferiores durante un periodo de seguimiento de dos años^{7,36}. En 2023, un grupo de investigadores del Hospital Universitario de Lausana llevaron a cabo la implantación exitosa de un sistema de ICM que definieron como BSI (*brain-spine interface*), un bypass digital entre el córtex y la médula espinal lumbar, permitiendo a un paciente con una lesión medular cervical incompleta recuperar

la habilidad de ponerse en pie y deambular por terrenos irregulares, e incluso caminar de nuevo con muletas con el estimulador apagado. El paciente presentaba la clínica desde hacía más de dos años y su mejoría con rehabilitación estándar se había estancado, de lo que se deduce que la interfaz puede inducir cierta neuroplasticidad^{34,37}. De cara al futuro, a nivel espinal sería preferible recurrir a estimuladores subdurales que epidurales (menor consumo de energía, mayor duración de batería, mejor tolerancia del tejido al estímulo...), pero eso supone la necesidad de materiales más sofisticados y flexibles. Aunque los avances son prometedores, hoy en día no existe tecnología capaz de restablecer por completo la funcionalidad motora de miembros inferiores en las situaciones descritas³⁴. La compañía estadounidense Neuralink ha iniciado en el último año el primer ensayo clínico en humanos de su ICM, denominada *Link*, con la intención de llegar a un tamaño muestral de 10 sujetos a finales de 2024. Los dos participantes actuales del ensayo presentan el antecedente de lesión medular y cuadriplejia secundaria. Más de 1.000 electrodos de registro intracortical dispuestos sobre una matriz de «hilos» flexibles, conectados a una batería recargable magnéticamente, son implantados gracias a la ayuda de un robot neuroquirúrgico específicamente diseñado para la tarea (dado el ínfimo grosor de los mismos y la pericia necesaria para evitar la vascularización cerebral durante el proceso), bajo la supervisión de un cirujano experimentado. La señal recogida por estos se transmite de forma inalámbrica hacia un dispositivo externo que hace las veces de procesador de la información y de efecto final de las acciones deseadas: un ordenador o similar³⁸. De acuerdo con la información disponible, ambos participantes han logrado adaptarse con gran rapidez a la interfaz y son capaces de controlar aplicaciones digitales mediante imaginaria motora (incluyendo videojuegos comerciales y programas de diseño gráfico en 3D), habiendo alcanzado niveles de precisión inéditos en la historia de las ICM y percibiendo mejoría progresiva de sus capacidades de interacción con medios virtuales, incluso tras la desconexión de varios hilos de electrodos en el caso del primer sujeto³⁹⁻⁴¹.

Enfermedades de motoneurona

Se trata de patologías que condicionan discapacidad marcada y progresiva, lo que las ha convertido en una de las principales áreas de interés para la aplicación de ICM. Pacientes que padecen ELA y esclerosis lateral primaria se han beneficiado de la utilización de interfaces con finalidad principalmente comunicativa (escritura digital y/o voz sintética), muchas de ellas como parte de proyectos piloto de investigación clínica. Aunque los hitos logrados son ocasionalmente meras pruebas de concepto para guiar futuros desarrollos, en 2019 se describió el caso de un paciente en estado de enclaustramiento capaz de utilizar una ICM invasiva para controlar una aplicación de deletreo digital durante más de tres años, de forma esta-

ble a pesar del carácter progresivo de la enfermedad²⁸. La empresa australiana Synchron está llevando a cabo un ensayo clínico a pequeña escala para validar su dispositivo Stentrode, un híbrido entre un *stent* endovascular convencional y una matriz de 16 electrodos diseñados para registrar actividad eléctrica neuronal, en el seno de su propia ICM. Diez pacientes con enfermedades de motoneurona han recibido el implante endovascular, que se aloja en el seno sagital superior (en la proximidad de la corteza motora primaria) y se conecta a través de un fino cable con un receptor-transmisor de señales situado en un bolsillo infraclavicular (acceso transvascular). Los datos se transfieren de forma inalámbrica hasta un dispositivo externo y permiten llevar a cabo tareas cotidianas en un ordenador o *tablet*: redactar *e-mails*, comprobar datos bancarios, hacer compras *online*, etc. Varios pacientes precisan de un módulo de seguimiento ocular para el correcto funcionamiento de la interfaz, si bien otros pueden operarla únicamente mediante procesos mentales (rápido proceso de adaptación a la tecnología en ambos casos). Recientemente, esta interfaz ha recibido integración con el dispositivo de realidad extendida Apple Vision Pro y con modelos de lenguaje como chat-GPT, lo que ha potenciado su habilidad para la generación de texto instantáneo y personalizable. Resultados preliminares descartan efectos adversos graves tras 12 meses de seguimiento en un grupo de cuatro pacientes, como hubieran sido la trombosis/migración del *stent* o complicaciones secundarias a la necesidad de doble antiagregación inicial y antiagregación simple a largo plazo^{11,42,43}.

Epilepsia y trastornos del movimiento

Algunos pacientes que padecen epilepsia farmacorresistente, enfermedad de Parkinson avanzada o temblor esencial invalidante pueden beneficiarse de tratamientos invasivos que implican la utilización de ECP. En el primer caso el objetivo es modular o impedir la propagación de la crisis por el circuito límbico (actuando sobre el tálamo). EE.UU. ha aprobado una versión mejorada de esta tecnología conocida como «estimulación eléctrica inducida por crisis», capaz de detectar de forma automática el inicio de estas y emitir una estimulación eléctrica proporcional de forma inmediata para tratar de provocar sucese^{21,44} (compatible con el concepto de ICM con finalidad terapéutica). En el abordaje de determinados subtipos de epilepsia, en Europa se dispone de la estimulación eléctrica del nervio vago⁴⁴, quedando por determinar en qué grado puede maximizarse el potencial de la terapia mediante el uso de ICM que incorporen un estimulador vagal. En lo respectivo a trastornos del movimiento, se pretende aminorar ciertos síntomas de la enfermedad en función de la diana seleccionada y se considera que la ECP modulada mediante ICM es significativamente más efectiva que la versión clásica, al permitir que la terapia se adapte al paciente de forma continua^{7,21}.

TABLA 4. Otras áreas de desarrollo de las ICM

Ámbito	Aplicabilidad
Domótica inteligente	Apertura de puertas, encendido de luces, control de camas articuladas, avisos de emergencia...
Educación	<i>Feedback</i> del estado mental de alumnos en tiempo real y diseño de estrategias de atención mantenida y mejora de la comprensión de conceptos estudiados
Interés militar	Investigaciones sobre la posibilidad de aumento de las capacidades cognitivas naturales. Detección de mentiras
Marketing	Publicidad altamente personalizada e identificación de emociones evocadas por esta
Seguridad personal	Identificación (las señales de EEG son una «huella» prácticamente imposible de replicar)
Seguridad vial	Ánalisis automático de tendencia al sueño en conductores profesionales para evitar siniestralidad en carretera
Videojuegos y entretenimiento	Batallas de imaginería motora entre ICM no invasivas. Interacción mental con entornos de realidad extendida. Mecánicas de juego cambiantes en función de la implicación emocional del jugador

EEG: electroencefalograma; ICM: interfaces cerebro-máquina.

Adaptada de Maiseli et al., 2023⁴, Peksa et al., 2023⁶, Alkaff et al., 2024⁷, Hossain et al., 2023²², van Stuijvenberg et al., 2024²⁷ y Livanis et al., 2024⁴⁵.

Miscelánea

Debido a la capacidad de análisis automático de actividad cerebral intrínseca a las ICM (habitualmente señales de EEG), con el paso del tiempo han surgido nuevas utilidades colaterales que conviene reseñar: detección de anomalías estructurales inferidas por actividad cerebral inusual; evaluación de fluctuaciones en el nivel de conciencia y diferenciación precisa de fases de sueño; monitorización evolutiva en segundo plano de procesos cognitivos, mnésicos y atencionales de los usuarios; herramienta de apoyo diagnóstico en enfermedades neurodegenerativas (y de diagnóstico diferencial entre ellas), epilepsia (con la intención de predecir la aparición de crisis) y patología tumoral cerebral; guía de dianas terapéuticas en patologías abordables neuroquirúrgicamente; creación de grandes bases de neurodatos (previa autorización del paciente) para validación de nuevas interfaces, etc.^{6,7,21,22}.

Más allá de la neurología

La tabla 4 recoge escenarios de aplicación de ICM alejados de la práctica médica, la gran mayoría en estado incipiente y no exentos de controversia^{4,6,7,22,27,45}.

INTERFACES (AÚN MÁS) INTELIGENTES

Si bien en sus inicios no fueron concebidas de forma conjunta, no es posible considerar a las ICM como un desarrollo independiente de la inteligencia artificial (IA), partiendo de la necesidad de procesamiento y clasificación de inmensas cantidades de datos para el óptimo funcionamiento de las primeras (tarea en la que los algoritmos de *deep learning* exceden las capacidades humanas y las de técnicas tradicionales de computación)^{6,22}. Gracias a la aplicación de IA en neuroradiología, nuestra comprensión de la estructura funcional del sistema ner-

vioso central es más detallada que nunca²⁷. La utilización de algoritmos predictivos y modelos de lenguaje en ICM, entrenados tanto con enormes bancos de palabras como con la actividad cerebral cortical asociada a estas, permite acelerar la velocidad y exactitud de la generación de lenguaje. Para que la comunicación sea fluida y efectiva, se debe conceder mayor libertad a los algoritmos, lo que supone limitar el control directo del usuario sobre el contenido del lenguaje generado. A cambio, se reduce la carga cognitiva derivada de la utilización de la interfaz²⁷. Para minimizar el tiempo destinado al análisis de datos los estudios suelen preferir la utilización de redes neuronales convolucionales frente a las recurrentes²², aunque la aparición de redes neuronales con arquitectura de transformadores (aquellas que poseen capacidad «atencional» inspirada en la cognición humana) comienza a ofrecer resultados aún más prometedores⁴⁶. La inclusión de la IA en el núcleo de las ICM evita la necesidad de recalibración constante de parámetros, asegurando un funcionamiento estable de la interfaz a largo plazo³.

LIMITACIONES ACTUALES

Desde un punto de vista objetivo, resulta innegable el potencial de las ICM. Sin embargo, para disponer de una adecuada visión de conjunto hay que ir más allá. Esta sección contiene importantes aclaraciones sobre el presente de estas soluciones biotecnológicas.

Metodológicas

Un gran número de ICM se encuentran en estado embrionario (nuestro conocimiento del cerebro humano es limitado) y su utilización dista de ser frecuente^{5,8}. La mayoría de las publicaciones al respecto son pruebas de concepto experimentales. Los pocos ensayos clínicos existentes agrupan un número reducido de pacientes y

permanecen en fases iniciales, sin datos de seguimiento a largo plazo disponibles todavía^{7,12,13}. No existen indicadores de calidad estandarizados para medir y comparar la efectividad de estas interfaces⁴.

Humanas

Cada ser humano es único, al igual que su cerebro. Esta heterogeneidad puede dificultar la utilización a gran escala de las ICM⁷. Algunos pacientes son incapaces de adaptarse a la interfaz tras numerosas sesiones de entrenamiento (al igual que sucede con tecnología de todo tipo). Por otro lado, dada la cualidad progresiva de muchas enfermedades neurológicas, es posible que a largo plazo las ICM vean su efectividad comprometida^{11,27}.

Relacionadas con el hardware

Es necesario mejorar las técnicas de fabricación e implantación disponibles para evitar el deterioro de los componentes electrónicos y la pérdida de calidad de señal a largo plazo (debido a micromovimientos de los electrodos en el interior del cráneo, a la acción disolvente del líquido cefalorraquídeo y a la formación de cicatrices gliales)^{4,17}. Las ICM de carácter doméstico deben funcionar de forma consistente en entornos dinámicos contaminados por el ruido acústico y electromagnético⁷.

Relacionadas con el software

Una ICM no es capaz de «leer» el pensamiento de un paciente, por lo que el control que puede ejercer el usuario sobre un dispositivo externo con su ayuda es limitado. A mayor complejidad de los algoritmos empleados en el procesado de señales aumenta el riesgo de prolongar progresivamente la duración de las sesiones de aprendizaje necesarias para el manejo de estas interfaces, con el incremento consecutivo de la fatiga mental para el usuario. Además, determinar por qué la IA ha llegado a una determinada conclusión en situaciones concretas supone un reto de alta complejidad^{3,6,8}. El lenguaje generado mediante ICM comunicativas aún no posee la capacidad de adaptarse completamente a las variaciones propias de una conversación entre seres humanos²⁷. En el futuro podría ser necesario un estudio completo de red neuronal de cada usuario para el adecuado funcionamiento de las estas interfaces²⁹.

ÉTICA

Las ICM se encuentran en constante evolución y el marco ético al que se vean sometidas debe ser capaz de adaptarse al mismo ritmo²⁷. Las cuestiones clave que considerar en este ámbito son: prescripción responsable, estigma asociado al uso o rechazo de las ICM en pacientes con lesiones neurológicas, límite de las mejoras otorgables (¿dónde acaba el concepto de tratar y comienza la idea de

«aumentar» a un ser humano?), posibles trastornos de personalidad y alteraciones de la identidad social derivados del uso de ICM, impacto en el sentido de agencia, acceso equitativo a la tecnología y minimización de los elevados costes de desarrollo e implementación de esta^{13,45}. Como aclaración, hoy en día no es posible leer, modificar ni controlar los pensamientos de un usuario de ICM manipulando su *software*. De igual forma, tampoco disponemos de herramientas capaces de elevar las capacidades cognitivas de una persona ni de transferir información convencional desde un dispositivo electrónico al cerebro o viceversa⁸. En el primer mundo, varias empresas comienzan a abrirse paso en este sector con fines industriales y comerciales⁴, alejándose sin duda del propósito para el que las ICM fueron concebidas inicialmente.

LEGISLACIÓN

La Unión Europea (UE) considera que es necesario desarrollar una regulación preventiva en materia de interfaces neuronales, pues las aplicaciones más espectaculares de las ICM todavía están por llegar. No se pretende detener el progreso en sí mismo, sino evitar líneas de investigación que puedan suponer una amenaza para la libertad, la igualdad o la dignidad individual. La privacidad adquiere carácter primordial y se propone crear una categoría especial de protección de neurodatos (una brecha de seguridad en el futuro podría tener consecuencias nefastas). Los países miembros de la UE deberán definir los límites de las investigaciones que lleven a cabo con ICM, desarrollar órganos que supervisen específicamente estas y considerar encarecidamente el establecimiento de nuevos neuroderechos en sus respectivos territorios⁵. Sería oportuno que la normativa se ajustara a la finalidad de las propias interfaces (uso médico, recreativo, educativo, social...). Uno de los principales desafíos legislativos a los que nos enfrentamos es el establecimiento de responsabilidad legal en acciones delictivas derivadas parcial o totalmente de la acción de una ICM. ¿Hasta qué punto dispone el usuario del control final del lenguaje producido por un sistema de comunicación o de los movimientos realizados por una prótesis robótica? ¿Qué sucede si el *software* comienza a actuar de forma errática? ¿Y si se revela de forma accidental información sensible? ¿Cuál es la validez de un consentimiento informado verbal otorgado mediante una ICM? ¿Qué riesgos existen al aceptarse una solicitud de eutanasia de un paciente cuyo único método de comunicación con el exterior es una ICM? Ante todo, será necesaria una terminología clara, precisa y unificada que sustente todo este enrevesado marco legal^{13,27}.

CONCLUSIÓN: CONEXIÓN RESTABLECIDA

Vivimos en una época de constante cambio y globalización extrema, en la que ser capaz de desenvolverse con soltura en el entorno de las tecnologías de la

información y de la comunicación se ha convertido en un requisito indispensable, no solo para el establecimiento de relaciones interpersonales, sino para poder llevar a cabo toda clase de actividades que en última instancia dotan de independencia al ser humano. Las enfermedades y lesiones neurológicas suponen una de las principales causas de discapacidad adquirida a nivel mundial en pacientes de edad muy diversa, con el consecuente riesgo de «desconexión» física y digital de todo aquello que les ancla al pleno ejercicio de su voluntad en la vida diaria. Ante este escenario desalentador, las ICM comienzan a abrirse paso en el campo de la neurología (y más allá) en su afán por tratar de restaurar el vínculo perdido mediante inusuales formas de interacción híbrida, impulsando a su vez descubrimientos de relevancia en el ámbito de la neuroanatomía funcional. La presente revisión narrativa establece un marco conceptual claro y ofrece una clasificación detallada de los subtipos de ICM disponibles, así como un análisis de la evidencia científica más actual, con un enfoque práctico orientado a la clínica. En los próximos años las ICM se enfrentarán a toda clase de retos dentro y fuera del ámbito de la medicina, desde la concepción de materiales revolucionarios y el desarrollo de algoritmos matemáticos extremadamente complejos, a la instauración de una normativa reguladora en un contexto de expansión tecnológica acelerada sin precedente. Evitar la desinformación y promover la educación sanitaria en materia de interfaces neuronales será un aspecto crucial para que alcancen pleno desarrollo en proyectos de investigación y favorecer la acogida de estas por parte de la sociedad. La posibilidad de una simbiosis completa humano-máquina sigue siendo una aspiración lejana, y aunque las hipótesis sobre el potencial de estas interfaces en el futuro próximo pueden resultar exageradas, no debemos olvidar cuál es la piedra angular que sustenta e impulsa toda su arquitectura: ¿acaso hay algo más extraordinario que lo que nuestro propio cerebro es capaz de lograr a cada instante?

FINANCIACIÓN

El presente trabajo no ha recibido ninguna subvención oficial, beca o apoyo de un programa de investigación destinados a la redacción de su contenido.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor no comunica conflicto de intereses en relación con el contenido del trabajo.

RESPONSABILIDADES ÉTICAS

Protección de personas y animales

El autor declara que para este trabajo no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos

El autor declara que en este trabajo no aparecen datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado

El autor declara que en este trabajo no aparecen datos de pacientes.

Uso de inteligencia artificial generativa

El autor declara que no ha utilizado ningún tipo de inteligencia artificial generativa en la redacción de este manuscrito ni en la creación de figuras, gráficos, tablas o sus correspondientes pies o leyendas.

BIBLIOGRAFÍA

- Xiong JH. Psychokinesis (PK). En: *The Outline of Parapsychology Revised Edition*. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield; 2009. pp. 141-192.
- Abrams B. The Carrie Phenomenon: A Brief History of Telekinesis [Internet]. New York: Bryan Abrams; 2013 Oct [citado 15/sep/2024]. Disponible en: <https://www.motion-pictures.org/2013/10/the-carrie-phenomenon-a-brief-history-of-telekinesis/>
- Karikari E, Koshechkin KA. Review on brain-computer interface technologies in healthcare. *Biophys Rev*. 2023;15(5):1351-8.
- Maiseli B, Abdalla AT, Massawe LV, Mbise M, Mkocha K, Nassor NA et al. Brain-computer interface: trend, challenges, and threats. *Brain Inform*. 2023;10(1):20.
- Becht O. The brain-computer interface: new rights or new threats to fundamental freedoms? Doc. 15147 [Internet]. Parliamentary Assembly, European Committee on Legal Affairs and Human Right; 24/sept/2020. Disponible en: <https://pace.coe.int/en/files/28722/html>
- Peksa J, Mamchur D. State-of-the-art on brain-computer interface technology. *Sensors (Basel)*. 2023;23(13):6001.
- Alkaff ZA, Malim NHAH, Sumari P, Abdullah JF. Applications of brain computer interface in present healthcare setting. En: Kashou NH (editor). *New Insights in Brain-Computer Interface Systems* [Internet]. IntechOpen; 2024. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.112353>
- Chen Y, Wang F, Li T, Zhao L, Gong A, Nan W, et al. Several inaccurate or erroneous conceptions and misleading propaganda about brain-computer interfaces. *Front Hum Neurosci*. 2024;18:1391550.
- Zhao ZP, Nie C, Jiang CT, Cao SH, Tian KX, Yu S, et al. Modulating brain activity with invasive brain-computer interface: a narrative review. *Brain Sci*. 2023;13(1):134.
- Hofmann UG, Stieglitz T. Why some BCI should still be called BMI. *Nat Commun*. 2024;15(1):6207.
- Mitchell P, Lee SCM, Yoo PE, Morokoff A, Sharma RP, Williams DL, et al. Assessment of safety of a fully implanted endovascular brain-computer interface for severe paralysis in 4 patients: the Stentrode With Thought-Controlled Digital Switch (SWITCH) Study. *JAMA Neurol*. 2023;80(5):533.
- Khorev Y, Kurkin S, Badarin A, Antipov V, Pitsik E, Andreev A, et al. Review on the use of brain computer interface rehabilitation methods for treating mental and neurological conditions. *J Integr Neurosci*. 2024;23(7):125.
- Waisberg E, Ong J, Lee AG. Ethical considerations of neuralink and brain-computer interfaces. *Ann Biomed Eng*. 2024;52(8):1937-40.
- Hong Y, Ryu S, Chung CK. Evoking artificial speech perception through invasive brain stimulation for brain-computer interfaces: current challenges and future perspectives. *Front Neurosci*. 2024;18:1428256.
- Becker S, Dhindsa K, Mousapour L, Al Dabagh Y. BCI Illiteracy: It's Us, Not Them. Optimizing BCIs for Individual Brains. 2022 10th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI), 21-23 feb 2022.
- Zheng H, Niu L, Qiu W, Liang D, Long X, Li G, et al. The emergence of functional ultrasound for noninvasive brain-computer interface. *Research (Wash DC)*. 2023; 6:0200.
- Khan S, Anderson W, Constantinou T. Surgical implantation of brain computer interfaces. *JAMA Surg*. 2024;159(2):219-20.
- Jiao Y, Lei M, Zhu J, Chang R, Qu X. Advances in electrode interface materials and modification technologies for brain-computer interfaces. *Biomater Transl*. 2023;4(4): 213-33.
- Coles L, Ventrella D, Carnicer-Lombarte A, Elmi A, Troughton JG, Mariello M, et al. Origami-inspired soft fluidic actuation for minimally invasive large-area electrocoagulation. *Nat Commun*. 2024;15(1):6290.
- Bae JY, Hwang GS, Kim YS, Jeon J, Chae M, Kim JW, et al. A biodegradable and self-deployable electronic tent electrode for brain cortex interfacing. *Nat Electron*. 2024; 7:815-28.
- Awuah WA, Ahluwalia A, Darko K, Sanker V, Tan JK, Tenkorang PO, et al. Bridging minds and machines: the recent advances of brain-computer interfaces in neurological and neurosurgical applications. *World Neurosurg*. 2024;189:138-53.

22. Hossain KM, Islam MA, Hossain S, Nijholt A, Ahad MAR. Status of deep learning for EEG-based brain-computer interface applications. *Front Comput Neurosci*. 2023; 16:1006763.
23. Demarest P, Rustamov N, Swift J, Xie T, Adamek M, Cho H, et al. A novel theta-controlled vibrotactile brain-computer interface to treat chronic pain: a pilot study. *Sci Rep*. 2024;14(1):3433.
24. Krueger J, Krauth R, Reichert C, Perdikis S, Vogt S, Huchtemann T, et al. Hebbian plasticity induced by temporally coincident BCI enhances post-stroke motor recovery. *Sci Rep*. 2024;14(1):18700.
25. Biswas P, Dodakian L, Wang PT, Johnson CA, See J, Chan V, et al. A single-center, assessor-blinded, randomized controlled clinical trial to test the safety and efficacy of a novel brain-computer interface controlled functional electrical stimulation (BCI-FES) intervention for gait rehabilitation in the chronic stroke population. *BMC Neurol*. 2024;24(1):200.
26. Kim MS, Park H, Kwon I, An KO, Shin JH. Brain-computer interface on wrist training with or without neurofeedback in subacute stroke: a study protocol for a double-blinded, randomized control pilot trial. *Front Neurol*. 2024;15:1376782.
27. van Stuijvenberg OC, Samlal DPS, Vansteensel MJ, Broekman MLD, Jongasma KR. The ethical significance of user-control in AI-driven speech-BCIs: a narrative review. *Front Hum Neurosci*. 2024;18:1420334.
28. Angrick M, Luo S, Rabbaní Q, Candrea DN, Shah S, Milsap GW, et al. Online speech synthesis using a chronically implanted brain-computer interface in an individual with ALS. *medRxiv* [Preprint]. 2023 Jul 1:2023.06.30.23291352. doi: 10.1101/2023.06.30.23291352.
29. Ruiz G, Rodríguez J, Fuentes B, Alonso M. Perspectivas futuras. En: Pagola J, Gabilondo I, Tejero C (editores). *Manual SEN de nuevas tecnologías en enfermedades cerebro-vasculares*. San Sebastián de los Reyes (Madrid): Ediciones SEN; 2024. pp. 81-82.
30. Card NS, Wairagkar M, Iacobacci C, Hou X, Singer-Clark T, Willett FR, et al. An accurate and rapidly calibrating speech neuroprosthesis. *N Engl J Med*. 2024;391(7):609-18.
31. Rongala U, Mazzoni A, Camboni D, Carrozza MC, Oddo CM. Neuromorphic artificial sense of touch: bridging robotics and neuroscience. *Robotics Research*. Volume 2. Springer Nature; 2018. pp. 617-630.
32. Beauchamp MS, Oswalt D, Sun P, Foster BL, Magnotti JF, Niketeghad S, et al. Dynamic stimulation of visual cortex produces form vision in sighted and blind humans. *Cell*. 2020;181(4):774-783.e5.
33. Fernández E, Alfaro A, Soto-Sánchez C, González-López P, Lozano AM, Peña S, et al. Visual percepts evoked with an intracortical 96-channel microelectrode array inserted in human occipital cortex. *J Clin Invest*. 2021;131(23):e151331.
34. Levett JJ, Elkaim LM, Niazi F, Weber MH, Iorio-Morin C, Bonizzato M, et al. Invasive brain computer interface for motor restoration in spinal cord injury: a systematic review. *Neuromodulation*. 2024;27(4):597-603.
35. Cajigas I, Davis KC, Meschede-Krasa B, Prins NW, Gallo S, Naeem JA, et al. Implantable brain-computer interface for neuroprosthetic-enabled volitional hand grasp restoration in spinal cord injury. *Brain Commun*. 2021;3(4):fcab248 [published correction appears in *Brain Commun*. 2022;4(3):fcac143].
36. Benabid AL, Costealde T, Eliseyev A, Charvet G, Verney A, Karakas S, et al. An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration. *Lancet Neurol*. 2019;18(12):1112-22.
37. Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, Martel F, Karakas S, Interig N, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface. *Nature*. 2023; 618(7963):126-33.
38. Musk E. Neuralink. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. *J Med Internet Res*. 2019;21(10):e16194.
39. Neuralink. PRIME Study Progress Update [Internet]. San Francisco: Neuralink Corporation; abr 2024 [citado 10/ago/2024]. Disponible en: <https://neuralink.com/blog/prime-study-progress-update/>
40. Neuralink. PRIME Study Progress Update - User Experience [Internet]. San Francisco: Neuralink Corporation; may 2024 [citado 10/ago/2024]. Disponible en: <https://neuralink.com/blog/prime-study-progress-update-user-experience/>
41. Neuralink. PRIME Study Progress Update - Second Participant [Internet]. San Francisco: Neuralink Corporation; ago 2024 [citado 11/sep/2024]. Disponible en: <https://neuralink.com/blog/prime-study-progress-update-second-participant/>
42. Ha K. Synchron Announces First Use of Apple Vision Pro with a Brain Computer Interface [Internet]. Brooklyn: Kimberly Ha; jul 2024 [citado 14/ago/2024]. Disponible en: <https://www.businesswire.com/news/home/20240730923591/en/Synchron-Announces-First-Use-of-Apple-Vision-Pro-with-a-Brain-Computer-Interface>
43. Rao N. GPT Has Entered The Chat: Inside Synchron's BCI-OpenAI Integration [Internet]. California: Naveen Rao; jul 2024 [citado 14/ago/2024]. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/naveenrao/2024/07/24/gpt-has-entered-the-chat-inside-synchrons-bci-openai-integration/>
44. Rodríguez X, Aledo A, Gil-Nagel A. Otros tratamientos. En: López FJ, Villanueva V, Falip M, Toledo M, Campos D, Serratosa J (editores). *Manual de Práctica Clínica en Epilepsia: recomendaciones diagnóstico-terapéuticas de la SEN*. Madrid: Ediciones SEN; 2019 (edición revisada de 2023). pp. 232-244.
45. Livanis E, Voultsos P, Vadikolias K, Pantazakos P, Tsaroucha A. Understanding the Ethical Issues of Brain-Computer Interfaces (BCIs): a blessing or the beginning of a dystopian future? *Cureus*. 2024;16(4):e58243.
46. Pfeffer MA, Ling SSH, Wong JKW. Exploring the frontier: Transformer-based models in EEG signal analysis for brain-computer interfaces. *Comput Biol Med*. 2024;178:108705.