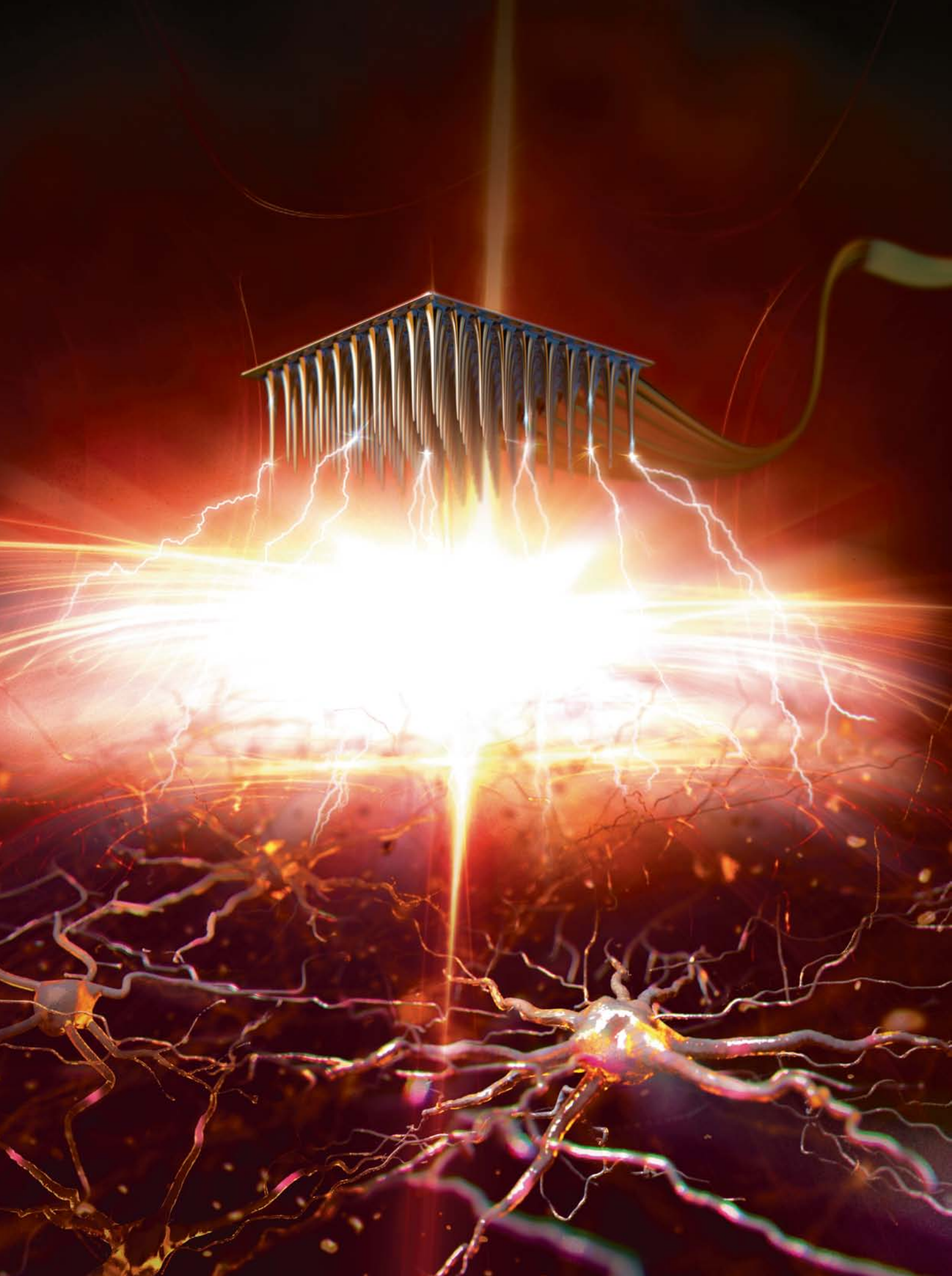




NEUROTECNOLOGÍA

LA MÁQUINA QUE LEE LAS INTENCIONES

Una nueva generación de interfaces neuronales
puede deducir lo que una persona quiere

Richard Andersen

Ilustración de Mark Ross

Richard Andersen es profesor J. G. Boswell de neurociencia y director del Centro de Interfaz Cerebro-Máquina del Instituto de Neurociencia Tianqiao y Chrissy Chen del Instituto de Tecnología de California. Estudia los mecanismos neuronales de la vista, el oído, el equilibrio, el tacto y la acción, y el desarrollo de prótesis neuronales. Andersen es miembro de la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Nacional de Medicina de EE.UU.



S

E ME PONE LA PIEL DE GALLINA CADA VEZ QUE LO VEO: UN VOLUNTARIO PARALÍTICO sentado en una silla de ruedas controla un ordenador o una extremidad robótica solo con sus pensamientos. Es la demostración de una interfaz cerebro-máquina (ICM) en acción.

Ese logro ocurrió en mi laboratorio en 2013, cuando Erik Sorto, herido de bala cuando tenía 21 años, se valió tan solo de sus pensamientos para beber una cerveza sin ayuda de nadie por primera vez desde hacía más de diez años. La interfaz envió un mensaje neural desde un área cortical de alto nivel, y un apéndice electromecánico cogió una botella y la llevó a los labios de Sorto para que pudiera tomar un sorbo. Había transcurrido más de un año desde que se le implantaron en el cerebro unos electrodos que controlan las señales neurales de los pensamientos que dan lugar a las acciones motoras. Junto con mis colaboradores observamos con asombro cómo completaba esta tarea engañosamente simple que, en realidad, es de una intrincada complejidad.

Al presenciar semejante hazaña, de inmediato surge la cuestión de cómo puede controlarse una prótesis mecánica solo con el pensamiento. A diario movemos las extremidades sin pensar, acciones que cualquier ICM compleja debería llevar a cabo sin dificultad. Sin embargo, durante décadas los neurocientíficos han intentado descodificar las señales neuronales que inician los movimientos para alargar el brazo y asir un objeto. El escaso éxito en la identificación de dichas señales ha espoleado la búsqueda de nuevos métodos para interpretar la cacofonía de la actividad eléctrica que resuena mientras los 86.000 millones de neuronas del cerebro se comunican entre sí. Ahora, una nueva generación de interfaces alimenta la esperanza de crear una unión perfecta entre cerebro y prótesis al intervenir con gran precisión en las regiones neuronales que formulan acciones, ya sea el objetivo asir una taza o dar un paso.

DEL CEREBRO AL ROBOT

Existen dos tipos principales de interfaces: unas envían mensajes al cerebro (ICM de «escritura») y las otras los reciben (ICM de «lectura»). Las primeras suelen emplear la estimula-

ción eléctrica para transmitir una señal al tejido neural y ya se utilizan con éxito en diversas aplicaciones clínicas: las prótesis cocleares estimulan el nervio auditivo y permiten que los sujetos sordos oigan; con la estimulación cerebral profunda de los ganglios basales, un área que controla la actividad motora, se tratan trastornos como la enfermedad de Parkinson y el temblor hereditario; también están realizándose ensayos clínicos para aliviar ciertas formas de ceguera con dispositivos que estimulan la retina.

Las ICM de «lectura», por el contrario, registran la actividad neuronal, pero aún se encuentran en fase de desarrollo. Antes de que la próxima generación de esta tecnología llegue a los pacientes, han de abordarse los desafíos únicos que plantea la lectura de señales neuronales. No obstante, ya existen métodos algo menos refinados. El electroencefalograma (EEG) registra la actividad promedio de una sección de varios centímetros de tejido cerebral, que contiene millones de células, aunque no capta la actividad de las distintas neuronas de un circuito. Por otra parte, la resonancia magnética funcional (RMf) es una técnica indirecta que mide el aumento del flujo sanguíneo en una región que está activa. Permite generar imágenes de áreas más reducidas que el EEG, pero su resolución continúa siendo baja. Los cambios en el flujo sanguíneo se producen despacio, de modo que la resonancia magnética no puede distinguir variaciones rápidas de la actividad cerebral.

Para superar estas limitaciones, lo ideal sería registrar la actividad de las neuronas por separado. Observando la variación en la velocidad de descarga de un gran número de neuronas se obtendría la imagen más completa de lo que ocurre en una región específica del cerebro. En los últimos años, los implantes de matrices de electrodos han empezado a posibilitar este tipo de registro. Los dispositivos que se emplean en la actualidad son superficies planas de cuatro por cuatro milímetros que

EN SÍNTESIS

Las interfaces cerebro-máquina pueden enviar señales a circuitos neuronales y recibirlas.

Los dispositivos actuales tienden a funcionar de manera imprecisa o con lentitud.

Una nueva investigación implanta las interfaces en aquellas áreas del cerebro que formulan las intenciones de moverse de una persona, con lo que se consigue una técnica más versátil para los pacientes con lesiones medulares.

contienen hasta 100 electrodos. Cada uno de ellos mide entre 1 y 1,5 milímetros de largo. La matriz completa, que se asemeja a un lecho de clavos, puede registrar la actividad de entre 100 y 200 neuronas.

Las señales captadas por estos electrodos se procesan en «descodificadores» que utilizan algoritmos matemáticos para traducir los diversos patrones de descarga neuronal en una señal que inicia una acción concreta, como el control de una extremidad robótica o de un ordenador. Estas interfaces de lectura ayudarán a pacientes que han sufrido daños cerebrales a causa de lesiones de la médula espinal, ictus, esclerosis múltiple, esclerosis lateral amiotrófica y distrofia muscular de Duchenne.

Nuestro laboratorio se ha centrado en sujetos tetrapléjicos, que sufren parálisis en las extremidades superiores e inferiores debido a lesiones en la región cervical de la médula espinal. Registramos la actividad de la corteza, la capa de unos tres milímetros de grosor que cubre los dos hemisferios del cerebro. Si se extendiera, la corteza de cada hemisferio mediría unos 80.000 milímetros cuadrados. El número de regiones corticales especializadas en controlar funciones cerebrales específicas ha aumentado conforme se han recabado más datos y, en la actualidad, se calcula que comprende más de 180 áreas. Estas ubicaciones procesan la información sensorial, se comunican con otras regiones del cerebro involucradas en la cognición, toman decisiones o envían órdenes para desencadenar una acción.

En resumen, una interfaz cerebro-máquina puede interactuar con muchas regiones de la corteza. Entre ellas figuran las áreas corticales primarias, que detectan los estímulos sensoriales, como el ángulo y la intensidad de la luz que incide en la retina o las sensaciones desencadenadas en una terminación nerviosa. También se apunta a las cortezas de asociación, densamente conectadas, entre las áreas primarias que están especializadas en el lenguaje, el reconocimiento de objetos, las emociones y el control ejecutivo de la toma de decisiones.

Diversos grupos han empezado a registrar poblaciones de neuronas individuales en pacientes paralíticos, lo que les permite manejar una prótesis en el entorno controlado de un laboratorio. Aún persisten obstáculos importantes que deben salvarse antes de que pueda equiparse a un paciente con un dispositivo protésico neuronal con la misma facilidad que un marcapasos. Mi grupo aspira a registrar la actividad de las áreas asociativas, y no de la corteza motora, que es el objetivo de otros laboratorios. Con ello, confiamos en poder conseguir una mayor velocidad y versatilidad a la hora de detectar el inicio de las señales neuronales que transmiten las intenciones de un paciente.

El área de asociación concreta que mi laboratorio ha estudiado es la corteza parietal posterior (CPP), donde se planifica la ejecución de una acción. En nuestro trabajo con primates no humanos, hallamos una subregión de la CPP, llamada corteza intraparietal lateral, que discierne las intenciones para iniciar el movimiento de los ojos. Otras zonas de la CPP se encargan de procesar el movimiento de las extremidades, y la región parietal del alcance prepara el de los brazos. Además, Hideo Sakata, por entonces en la Facultad de Medicina de la Universidad de Nihon, y sus colaboradores hallaron que el área intraparietal anterior formula los movimientos de agarre.

La CPP ofrece varias ventajas para el control cerebral de un artefacto robótico o del cursor de un ordenador. Una de ellas es que controla ambos brazos, mientras que la corteza motora de cada hemisferio, el área en la que se centran otros laboratorios, activa la extremidad del lado opuesto del cuerpo. La CPP también indica el objetivo de un movimiento. Por ejemplo, cuando



LA INTERFAZ desarrollada por Richard Andersen (izquierda), del Instituto de Tecnología de California, y su equipo permitió a Erik Sorto (derecha) mover un brazo robótico.

a un primate no humano se le induce visualmente a alcanzar un objeto, esta área del cerebro se activa enseguida, marcando la localización de un objeto deseado. Por el contrario, la corteza motora envía una señal para coordinar la trayectoria del movimiento. Conocer la finalidad de una acción motora prevista permite que la interfaz cerebro-máquina la descodifique rápidamente, en unos pocos cientos de milisegundos, mientras que para calcular la señal de trayectoria procedente de la corteza motora se puede tardar más de un segundo.

DEL LABORATORIO AL PACIENTE

No ha resultado fácil pasar de los experimentos con animales en el laboratorio a los estudios de la CPP en humanos. Transcurrieron quince años antes de poder realizar el primer implante. Primero, insertamos en primates sanos las mismas matrices de electrodos que planeábamos usar en humanos. Los monos aprendieron entonces a controlar cursores de ordenador o extremidades robóticas.

Formamos un equipo de científicos, médicos y profesionales de rehabilitación del Instituto de Tecnología de California (Caltech), la Universidad del Sur de California, la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), el Centro Nacional de Rehabilitación

Rancho Los Amigos y el Hospital y Centros de Salud Casa Colina. El equipo recibió el visto bueno de la Agencia de Fármacos y Alimentos y de los comités institucionales encargados de evaluar la seguridad y la ética del procedimiento en los laboratorios, hospitales y clínicas de rehabilitación involucrados.

Los voluntarios en este tipo de proyectos son verdaderos pioneros, que pueden o no obtener un beneficio. En última instancia, participan para ayudar a aquellos usuarios que recurrirán a esta tecnología una vez que esté perfeccionada y lista para su uso cotidiano. En abril de 2013, Erik Sorto, nuestro primer voluntario, se sometió a la cirugía de implante, que llevaron a cabo los neurocirujanos Charles Liu y Brian Lee. La operación salió a la perfección, pero luego siguió un período de espera, mientras el paciente se recuperaba, antes de poder probar el dispositivo.

Mis colegas del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, que construyeron y lanzaron los robots exploradores de Marte, hablan de los siete minutos de terror que transcurren desde el momento en que el vehículo entra en la atmósfera del planeta hasta que aterriza. Para mí fueron dos semanas de inquietud, durante las que me preguntaba si el implante funcionaría. Sabíamos cómo operaban áreas similares del cerebro de primates, pero un implante humano navegaría en aguas inexploradas. Nadie antes había intentado registrar la actividad de una población de neuronas de la CPP.

Durante el primer día de pruebas detectamos actividad neural y, al final de la semana, disponíamos de señales de suficientes neuronas para empezar a determinar si Sorto podría controlar una extremidad robótica. Se producía una variación en la actividad de algunas neuronas cuando Sorto imaginaba que movía su propio brazo. La primera tarea consistió en orientar la mano del robot en diferentes direcciones para estrechársela a un estudiante de posgrado. Estaba entusiasmado, como nosotros, porque era la primera vez desde su lesión que interactuaba con el mundo usando el movimiento corporal de un brazo robótico.

A menudo la gente quiere saber cuánto tiempo se tarda en aprender a utilizar una interfaz cerebro-máquina. De hecho, la técnica funcionó desde el primer momento. Resultó fácil e intuitivo usar las señales de intención del cerebro para controlar el brazo robótico. Al imaginar diferentes acciones, Sorto observaba los registros de neuronas de su corteza y podía activarlas y desactivarlas a voluntad.

Al principio de un estudio, preguntamos a los participantes qué les gustaría conseguir si pudieran controlar un robot. Sorto quería ser capaz de tomar una cerveza por sí mismo sin tener que pedirle ayuda a nadie. Logró dominar esta acción aproximadamente un año después de empezar el estudio. Con el equipo codirigido por Spencer Kellis, de Caltech, que incluía a expertos en robótica del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, fusionamos las señales de intención de Sorto con la potencia de procesamiento suministrada por la visión artificial y la robótica inteligente.

El sistema de visión artificial analiza las imágenes de las cámaras de vídeo, y el robot inteligente combina la señal de intención con algoritmos informáticos para iniciar el movimiento del brazo del robot. Sorto logró el objetivo después de un año, entre vítores y gritos de alegría de todos los presentes. En 2015 publicamos en *Science* nuestros primeros resultados sobre el uso de las señales de intención de la CPP para controlar prótesis neuronales.

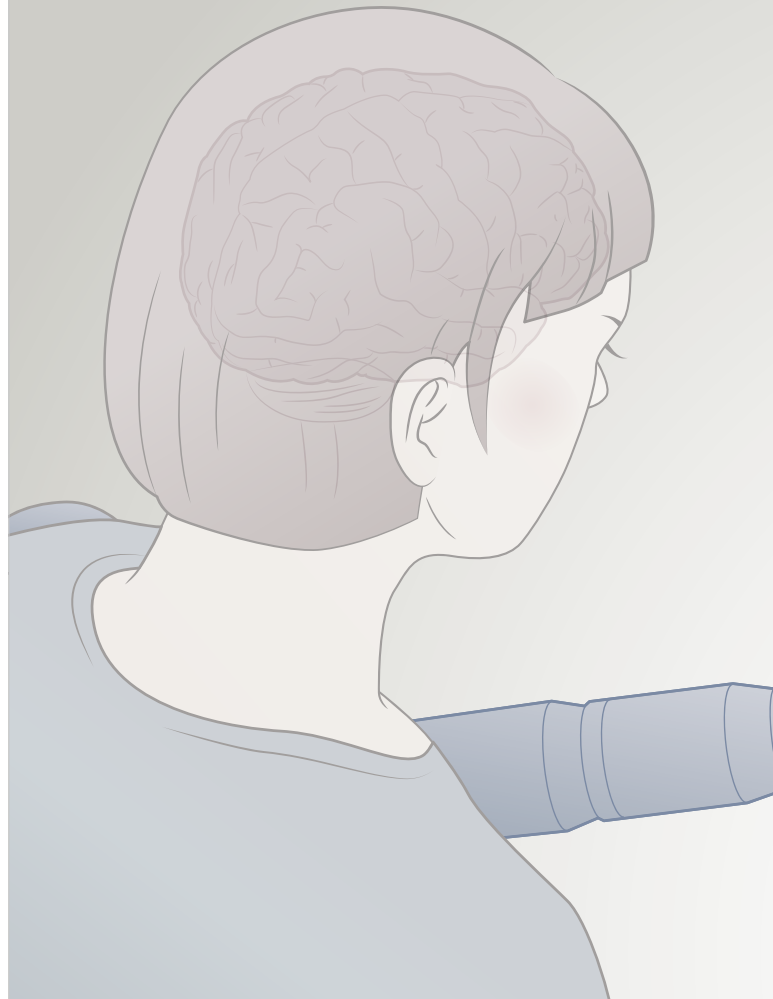
Sorto no es el único usuario de nuestra técnica. Nancy Smith, que lleva cuatro años participando en el ensayo, se quedó tetrapléjica tras un accidente de tráfico hace unos diez años. Era

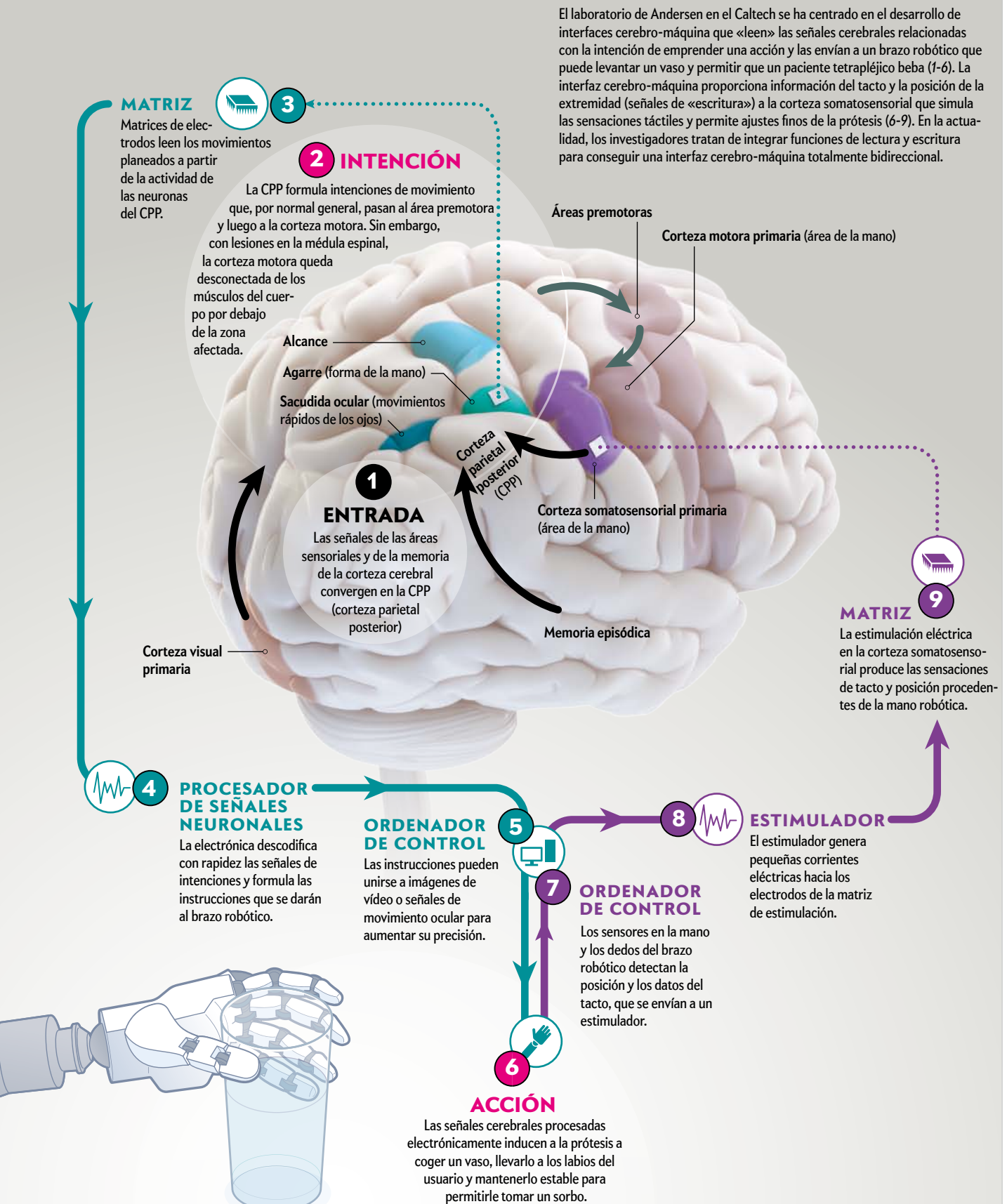
Basta con pensarlo

Durante 15 años, los neurocientíficos han construido interfaces cerebro-máquina (ICM) que permiten mover cursores de ordenador o manejar prótesis por medio de señales neuronales. La tecnología ha avanzado con lentitud debido a que traducir las descargas eléctricas de las neuronas en órdenes para jugar a un videojuego o mover un brazo robótico es un proceso sumamente intrincado.

Un grupo del Instituto de Tecnología de California (Caltech) ha efectuado progresos en el campo neuroprotésico recurriendo al procesamiento neuronal de alto nivel —la intención de iniciar una acción—, seguido de la transmisión de las señales eléctricas relevantes a un brazo robótico. En vez de enviar señales desde la corteza motora para mover una extremidad, como han intentado otros laboratorios, los investigadores del Caltech colocan electrodos en la corteza parietal posterior (CPP), que transfiere a una prótesis la intención de actuar del cerebro.

Descodificar señales neuronales sigue planteando todo un desafío para los neurocientíficos. Sin embargo, el uso de señales procedentes de la CPP, la cúpula de la cadena de mando cognitiva, parece que derivará en un control más rápido y versátil de las prótesis.





profesora de informática en un instituto de secundaria y tocaba el piano como pasatiempo. En estudios realizados con Tyson Aflalo, del Caltech, y Nader Pouratian, de la UCLA, descubrimos una representación detallada de las manos en la CPP de Smith. Mediante realidad virtual, la mujer podía imaginar que movía por separado los diez dedos de las manos izquierda y derecha de un avatar en la pantalla del ordenador. Con el movimiento imaginado de los cinco dedos de una mano, Smith podía tocar melodías sencillas en un teclado de piano generado por ordenador.

CÓMO REPRESENTA EL CEREBRO LOS OBJETIVOS

Nos entusiasma trabajar con estos pacientes para encontrar neuronas sintonizadas para procesar las señales que se relacionan con las intenciones de una persona. La cantidad de información que se extrajo de unos pocos cientos de neuronas resultó abrumadora. Logramos descodificar un surtido diverso de actividades cognitivas, entre las que se incluían estrategias mentales (imaginar frente a intentar una acción), movimientos de dedos, decisiones de recordar estímulos visuales, posiciones de las manos para asir un objeto, acciones observadas, verbos de acción, como «agarrar» o «empujar», y cálculos matemáticos. Para nuestra sorpresa, la inserción de varias matrices de electrodos diminutos nos permitió descifrar gran parte de las intenciones de una persona.

La cuestión sobre cuánta información puede registrarse a partir de una pequeña sección de tejido cerebral me recordó un problema científico similar con el que me había topado al comienzo de mi carrera. Durante mi formación posdoctoral con el difunto Vernon Mountcastle, en la Escuela de Medicina Johns Hopkins, examinamos cómo se representa el espacio visual en la CPP de monos. Nuestros ojos son como cámaras, con retinas fotosensibles que señalizan la localización de los estímulos visuales (la imagen completa se denomina mapa retinotópico). Las neuronas responden a regiones concretas de la retina, conocidas como campos receptivos. Pero el procesamiento de la percepción visual difiere del de una cámara de vídeo. Cuando el aparato se mueve, la imagen grabada también se desplaza, pero cuando movemos los ojos, el mundo permanece estable. La imagen retinotópica ha de convertirse en una representación visual del espacio que tenga en cuenta hacia dónde se dirige la mirada, de modo que, cuando se muevan los ojos, el mundo no parezca deslizarse.

La CPP constituye un centro de procesamiento clave para la representación del espacio visual de alto nivel. Cuando se realiza el movimiento para echar mano a un objeto y levantarlo, el cerebro ha de tener en cuenta dónde miran los ojos. Las lesiones de la CPP en humanos producen un movimiento impreciso. En el laboratorio de Mountcastle, hallamos que las neuronas individuales de la CPP tenían campos receptivos que captaban partes de una escena. Además, las mismas células transportaban también información sobre la posición ocular. Las dos señales interactuaban al multiplicarse la respuesta visual por la posición de los ojos en la cabeza, producto que se denomina campo de ganancia.

La inserción de unas diminutas matrices de electrodos en el cerebro nos permitió descodificar muchas de las intenciones de una persona

Cuando me incorporé al Instituto Salk de Estudios Biológicos, muy próximo a la Universidad de California en San Diego (UCSD), continué investigando el problema de la representación del espacio en el cerebro. En colaboración con David Zipser, neurocientífico teórico de la UCSD dedicado al desarrollo de redes neuronales, publicamos en *Nature* un modelo computacional que combinaba posiciones retinotópicas con la dirección de la mirada para trazar mapas del espacio que permanecen invariables frente a los movimientos oculares. Durante el entrenamiento de las redes neuronales, sus capas intermedias desarrollaron campos de ganancia, tal como ocurrió en los experimentos de la CPP. Al mezclar señales de los estímulos visuales y de las posiciones oculares en las mismas neuronas, bastaban tan solo

nueve células para representar el campo visual completo.

Recientemente, la idea de las representaciones mixtas (poblaciones de neuronas que responden a múltiples variables, como con los campos de ganancia) ha suscitado un renovado interés. Por ejemplo, los registros de la corteza prefrontal muestran una mezcla de dos tipos de tareas de memoria y diferentes objetos visuales.

Este trabajo, además, podría influir directamente en la explicación sobre lo que ocurre en la CPP. Lo descubrimos cuando le pedimos a Smith que, a partir de un conjunto de instrucciones escritas, realizara ocho combinaciones distintas de una tarea. Uno de sus cometidos requería definir una estrategia para imaginar o intentar una acción. En otro necesitaba usar el lado derecho e izquierdo del cuerpo; un tercero implicaba apretar una mano o encogerse de hombros. Hallamos que las neuronas de la CPP mezclaban todas estas variables, y que la amalgama exhibía un patrón específico, a diferencia de las interacciones aleatorias que nosotros y otros habíamos referido en experimentos con animales de laboratorio.

La actividad de las poblaciones de neuronas para elaborar estrategias y para controlar cada lado del cuerpo tiende a superponerse. Si una neurona se activa para iniciar el movimiento de la mano izquierda, lo más probable es que también responda a un intento de movimiento de la derecha, mientras que los grupos de neuronas que controlan el hombro y la mano se encuentran más distanciados. Nos referimos a este tipo de representación como selectividad parcialmente mixta. Desde entonces, hemos hallado similitudes en representaciones parcialmente mixtas que parecen componer una semántica del movimiento. La actividad de células sintonizadas para realizar el mismo tipo de acción tiende a superponerse. Una neurona que responda a vídeos que muestren a una persona asiendo un objeto también se activará cuando una persona lea la palabra «asir». Sin embargo, las células que responden a una acción como «empujar» tienden a escindirse en un grupo propio. En general, la codificación parcialmente mixta parece subyacer a los cálculos que son similares (los movimientos de la mano izquierda se asemejan a los de la derecha) y también separa aquellos que exhiben formas distintas de procesamiento neural (el movimiento del hombro difiere del movimiento de la mano).

Se ha encontrado codificación mixta y parcialmente mixta en ciertas partes de la corteza de asociación, por lo que sería

preciso explorar si aparecen también en otras ubicaciones que gobiernan el lenguaje, el reconocimiento de objetos y el control ejecutivo. Además, convendría saber si las regiones corticales motoras o sensoriales primarias utilizan estructuras similares, parcialmente mixtas.

Otra cuestión apremiante estriba en averiguar en qué grado el aprendizaje de nuevas tareas puede afectar al rendimiento de los voluntarios que usan las prótesis. Si se aprenden con facilidad, podría colocarse un implante en cualquier área del cerebro y entrenarse para desempeñar cualquier función concebible para la interfaz cerebro-máquina. Así, un implante en la corteza visual primaria podría aprender a controlar funciones no relacionadas con la visión. Pero, si el aprendizaje está más restringido, un implante en un área motora, por ejemplo, solo podría entrenarse para realizar acciones relacionadas con el movimiento. Los primeros resultados sugieren que los implantes deberían colocarse en áreas previamente identificadas que controlen actividades cognitivas específicas.

ESCRIBIR LAS SENSACIONES

Una interfaz cerebro-máquina no solo debe recibir y procesar señales cerebrales, sino que también ha de enviar información de la prótesis al cerebro. Cuando alargamos el brazo para coger un objeto, la retroalimentación visual nos ayuda a dirigir la mano, cuya situación dependerá de la forma del objeto. Si una vez que empieza a manipularlo, la mano no recibe las señales del tacto y de la posición de la extremidad, el rendimiento se reduce rápidamente.

Hallar el modo de corregir este déficit es de vital importancia para nuestros voluntarios con lesiones de la médula espinal, que sufren parálisis por debajo de la zona afectada. Tampoco perciben las sensaciones táctiles o la posición del cuerpo que son esenciales para un movimiento fluido. Por lo tanto, una prótesis neuronal ideal debe compensarlo mediante una señalización bidireccional: debe transmitir las intenciones del voluntario, pero también detectar la información relacionada con el tacto y la posición que procede de los sensores de una extremidad robótica.

Robert Gaunt y sus colaboradores de la Universidad de Pittsburgh han abordado este problema implantando matrices de microelectrodos en la corteza somatosensorial de una persona tetrapléjica, donde se procesa la información sensorial del tacto recogida por las extremidades. El equipo de Gaunt enviaba pequeñas corrientes eléctricas a través de los microelectrodos, y el sujeto refería sensaciones de partes de la superficie de la mano.

Nosotros también hemos realizado implantes similares en el área de la corteza somatosensorial correspondiente al brazo. Con grata sorpresa, nuestro sujeto, FG, refirió impresiones naturales, sensaciones cutáneas como las producidas al apretar o golpear, o vibraciones en la piel. También percibió la sensación de que la extremidad se movía, lo que se conoce como propiocepción. Estos experimentos muestran que los sujetos que han perdido la sensibilidad de las extremidades pueden recuperarla a través de interfaces cerebro-máquina que «escriban» las percepciones. El siguiente paso consistirá en utilizar manos robóticas equipadas con sensores para comprobar si la retroalimentación somatosensorial mejora la destreza robótica bajo el control del cerebro. Además, nos gustaría saber si los sujetos tienen la sensación de «corporeización», en la que el miembro robótico parece convertirse en parte del cuerpo.

Otro desafío importante radica en desarrollar mejores electrodos para enviar y recibir señales neuronales. Hemos determinado que los implantes funcionan durante un período rela-

tivamente largo de cinco años. Sin embargo, la optimización de los electrodos extendería aún más la longevidad de estos sistemas y aumentaría el número de neuronas cuya actividad podría registrarse. Otra de las prioridades consistiría en alargar los electrodos, lo que ayudaría a acceder a áreas ubicadas dentro de los pliegues de la corteza.

Los electrodos flexibles, que se muevan con las leves sacudidas del cerebro (debidas a cambios en la presión arterial o al ciclo respiratorio), también permitirán registros más estables. Los dispositivos existentes requieren la recalibración del descodificador, porque los electrodos rígidos cambian su posición con respecto a las neuronas de un día a otro; a los investigadores les gustaría seguir la actividad de neuronas idénticas durante semanas y meses.

Los implantes también han de reducirse en tamaño y funcionar con poca energía (para evitar calentar el cerebro) y de forma inalámbrica, de modo que no se necesiten cables para conectar el dispositivo al tejido cerebral. Las técnicas actuales requieren una intervención quirúrgica. No obstante, confiamos en que algún día se desarrollen interfaces de registro y estimulación que reciban y envíen señales a través del cráneo, y ofrezcan un rendimiento igual a las matrices existentes implantadas mediante cirugía.

Las interfaces cerebro-máquina, lógicamente, tienen por objeto ayudar a personas con parálisis. Sin embargo, en los medios y en los libros y películas de ciencia ficción se emplean para crear «superhumanos», personas a las que se les han conferido habilidades que les permitirían correr más rápido y saltar más alto. Sin embargo, la mejora humana solo se logrará cuando se desarrollen con precisión técnicas no invasivas capaces de detectar la actividad de neuronas individuales.

Por último, me gustaría expresar la satisfacción que produce llevar a cabo una investigación básica y ponerla a disposición de los pacientes. La ciencia fundamental es necesaria tanto para avanzar en el conocimiento como para desarrollar tratamientos médicos. Poder transferir estos descubrimientos a un entorno clínico supone la culminación máxima del esfuerzo investigador. Un científico se queda con la innegable sensación de realización personal al compartir con los pacientes su alegría de poder mover una extremidad robótica para interactuar de nuevo con el mundo físico. ■

PARA SABER MÁS

Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. Leigh R. Hochberg et al. en *Nature*, vol. 485, págs. 372-375, mayo de 2012.

High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. Jennifer L. Collinger et al. en *Lancet*, vol. 381, págs. 557-564, febrero de 2013.

Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human. Tyson Aflalo et al. en *Science*, vol. 348, págs. 906-910, mayo de 2015.

Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex. Sharlene N. Flesher et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 8, n.º 361, art. 361ra141, octubre de 2016.

Proprioceptive and cutaneous sensations in humans elicited by intracortical microstimulation. Michelle Armenta Salas et al. en *eLife*, vol. 7, artículo n.º e32904, abril de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mover con la mente. Miguel A. Nicolelis en *IyC*, noviembre de 2012.

Conexiones biónicas. D. Kacy Cullen y Douglas H. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

Prótesis más sensibles. Roberta Kwok en *MyC* n.º 67, 2014.