

Control de ordenadores por señales neurales

Los impulsos eléctricos procedentes de nervios y músculos pueden dar órdenes directas a los ordenadores, auxiliando así a los que sufren limitaciones físicas

Hugh S. Lusted y R. Benjamin Knapp

En una película de ciencia ficción muy popular por los años cincuenta, unos exploradores espaciales llegaban desde la Tierra a un lejano planeta en el que perduraban vestigios de una civilización muy adelantada. En aquel remoto lugar todavía funcionaba un computador. Los visitantes humanos pudieron comunicarse con él por medio de aparatosas sondas craneales que transmitían directamente pensamientos y sentimientos a través de enlaces neurales.

El tema se ha repetido hasta la saciedad en otras obras futuristas. La mente humana se acopla a un ordenador y basta con un simple pensamiento para que la máquina responda, a semejanza del reconocimiento de la voz por ordenadores que hoy es práctica común. Este reconocimiento del pensamiento constituiría una última frontera del ordenador en la que éste se comportaría como una prolongación del propio sistema nervioso.

HUGH S. LUSTED y R. BENJAMIN KNAPP llevan diez años de colaboración. Lusted se doctoró en la facultad de medicina de la Universidad de Stanford en 1980 y estudió regeneración de nervios en la de Londres. A su regreso a Stanford contribuyó al desarrollo de una implantación coclear electrónica. Conoció entonces a Knapp, graduado en la Universidad de Carolina del Norte y más tarde doctorado en Stanford. Lusted y Knapp fundaron en 1989 Biocontrol Systems.

La técnica de la computación ha avanzado mucho en estos últimos cuarenta años, pero construir un enlace neural versátil entre el cerebro humano y la máquina electrónica sigue siendo una empresa titánica. Con todo, vale la pena proseguir las tentativas de unión del sistema nervioso a circuitos electrónicos externos, ya que ello nos permitiría comunicar con los ordenadores sin ningún esfuerzo. Para las personas aquejadas de graves atrofas neuromusculares, que carecen de acceso a los ordenadores y apenas se relacionan con el mundo exterior, ello supone un avance increíble.

En el último decenio hemos trabajado para conseguir este control “sin manos” de los ordenadores. Hoy día los enlaces neurales pueden ya satisfacer algunas necesidades, y esperamos que pronto se encontrarán nuevas maneras de dominar la técnica. Con algo de imaginación y una comprensión clara del camino recorrido hasta los logros actuales es posible trazar un cuadro de lo que el futuro puede ofrecernos.

El cuerpo eléctrico

Hace más de un siglo que se reconoce la naturaleza eléctrica del sistema nervioso, base del control neural directo de los ordenadores. En 1849, Emil Heinrich Du Bois-Reymond detectaba las minúsculas descargas eléctricas provocadas al contraer los músculos del brazo. Para sus observaciones se valió de un galvanómetro, un primitivo medidor de tensiones. Du Bois-Reymond adhirió



a su cuerpo los hilos del instrumento utilizando trozos de papel secante impregnado en solución salina, que mantendrían la resistencia eléctrica de la conexión en el mínimo. Pero pronto se dio cuenta de que la piel actuaba como una barrera para las señales eléctricas generadas en la masa muscular interior. Por ello no vaciló en abrirse una herida en cada brazo, arrancarse la piel e introducir los electrodos de papel en las propias llagas. Du Bois-Reymond pudo entonces captar señales eléctricas unas treinta veces más intensas que las obtenidas a través de la piel intacta.

Sobre estas primeras investigaciones se ha desarrollado una técnica que hoy permite observar las contracciones musculares. Con electrodos de cloruro de plata y amplificadores electrónicos muy sensibles pueden



1. LA SELECCION EN UN MENU de ordenador suele exigir la manipulación de un teclado o un ratón. Pero también los discapacitados físicos pueden enviar órdenes a su ordenador. Heather Black, aquejada de parálisis cerebral aguda, puede

manejar un ordenador fijando la mirada en uno de los cuadros que destellan en la pantalla. Los electrodos fijados a su cabeza recogen las señales evocadas por los destellos; la temporización de los impulsos identifica la elección hecha.

registrarse los débiles impulsos musculares, incluso después de atravesar la piel. En los años setenta se comenzó a aprovechar este fenómeno en investigaciones clínicas para el diseño de prótesis mecanizadas capaces de obedecer a contracciones musculares. Por otro lado, también se observó que los impulsos eléctricos procedentes de fibras musculares activas podían ayudar a personas incapaces de mover algunos miembros por causa de enfermedad o heridas; para ello basta con colocar electrodos junto a músculos que no estén afectados. Por este camino,

hasta los individuos con minusvalía profunda pueden manejar equipos electrónicos con las señales generadas por los músculos (las señales electromiográficas, o EMG, cuyo nombre proviene del registro sobre papel de tales impulsos).

La cuestión no se reduce a adherir sensores EMG a la piel de la persona y conectar los hilos a un ordenador corriente. Se requieren circuitos y programas informáticos especializados para analizar e interpretar las configuraciones de impulsos musculares. Con miras a ayudar a otros investigadores en este terreno, hemos diseñado un

equipo que sirve de interfaz entre el ordenador y las señales eléctricas del cuerpo. Le hemos puesto el nombre de Biomusa.

La traducción de los impulsos musculares en una forma más adecuada para el tratamiento por ordenador digital comienza con la amplificación de las señales primarias detectadas por los electrodos, multiplicando por un factor aproximado de 10.000 la tensión de las mismas. Otros circuitos convierten luego en formato digital las señales EMG amplificadas. Tras un extenso procesamiento de estas señales digitalizadas, el ordenador



2. LOS MUSCULOS DEL BRAZO de Dawn Parkot, que sufre parálisis cerebral, generan señales eléctricas que puede detectar el ordenador. Bajo la banda negra que ciñe su brazo izquierdo, unos electrodos captan las mínúsculas fluctuaciones de tensión que se alteran cuando los grupos de fibras

musculares comienzan a contraerse. Ante un ordenador que representa estas señales biológicas, esta alumna de ingeniería de la Universidad Notre Dame aprende a variar la actividad muscular de su antebrazo desde un nivel bajo (*izquierda*) a un nivel alto (*derecha*).

puede determinar cuándo y en qué medida se contraen las fibras musculares próximas a los electrodos. De esta manera, la actividad muscular puede dirigir la operación de un ordenador personal, tal como lo haría un ratón o puntero de rólula.

Ciertos sistemas de control de ordenadores mediante señales musculares han demostrado su gran valía para las personas discapacitadas. David J. Warner, del hospital clínico de la Universidad de Loma Linda en California, conectó en 1993 los electrodos de nuestro aparato EMG al rostro de un niño de 10 años completamente paralizado del cuello para abajo, a consecuencia de un accidente de automóvil. Tensando ciertos músculos faciales, el niño desplazaba objetos en la pantalla del ordenador —la primera vez desde el accidente que podía mover sin ayuda objetos de su entorno.

Pero los discapacitados físicos no son los únicos que pueden aprovecharse de las ventajas de controlar ordenadores por señales musculares. Con el ratón EMG “manos-libres” que estamos ensayando puede ajustarse la posición del cursor sobre la pantalla contrayendo los músculos del antebrazo, por ejemplo, lo que permite mover el cursor sin levantar del teclado las manos.

Posibilidades insospechadas

Otro enfoque del control de ordenadores por señales biológicas depende de un fenómeno eléctrico del cuerpo humano totalmente distinto: la diferencia de potencial entre retina y córnea. En efecto, la retina,

donde reside la máxima actividad metabólica del ojo, presenta una tensión ligeramente negativa con respecto a la de la córnea. En cierto modo, el ojo actúa como una débil batería eléctrica. Pueden detectarse por circuitos electrónicos las mínúsculas variaciones de tensión producidas en el rostro de una persona cuando cambia la orientación de sus ojos. Tales impulsos se denominan señales electrooculográficas (EOG, del nombre dado a sus registros en papel).

Durante decenios, la medición de las señales EOG ha constituido un apropiado indicador del movimiento ocular en diversos estudios fisiológicos. En 1953, Nathaniel Kleitman, de la Universidad de Chicago, y Eugene Aserinsky, de la facultad de medicina Jefferson en Filadelfia, utilizaron señales EOG con que registrar el movimiento ocular durante ciertas fases del sueño. En estos períodos la actividad cerebral era intensa, similar a la del estado de vigilia; hablamos del sueño REM, de rápido movimiento ocular (“rapid-eye-movement”).

Si bien la EOG se había utilizado anteriormente como un simple registro del movimiento ocular general, al final de los ochenta parecía factible que las mediciones del potencial córneo-retiniano indicaran también la dirección de la mirada de la persona. Disponiendo convenientemente los electrodos, las tensiones EOG variarían proporcionalmente a la rotación del ojo en un margen de 30 grados a partir del centro. Hacia 1990 varios grupos informaron de haber logrado mover así el cursor de un ordenador. Pero los escépticos

siguieron sosteniendo que el “ruido” eléctrico originado por los cambios graduales de tensión entre los electrodos (la “deriva electródica”) haría impracticable este procedimiento para todo lo que no fuese una demostración de laboratorio.

Conseguimos por fin descubrir un modo de eliminar la interferencia y construir un dispositivo práctico para el control de los ordenadores. Para lograr tal resultado seguimos el mismo sistema que habíamos empleado a propósito de la detección de señales musculares, pero esta vez configuramos el aparato como monitor de señales EOG. Igual que en el procesamiento de EMG, el analizador EOG comienza por amplificar y digitalizar las tensiones recogidas en varios electrodos (un par de electrodos acusa los movimientos verticales del ojo y otro par los horizontales). Seguidamente, el sistema aplica lógica borrosa para discriminar entre el movimiento real del ojo y la deriva del electrodo.

Por medio de este equipo, cualquier persona puede controlar de manera fiable un ordenador con el movimiento de los ojos, por ejemplo, colocando el cursor en diversos puntos de la pantalla. Existen otras técnicas de seguimiento de la mirada que utilizan rayos infrarrojos o cámaras de vídeo. Pero tales alternativas resultan ser mucho más costosas que el equipo EOG, el cual brinda la posibilidad de manejar ordenadores por movimiento ocular a un mayor número de personas, y particularmente a los discapacitados.

En 1991, Warner probó en Loma Linda nuestro sistema de seguimiento

ocular para ayudar a una niña que había sufrido una grave lesión en la médula espinal. Dada su corta edad en el momento del accidente, los médicos temieron que las limitaciones físicas de la criatura comprometieran su desarrollo mental. Con una banda EOG especial ajustada en la cabeza y colocada frente a un monitor de vídeo, la niña de 18 meses pronto descubrió que podía desplazar un icono (una cara sonriente) a través de la pantalla sin más que mover los ojos, e intuitivamente comprendió, sin que nadie se lo explicara, la manera de controlar la pantalla.

Otras instituciones dedicadas a la rehabilitación de víctimas de la parálisis han utilizado equipos semejantes asociados a un programa especial de "teclado visual". Presenta éste en pantalla un teclado mecanográfico normal. Valiéndose únicamente del movimiento de los ojos, el operador selecciona letras entre las teclas representadas en la pantalla. Si bien el proceso de formación de palabras es lento, las personas adiestradas pueden (con ayuda de ciertos programas refinados) completar muchas frases, incluso documentos enteros, mediante una continua sucesión de miradas.

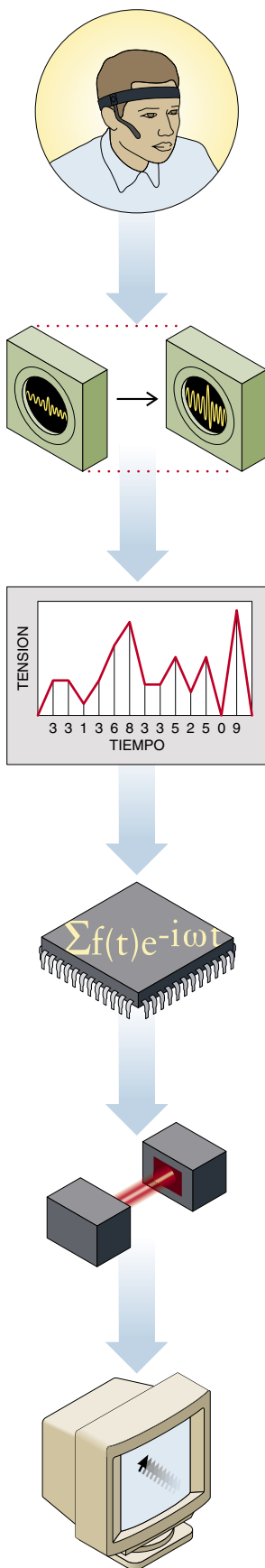
Tan seguro es el seguimiento de la mirada de una persona a través de las señales EOG, que hay varios intentos de integrar este mecanismo en otros sistemas. Nosotros hemos colaborado con clínicos de la Universidad de Stanford en el desarrollo de un sistema para el ajuste de las cámaras de fibra óptica que se utilizan en cirugía endoscópica (control remoto de operaciones en el interior del cuerpo). Nuestro aparato EOG permite que el cirujano cambie, moviendo los ojos, el campo visual de la cámara, al tiempo que mantiene las manos ocupadas en otros instrumentos quirúrgicos.

Control cerebral

Los dispositivos que detectan señales EMG o EOG han logrado enlazar personas con máquinas para un sinnúmero de aplicaciones, pero en todos los casos el proceso se apoya en las débiles tensiones de origen biológico generadas en músculos u ojos. ¿Sería posible establecer una conexión neural sin tales intermediarios? Se ha conseguido controlar de un modo rudimentario ordenadores sirviéndose de la actividad eléctrica inherente al cerebro mismo.

No es ningún descubrimiento que el cerebro produce señales eléctricas susceptibles de medida. En 1929 Hans

Componentes del sistema Biomusa



USUARIO

La persona que utiliza el sistema para traducir los impulsos biológicos a comandos de ordenador debe ceñirse en la cabeza o el brazo una banda especial. En el interior de la banda se alojan electrodos que detectan a través de la piel las señales eléctricas generadas en los ojos o los músculos.

AMPLIFICADOR

Hay que empezar por amplificar varios miles de veces la intensidad de las debilísimas señales que detectan los electrodos. La principal dificultad técnica estriba en que, si no se adoptan ciertas precauciones, pueden amplificarse también los ruidos eléctricos que las acompañan. Corrientemente se utiliza un amplificador diferencial, que sólo amplifica las diferencias de tensión entre dos puntos. Esto da buen resultado, pues la mayoría de las fuentes de ruido eléctrico tienden a afectar por igual a todas las señales. Por tanto, la diferencia entre tensiones de electrodos no sufre alteración.

CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL

Las tensiones amplificadas deben traducirse en un formato que pueda interpretar el ordenador. Para conseguirlo, un circuito especializado llamado convertor analógico-digital muestrea la señal entrante a un ritmo de 4000 veces por segundo. A continuación, convierte los niveles de tensión en series de números. Es tal la precisión de esta conversión, que el error introducido por la traducción al formato digital se limita a una pequeña fracción porcentual de los niveles de señal típicos.

PROCESADOR DE SEÑAL DIGITAL

El procesador de señal digital es una pastilla similar en muchos aspectos a los circuitos integrados que actúan como unidades centrales de procesamiento en los ordenadores personales. Los procesadores de señal digital están, sin embargo, diseñados para realizar con flexibilidad y eficiencia ciertos cálculos numéricos. En este sistema, extraen las características importantes de la sucesión de números que reciben del convertor de analógico en digital, y dentro de ese tren de datos reconocen configuraciones determinadas. Después, utilizan estos resultados para reconocer qué músculos han generado las señales eléctricas originales.

AISLAMIENTO ÓPTICO

Para cubrir el riesgo de descargas eléctricas que siempre conlleva la conexión de electrodos fijados sobre la piel a un aparato de alta tensión (ordenador, en este caso), es preciso tomar precauciones. Para ello se interrumpe el trayecto eléctrico en un punto, en el cual la señal eléctrica se transforma en señal óptica y se transmite a través de una corta distancia. Este enlace óptico intercalado deja pasar la señal sin obstáculos, pero reduce enormemente la posibilidad de descargas nocivas.

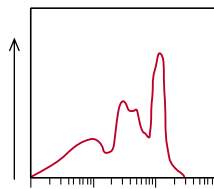
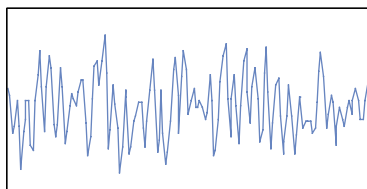
ORDENADOR PERSONAL

En el ordenador personal se representan las señales detectadas y procesadas por los demás componentes del sistema. Obedeciendo a las señales eléctricas generadas por movimiento de los ojos o contracciones musculares, el ordenador puede hacer funcionar otro ordenador o un dispositivo electrónico independiente. También permite un fácil ajuste de los controles del sistema, incluidos el nivel de amplificación global y las acciones específicas del procesador de señal digital.

Un surtido de ondas cerebrales

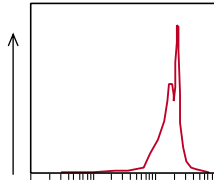
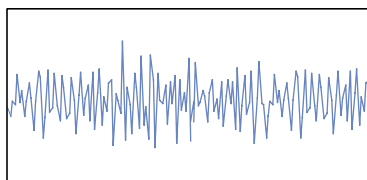
LAS ONDAS

ALFA, producidas al distraer la atención, son de bastante amplitud y moderadas frecuencias.



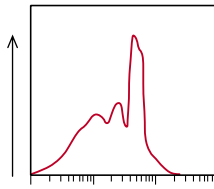
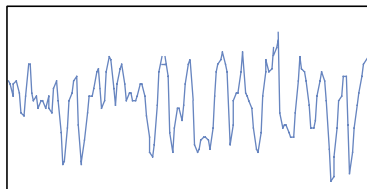
LAS ONDAS

BETA, resultado de una actividad mental intensa, suelen presentar rápidas oscilaciones con amplitudes pequeñas.



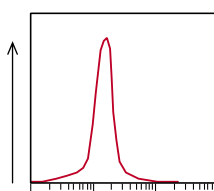
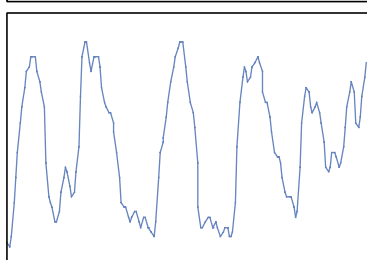
LAS ONDAS

THETA, que pueden ir asociadas a las tensiones emocionales, se caracterizan por frecuencias moderadamente bajas.

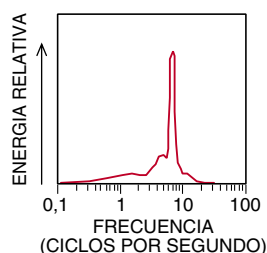
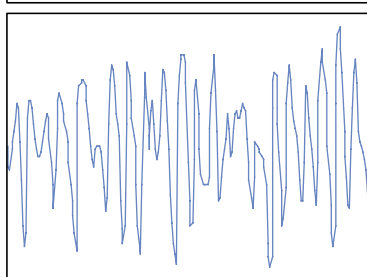


LAS ONDAS

DELTA se deben a una oscilación de frecuencia extremadamente baja que sobreviene en los períodos de sueño profundo.



LAS ONDAS MU van asociadas a los movimientos físicos o a la intención de moverse.



UN SEGUNDO

Berger acuñó el término “electroencefalograma”, en abreviatura EEG, para describir el registro de las fluctuaciones de tensiones en el cerebro captadas por unos electrodos fijados al cuero cabelludo. Estas señales EEG proceden de la corteza cerebral, una capa de varios centímetros de espesor de tejido neuronal lleno de circunvoluciones. Los neurólogos creen que el origen de las tensiones EEG está en las células piramidales de esta corteza. Cada una de dichas neuronas constituye un diminuto dipolo eléctrico, cuya polaridad depende de que la entrada de la red a la célula sea de inhibición o de excitación. De ahí que la apretada capa de células piramidales produzca una configuración de activi-

dad eléctrica en constante variación a medida que cambian los impulsos nerviosos. Las mediciones efectuadas en el cuero cabelludo pueden detectar las configuraciones eléctricas interiores, pero con la atenuación y el desenfoque introducidos por el paso a través del cráneo.

Hace ya decenios que se investigan las correlaciones entre las diversas señales EEG y los comportamientos o sensaciones particulares. Con los resultados de esos estudios se ha ido dibujando poco a poco un mapa funcional de la corteza cerebral. Hoy es posible personalizar las pruebas EEG colocando los electrodos en la parte de cuero cabelludo situada directamente sobre la fuente de la actividad que se

desea observar. Con miras a utilizar esta actividad eléctrica para el manejo de un ordenador, ciertos expertos han intentado aislar señales EEG específicas que el sujeto pueda ajustar a su albedrío. Por desgracia, las señales eléctricas del cerebro se resisten al control. Lo que suele hacerse es medir continuamente una diversidad de señales EEG y eliminar por filtrado las componentes indeseadas.

El análisis de las señales EEG continuas, u ondas cerebrales, es en sí mismo una ciencia, con su propia nomenclatura intrincada. Las diferentes ondas, al igual que las numerosas estaciones radioeléctricas, se caracterizan por la frecuencia de sus emisiones o, en ciertos casos, por la morfología de las ondas. Hay cinco tipos importantes.

Las ondas alfa son las de frecuencias comprendidas entre 8 y 13 hertz y pueden crearse fácilmente por acciones tan sencillas como el cerrar de ojos. Acostumbran ser bastante intensas, pero su amplitud disminuye cuando la persona recibe un estímulo luminoso, se concentra en imágenes vívidas o intenta otros esfuerzos mentales. Se llama ondas beta (típicamente entre 14 y 30 hertz) a las que se asocian a un estado de alerta, pudiendo alcanzar frecuencias próximas a los 50 hertz si la actividad mental es intensa. Las ondas theta (de 4 a 7 hertz) se originan por una tensión emocional, especialmente por frustración o decepción. Durante el sueño profundo se producen ondas delta, de frecuencias inferiores a 3,5 hertz. Por último, las ondas mu parecen ir asociadas con la corteza motora; disminuyen con el movimiento o la intención de moverse.

Casi todas las tentativas de controlar un ordenador por mediciones continuas de EEG se basan en la observación de ondas alfa o mu, ya que es posible aprender a cambiar la amplitud de estos dos ritmos mediante un esfuerzo mental apropiado. La persona puede lograr tal resultado recordando, por ejemplo, una imagen que le estimule intensamente o elevando su nivel de atención.

A lo largo de los últimos diez años, Jonathan R. Wolpaw y Dennis J. MacFarland, del Centro de Salud Wadsworth de Albany, han enseñado a los pacientes a controlar la amplitud de sus ondas mu por representación de la sonrisa, la masticación, la deglución y otras actividades motoras. Con suficiente práctica, los pacientes aprendieron a manipular un cursor que estaba programado para desplazarse obedeciendo a las variaciones de amplitud que se medían en las ondas mu.

3. LAS COMPOSICIONES musicales interpretadas por Atau Tanaka dependen solamente de las señales musculares. Los electrodos alojados en los dos brazaletes del compositor detectan unas señales que hacen funcionar un ordenador, y éste a su vez controla diversos instrumentos electrónicos.

También hemos experimentado con ondas cerebrales. En 1987 configuramos uno de nuestros equipos Biomusa para que funcionase como monitor de EEG y actuara sobre un sintetizador musical. El resultado fue una demostración espectacular de las posibilidades de esta técnica. Preparamos el sistema para la detección de ráfagas de actividad en ondas alfa, que pueden provocarse deliberadamente distrayendo la atención, por ejemplo. Este equipo es un conmutador electrónico activado por el cerebro; cualquier persona puede accionarlo, aunque sufra graves limitaciones físicas.

Como ilustración, citaremos el desarrollo de un equipo similar para un paciente brasileño inmovilizado por una esclerosis lateral amiotrófica avanzada (enfermedad de Lou Gehrig). Para formar palabras, utiliza nuestro conmutador de ondas alfa y un ordenador personal dotado de una programación especial de teclado visual. El proceso es laborioso, puesto que el paciente sólo puede responder sí o no, y a veces necesita hasta seis iteraciones para concentrar la búsqueda en una sola tecla. Sin embargo, ahora cuenta con una ayuda electrónica que le permite comunicarse, capacidad vital que había perdido por completo.

Otras personas discapacitadas utilizan con éxito un segundo tipo de aparato medidor de ondas cerebrales, que observa lo que se llama el potencial evocado del cerebro, o EP (del inglés "evoked potential"). La señal EP se produce en respuesta a ciertos estímulos —tales como un fuerte ruido o un destello de luz— al cabo de una pequeña fracción de segundo de haber sido éstos provocados. Varios investigadores han utilizado el método de detección de EP para controlar los ordenadores con la actividad eléctrica del cerebro. En particular, Erich E. Sutter, del Instituto Smith-Kettlewell de Investigación Oftalmológica de San Francisco, ha desarrollado un sistema que permite a los discapacitados físicos seleccionar palabras o frases de un menú formado por cuadros que destellan en la pantalla de un ordenador. Sosteniendo durante uno o dos segundos la mirada fija en el cuadro apropiado, una persona conec-



tada por electrodos craneales puede transmitir su elección al ordenador. La máquina observa la forma y la temporización de la respuesta EP y discrimina así cuál de los destellos codificados ha producido la actividad eléctrica evocada en el cerebro. El ordenador puede, entonces, captar la palabra o frase escogida entre todo el grupo presentado en la pantalla.

Al igual que Sutter, el grupo de Grant MacMillan, de la Base Aérea Wright-Patterson en Dayton, experimentan con señales EP y esperan que puedan servir de ayuda a los pilotos militares, una vez que hayan sido adiestrados en modificar a su antojo las señales EP. Los pilotos contarán, pues, con un mecanismo auxiliar de control aproximado, que podrán accionar incluso cuando tengan manos y pies ocupados en el pilotaje.

Futuras conmociones

Aunque es claro que los procesos mentales del cerebro van acompañados de una intensa actividad eléctrica, las fluctuaciones de tensión detectadas en el cuero cabelludo sólo permiten reconocer unas pocas de las configuraciones correspondientes. Por ejemplo, han sido muy raros los éxitos en la identificación del conjunto de ondas que el cerebro emite de modo coherente cuando la persona piensa en algo tan concreto como

una palabra o una letra del alfabeto. Pero tal vez podrían lograr esta hazaña unos sistemas más avanzados, capaces de desentrañar las complejas ondas cerebrales.

Es muy difícil valorar las posibilidades de controlar ordenadores con señales neurales, dado que este campo de investigación todavía está en pañales. Se ha conseguido un gran progreso al aprovechar la potencia de los ordenadores personales para realizar las rápidas operaciones que exige el reconocimiento de las configuraciones de impulsos biológicos. Prosigue la búsqueda de nuevas señales que puedan ser aún más útiles que las captadas hasta ahora. Se están distribuyendo nuevos programas informáticos capaces de sacar mayor partido de la velocidad y refinamiento del equipo de computación moderno.

Si los adelantos del siglo venidero mantienen el ritmo de los últimos decenios, la comunicación neural directa entre personas y ordenadores podrá alcanzar finalmente su madurez y generalización. Quizás algún día los nuevos ordenadores se comprenden con sensores de señales biológicas incorporados, como hoy se integran el teclado y el ratón. En tal caso, lo que quizá no sospechen los fanáticos del ordenador es que este método de controlar sus máquinas se debe al esfuerzo de un puñado de investigadores y a la resolución de un grupo de voluntarios discapacitados, allá en la última década del siglo veinte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN EEG-BASED BRAIN-COMPUTER INTERFACE FOR CURSOR CONTROL. J. R. Wolpaw, D. J. McFarland, G. W. Neat y C. A. Forneris en *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 78, n.º 3, págs. 252-259; marzo de 1991.

BIOCONTROLLERS FOR THE PHYSICALLY DISABLED: A DIRECT LINK FROM NERVOUS SYSTEM TO COMPUTER. R. B. Knapp y H. S. Lusted en *Virtual Reality and Persons with Disabilities: Proceedings*. Dirigido por H. J. Murphy. Universidad del Estado de California, 1992.

COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR DISABLED PERSONS. Erich E. Sutter en *Handbook of Amyotrophic Lateral Sclerosis*. Dirigido por Richard Alan Smith. Marcel Dekker, 1992.

MEDICAL INSTRUMENTATION, APPLICATION AND DESIGN. Dirigido por John G. Webster. Houghton Mifflin, 1992.