

Tecnología de Interfaz Cerebro - Computador

Javier Minguez *

** Grupo de Robótica, Percepción y Tiempo Real
Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas
Universidad de Zaragoza, España (e-mail: jminguez@unizar.es)*

Resumen

La Tecnología de Interfaz cerebro-computador es un sistema de interacción hombre-máquina capaz de traducir nuestras intenciones en interacción real con un mundo físico o virtual. El funcionamiento básico de una BCI es medir la actividad cerebral, procesarla para obtener las características de interés, y una vez obtenidas interaccionar con el entorno de la forma deseada por el usuario. Desde un punto de vista de interacción hombre-máquina, esta interfaz tiene dos características que la hacen única frente a todos los sistemas existentes. La primera de ellas es su potencial para construir un canal de comunicación natural con el hombre, la segunda su potencial acceso a la información cognitiva y emocional del usuario. La presente exposición aborda la tecnología de interfaces cerebro computador desde un punto de vista tecnológico presentando su contexto actual y las problemáticas tecnológicas e investigadoras asociadas. Palabras Clave: interfaz cerebro-ordenador, interfaz hombre-máquina.

1. INTRODUCCIÓN

El hecho de poder interactuar con el exterior por nuestro pensamiento es una de las quimeras tanto investigadoras como de tecnológicas. La idea detrás de este tipo de tecnología es muy simple y al alcance de cualquiera: se trata de conseguir transformar nuestros pensamientos en acciones reales alrededor de nuestro entorno. Estas acciones pueden ir dirigidas a elementos tan sencillos como encender o apagar las luces de nuestra casa, como hasta a máquinas tan complejas como sillas de ruedas. La idea es sencilla pero el reto tecnológico es enorme dado que involucra un conjunto fuertemente multidisciplinar de conocimiento como es la intersección de las neurociencias, la ingeniería biomédica y las ciencias de la computación. Su sinergia ha hecho realidad recientemente la tecnología de **interfaces cerebro-computador**, como un soporte físico para traducir nuestras intenciones en interacción con el mundo real. Usualmente esta tecnología se describe por su nombre en inglés *Brain-Computer Interface* (BCI), de manera que estas siglas serán adoptadas en el resto del documento.

La tecnología BCI tiene una peculiaridad que la diferencia enormemente de otras: el enorme abanico de aplicaciones y posibilidades que uno puede imaginar en breves instantes. Estas varían desde las aplicaciones en rehabilitación orientadas a la recuperación de capacidades motoras, hasta la lúdica y lucrativa industria de los videojuegos. Quizás el volumen de dinero que mueve esta última industria, unido al claro ejemplo de las ganancias reportadas con el nuevo interfaz hombre-máquina para interactuar con videojuegos (la Wii de Nintendo¹) han dado un impulso económico grande a esta tecnología, que aunque se conoce desde hace más de 20 años, estaba retrasada en términos de capacidad tecnológica todavía.



Figura 1. Visión de la tecnología de interfaz BCI.

Un aspecto relevante en este punto es señalar la visión que tienen los investigadores de su trabajo, el cual podría verse reflejado en la Figura 1 y el cual evoca varios mensajes. El primero de ellos es que la tecnología BCI es una investigación muy puntera en materias de investigación y que avanza y

¹ Fuente el Universal (México)... Nintendo elevó ayer (Octubre 2007) su reporte anual de ganancias e informó que sus ingresos para la primera mitad del año habían registrado un importante incremento, gracias a que sus exitosas consolas de juegos, Wii y DS, seguían impulsando al grupo. La capitalización de mercado de la compañía japonesa alcanzó la semana pasada los 10 billones de yenes (87 mil 600 millones de dólares), convirtiéndose en la tercera compañía más valiosa en Japón después de Toyota y el grupo financiero Mitsubishi UFJ. Este año superó a su rival Sony, de dimensiones mucho mayores, por primera vez en términos de ganancias. El éxito de la compañía se debe en gran medida a sus esfuerzos por expandir el mercado de los juegos.

evoluciona a gran velocidad, los americanos se refieren a este aspecto como *estar en la cresta de la ola*. Esto hace que el esfuerzo investigador en los laboratorios sea muy intenso y obliga a estar siempre al corriente de lo que se realiza en otros laboratorios, al tiempo que se desarrollan y prueban rápidamente los nuevos prototipos (si no se pasa la ola y te quedas atrás). El segundo mensaje detrás de esta analogía es que esta tecnología, que puede parecer una utopía, es hoy una realidad. Puede tardar más o menos, pero es algo que va a llegar a todos nosotros e inundará nuestra vida diaria, y al igual que hemos hecho con otras tecnologías como la televisión o los móviles, nos tendremos que hacer a ella y muy probablemente de forma independiente a nuestra capacidad económica, nuestra edad ó nivel cultural. Es cuestión de tiempo.

La pregunta entonces es ¿qué es una interfaz cerebro-computador?. La respuesta es que es un sistema de ingeniería capaz de traducir nuestras intenciones en interacción real con un mundo físico o virtual (Figura 2). El funcionamiento básico de una BCI es medir la actividad cerebral, procesarla para obtener las características de interés, y una vez obtenidas interactuar con el entorno de la forma deseada por el usuario.

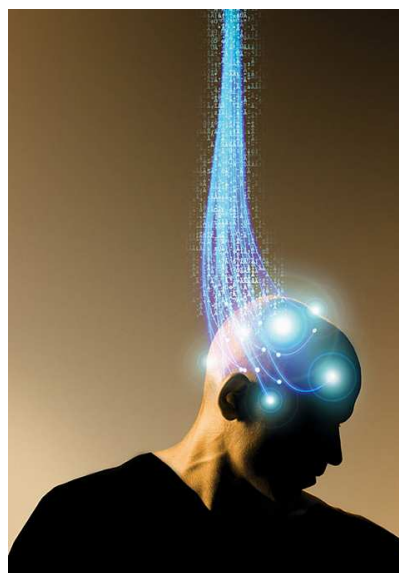


Figura 2. Visión de una interfaz BCI.

Desde un punto de vista de interacción hombre-máquina, esta interfaz tiene dos características que la hacen única frente a todos los sistemas existentes. La primera de ellas es su potencial para construir un canal de comunicación natural con el hombre, la segunda su potencial acceso a la información cognitiva y emocional del usuario. Los interfaces actuales como los ratones, teclados o seguidores de ojos, etc; son sistemas que permiten convertir las intenciones de control del usuario en acciones. Sin embargo, no son formas naturales de modelar y ejecutar la interacción, y a su vez carecen del potencial de acceder a información cognitiva como puede ser la carga de trabajo, la percepción de errores de los sistemas, la información afectiva, etc. La BCI tiene la capacidad de construir un canal de comunicación natural para el hombre con la máquina dado que traduce las intenciones directamente en órdenes. En otras palabras, el resto de los interfaces no son naturales en el sentido de que el pensamiento debe de ser traducido de forma que se adapte al tipo de interfaz. Por ejemplo, durante el uso de un teclado, el pensamiento de escribir una letra A se traduce en

una pulsación de uno de los dedos sobre una tecla dada. Aunque es eficiente y sirve para cumplir la tarea, no es una interacción natural para el usuario. De hecho, si no se recibe formación para ello, no se debería de saber utilizar. En segundo lugar, los interfaces cerebro-computador por principio tienen acceso a la información cognitiva humana, dado que la BCI está basada en medir la actividad cerebral, la cual se asume que codifica todos estos aspectos. El reto científico-tecnológico está en decodificar esta información de todo el volumen de datos. Desde un punto de vista de ingeniería, la BCI tiene por principio la capacidad de realizar una comunicación natural y tiene acceso a información cognitiva como ningún otro interfaz tiene. Esto la dota de una gran capacidad y diferencia tecnológica y hace que todos los estudios en interacción hombre-máquina coincidan en que el **futuro** de la interacción del hombre con las máquinas pasará por este tipo de interfaces.

La BCI vista como máquina que traduce intenciones humanas en acciones tiene al menos tres partes bien diferenciadas:

1. **Sensor:** es el encargado de recoger la actividad cerebral. La gran mayoría de modalidades sensoriales utilizadas en BCI provienen de aplicaciones clínicas, como son el electroencefalograma, la imagen por resonancia magnética funcional, etc.
2. **Motor de Procesamiento de Señal:** este módulo recoge la señal resultado de medir la actividad cerebral y aplica unos filtros para decodificar el proceso neurofisiológico que refleja la intención del usuario.
3. **Aplicación:** es el módulo de interacción con el entorno y da forma a la aplicación final de la BCI. Puede ser mover una silla de ruedas o escribir con el pensamiento en una pantalla de ordenador.

Toda la investigación que se desarrolla en BCI se encuadra en alguno de estos tres puntos. En primer lugar, se está trabajando en nuevas modalidades sensoriales que mejoren la resolución temporal y espacial de las medidas de la actividad cerebral, y en mejorar la usabilidad y portabilidad de los dispositivos en general. En segundo lugar, se está realizando mucha investigación en estrategias para tratar el procesamiento de señal en BCI. Los aspectos más relevantes y que dificultan el problema son que cada individuo tiene una actividad cerebral distinta y además esta actividad cerebral es no estacionaria (cambia con el tiempo). El trabajo se está enfocando hacia mejorar los procesos de filtrado (espacial y temporal), de aprendizaje automático de señal, y de adaptación a cada individuo en particular a lo largo del tiempo. El aspecto final es integrar la BCI en una aplicación útil para el usuario, lo que está motivando esfuerzos en aspectos como la integración hardware y software y su inclusión en entornos de aplicación reales.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y MEDIDA

El principio de funcionamiento básico de una BCI es medir la actividad cerebral, procesarla para obtener las características de interés de la señal, y una vez obtenidas, usarlas para interactuar con el entorno de la forma deseada por el usuario. Es importante señalar en este punto que se entiende por BCI a una interfaz hombre-máquina que utiliza para su funcionamiento únicamente información obtenida del sistema nervioso central y en particular del **cerebro** (es decir, actividad puramente cerebral). Por tanto quedan excluidas todas las interfaces que utilicen de forma implícita o explícita información eléctrica resultante del movimiento muscular (que usualmente

se denominan **artefactos** en el entorno de EEG). Un aspecto fundamental entonces es entender la generación del proceso de actividad cerebral y la modalidad elegida para medirla.



Figura 3. Visión de las partes del encéfalo.

De forma general, el **sistema nervioso** es una red de tejidos cuya función es la de captar y procesar rápidamente las señales ejerciendo control y coordinación sobre los demás órganos para lograr una oportuna y eficaz interacción con el medio ambiente cambiante. El sistema nervioso está dividido en el sistema nervioso central y el sistema nervioso periférico. El sistema nervioso central está formado por el encéfalo y la médula espinal. El encéfalo es la parte del sistema que está protegida por los huesos del cráneo y lo forman el cerebro, el cerebelo y el tronco del encéfalo; mientras que la médula espinal es la prolongación del encéfalo que se encuentra protegida por la columna vertebral. El sistema nervioso periférico está formado por nervios y neuronas que residen o se extienden fuera del sistema nervioso central hacia los miembros y órganos. La diferencia con el sistema nervioso central es que el sistema nervioso periférico no está protegido por huesos o por barrera hematoencefálica, permitiendo su exposición a toxinas y a daños mecánicos.

La unidad básica del sistema nervioso son las **neuronas**², las cuales tienen la capacidad de comunicarse con precisión, rapidez y a larga distancia con otras células, ya sean nerviosas, musculares o glandulares. La información viaja entre neuronas por medio de impulsos eléctricos que se transmiten de unas neuronas a otras. Estos impulsos se reciben de otras neuronas en las dendritas, pasan por toda la neurona hasta ser conducidas por el axón a los botones terminales, los cuales pueden conectar con otra neurona, fibras musculares o glándulas. Las neuronas conforman e interconectan los tres componentes del sistema nervioso: sensitivo, integrador o mixto y motor. Generalmente, una respuesta a un estímulo exterior sigue el siguiente proceso: el estímulo que es recibido en alguna región sensorial que capta

² Fue Santiago Ramón y Cajal quien situó a las neuronas como elementos funcionales del sistema nervioso (López-Muñoz *et al.*, 2006). Cajal propuso que las neuronas actuaban como entidades discretas que establecían una especie de red mediante conexiones especializadas o espacios. Esta idea es conocida como la doctrina de la neurona, uno de los elementos centrales de la neurociencia moderna. En su época, esta idea era totalmente opuesta a la defendida por Camillo Golgi, la cual propugnaba la existencia de una red neuronal totalmente continua (negaba que las neuronas fueran entes discretos interconectados).

determinada información, la cual es transportada por el sistema nervioso (a través de las neuronas) hasta un componente integrador en donde se analiza. Este componente elabora la respuesta que es conducida a través de las neuronas hacia fibras musculares (respuesta motora) o hacia glándulas (secreción glandular).

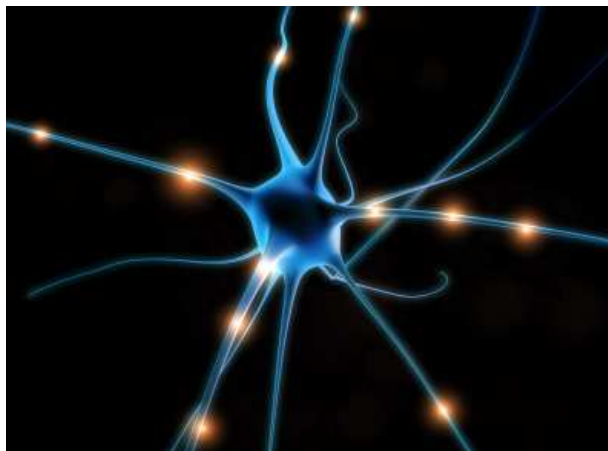


Figura 4. Visión de neurona transmitiendo impulsos eléctricos.

La **actividad cerebral** es la actividad funcional del conjunto de neuronas del sistema nervioso central localizadas en el cerebro. Se estima que el cerebro humano posee en torno a 10^{11} neuronas, que son aproximadamente unos cien mil millones. Las neuronas transmiten ondas de **naturaleza eléctrica** cuyo proceso de transmisión está basado en una despolarización incremental de la neurona debido a los potenciales procedentes de los axones de otras células (recibidos en las dendritas). Cuando la despolarización alcanza un determinado umbral se produce un potencial de acción, que es un cambio de potencial de negativo a positivo y vuelta a negativo que dura milisegundos y se transmite por el axón hacia otras neuronas. La actividad cerebral puede ser descrita en diferentes escalas que varían desde la actividad de un neurona particular, hasta conjuntos de actividad sincrona de millones de neuronas en grandes volúmenes cerebrales.

Al igual que cualquier otra célula viva las neuronas necesitan **aporte energético**. Existen diferentes niveles de necesidades energéticas: para sobrevivir y mantener su estructura, para mantenerse en condiciones de realizar su función, y para realizarla (que es el tipo de aporte energético relativo a la actividad cerebral cuando se ejecuta una tarea). El sistema nervioso difiere del resto de los tejidos en lo referente a su metabolismo energético, dado que aunque el peso del cerebro es solamente el 2% del peso total del cuerpo, recibe el 15% del flujo cardíaco utilizando el 20% del oxígeno que consume el cuerpo (Sokoloff, 1989). La energía le es suministrada en su totalidad por el metabolismo de la glucosa, sin embargo la capacidad del cerebro de almacenar glucosa y glucógeno es reducida ya que es capaz de cubrir los requerimientos energéticos cerebrales solamente durante un minuto.

Los dispositivos de medida de la actividad cerebral son los usualmente utilizados en tareas clínicas y miden uno de los dos procesos previos (cambios eléctricos/magnéticos o cambios el aporte energético). El primer tipo de dispositivos utiliza técnicas que miden la **actividad directa** de las neuronas ya que miden procesos electromagnéticos. El segundo tipo miden la **actividad cerebral indirecta**, dado que detecta cambios de

diferente origen en el torrente sanguíneo. Esta diferencia es importante dado que el primer método de medida mide los procesos primarios de la actividad, mientras que el segundo de ellos mide el resultado de la misma (que es la necesidad de realizar aporte energético más intenso para que las neuronas de una zona realicen su función). Como consecuencia, las técnicas que miden la actividad cerebral directa tienen una gran resolución temporal y mala espacial, mientras que las segundas es a la inversa. Por ejemplo, el electroencefalograma es una técnica que mide actividad eléctrica y se utiliza de forma clínica para estudiar la tipología de las ondas en zonas del cerebro en detección de patologías como la epilepsia. Por otro lado, la imagen por resonancia magnética funcional mide cambios en la oxigenación de la sangre, y se utiliza para detectar con precisión las áreas específicas en planificación neuroquirúrgica (por ejemplo para eliminación de focos epilépticos sin dañar las zonas del lenguaje y motoras), pero necesita tiempos de exposición del orden de segundos para obtener una imagen.

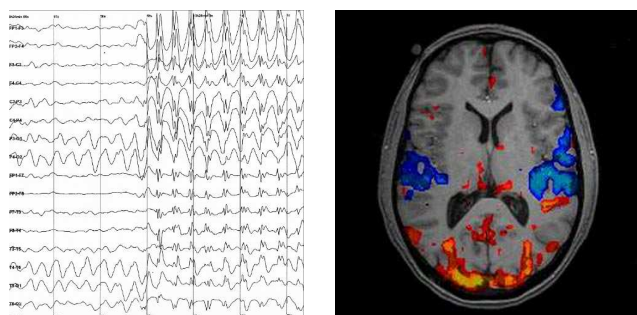


Figura 5. Electroencefalograma en el que se muestra un proceso epileptiforme localizado principalmente en las áreas frontales, y una imagen por resonancia magnética funcional que se muestra activación en los lóbulos temporales y occipitales.

Otro aspecto a considerar en una BCI es el lugar donde se coloca el sensor o dispositivo de medida con respecto al cuerpo humano, es decir, si es de forma **invasiva** o **no invasiva**. Esta elección tiene consecuencias importantes de usabilidad, éticas y de diseño del sistema (dado que determina el tipo de proceso neuronal que se puede medir y procesar posteriormente). Si el sensor se coloca de forma que no se realiza una intrusión sobre el cuerpo humano la técnica se denomina no invasiva, siendo éstas las más utilizadas en una BCI. Sin embargo, se han usado otras técnicas que requieren realizar una craneotomía (implantes en animales con un objetivo más neurocientífico y de entendimiento del funcionamiento del cerebro, que tecnológico como es el caso de una BCI). A grosso modo hay diferentes niveles de penetración y colocación del sensor que varían desde sistemas que penetran el córtex cerebral (miden neuronas individuales y potenciales locales de campo), hasta el electrocorticograma para el cual se colocan los sensores sobre la superficie del córtex (midiendo la suma de actividad de cientos de miles de neuronas). Más allá de los problemas éticos que tienen estas tecnologías invasivas, está la dificultad de mantener medidas estables en el tiempo debido a que un pequeño movimiento del sensor puede implicar un gran movimiento a nivel celular o local, y la dificultad intrínseca de la eficacia del sensor que sufre un ataque de las defensas del organismo hasta que es inutilizado.

El primer elemento de toda BCI es el dispositivo de medida de la actividad cerebral, el cual usualmente es un equipo clínico



Figura 6. Montaje de gorro con sensores para medición de EEG clínico (gorro húmedo) y montaje comercial para aplicaciones lúdicas de la marca Neurosky (gorro seco).

que mide la actividad cerebral directa o indirecta. La mayoría de las BCI utilizan dispositivos que miden procesos eléctricos dado que uno de los aspectos fundamentales de diseño es maximizar la transferencia de información del cerebro a la máquina. Esta transferencia viene reflejada por la cantidad de procesos que se puedan identificar y para ello son necesarios sensores con la máxima resolución temporal y con capacidad tiempo real. De todas las modalidades la más extendida por su gran adaptabilidad a la problemática de la BCI es el **electroencefalograma** o EEG, dado que tiene una gran resolución temporal, fácil uso, portabilidad y tiene gran abanico de posibilidades proporcionadas por su extendido uso clínico. El montaje de un sistema de EEG requiere de un gorro que se coloca sobre la cabeza y usualmente lleva unos sensores integrados para medir diferencias de potencial eléctrico. Para mejorar la conductividad entre el cuero cabelludo y el sensor se coloca un gel conductor (de ahí el nombre de electrodos húmedos). Todos los sensores se conectan a un amplificador que digitaliza la señal y la envía a un computador por ejemplo vía USB. Actualmente ya hay amplificadores de EEG que funcionan con baterías, con lo que son plenamente portátiles. Sin embargo, una de las grandes barreras de entrada de esta tecnología para el público general es el gel conductor que hay que aplicar para mejorar la conductividad, por lo que uno de los primeros aspectos que están trabajando las empresas relacionadas con estas tecnologías es su eliminación (desarrollo de electrodos secos).

3. PROCESOS NEURONALES DE BASE

Los procesos neuronales se refiere al tipo de pensamiento o actividad mental que la persona está realizando durante el uso de la BCI, la cual genera unos determinados patrones de actividad que son el objetivo a decodificar. Desafortunadamente, a día de hoy las BCIs no invasivas no han alcanzado todavía el punto en el que son capaces de decodificar cualquier pensamiento que esté realizando el usuario. Es decir, aunque a nivel de diseño esto supondría llegar a una BCI completamente operativa, a día de hoy no es posible deducir la intención del usuario de las medidas sensoriales. En realidad el problema está formulado a la inversa, lo cual tiene mucho sentido a nivel investigador. La pregunta es: ¿qué procesos cognitivos se saben medir e identificar de las medidas sensoriales?. Una vez seleccionados, entonces la labor consiste en desarrollar un diseño del sistema que utilice estos procesos, para que una vez que se presenten, la BCI pueda deducir de alguna forma la intención del usuario. En las BCIs actuales, el usuario no se concentra directamente en la tarea que lleva a cabo, sino que se diseña alguna tarea que utilice procesos cognitivos conocidos y que se saben medir, para

que de su identificación se deduzca la intención del usuario. Por eso mismo, las BCIs actuales **no son interfaces naturales** para los usuarios y el desarrollo de las mismas es el último objetivo de todas las investigaciones que se están llevando a cabo en este campo.

Un ejemplo ilustrativo es el desarrollo de una BCI para escribir con el pensamiento. Una interfaz hombre-máquina de uso natural para el hombre sería aquel en el que la persona piensa en escribir una letra y la máquina la identifica y la escribe. Los interfaces actuales como el teclado no son naturales dado que se interacciona con la máquina por medio de pulsaciones en un sitio determinado (tecla) para conseguir el efecto deseado. Con mucho entrenamiento se puede llegar a crear un aprendizaje de la tarea, pero no es la forma natural de comunicación de escritura. De la misma forma, los diseños actuales de BCIs para escribir con el pensamiento crean un canal de comunicación entre la máquina y la persona a través del pensamiento, pero no de forma natural (et al., 1999; Krusienski *et al.*, 2006). Para ello se hace uso de potencial conocido denominado P300 (Picton, 1992), el cual se manifiesta como una deflexión positiva en el potencial medido en el EEG, en la zona parietal a una latencia de aproximadamente 300ms tras la aparición del estímulo deseado, dentro de una secuencia aleatoria de estímulos. En este caso, los estímulos se corresponden con la presentación de letras en la pantalla. De una forma muy simplificada, el usuario observa la pantalla y se concentra en la letra que quiere escribir. El sistema presenta las letras en orden aleatorio mientras monitoriza el EEG, y cuando se detecta el potencial P300, el sistema obtiene la letra en la que el usuario está pensando, dado que se corresponde con la que se mostró unos 300ms antes. La BCI deduce de un proceso neuronal directamente la letra que la persona tiene intención de escribir, pero el proceso neuronal no representa directamente la intención del usuario, por lo que no es natural. Notar que el sistema de escritura se basa en un proceso cognitivo que genera un potencial conocido y que se sabe identificar de las medidas sensoriales (el potencial P300). Entonces, se ha diseñado un sistema de presentación de letras para obtener ese potencial y que su identificación refleje la intención del usuario. Esta metodología de diseño es la que se sigue a día de hoy en todas las BCIs no invasivas.

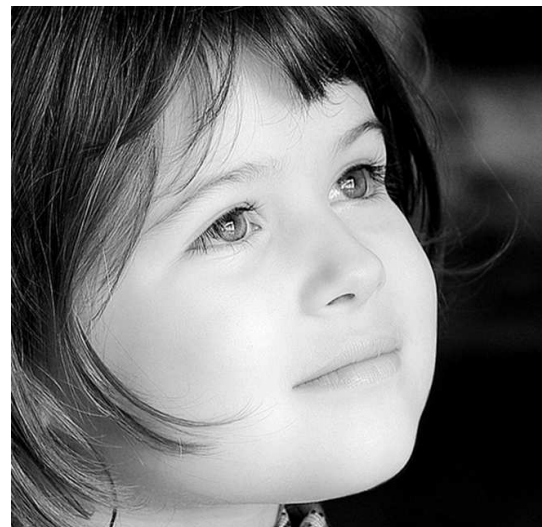


Figura 7. Un aspecto básico de una BCI es el tipo de pensamiento a decodificar.

Existen dos grandes tipos de interfaces cerebro-ordenador basados en dos tipos de paradigmas neuronales: (a) aquellos basados en una **respuesta evocada** a estímulos externos (eventos) (Farwell and Donchin, 1988; et al., 1999; J.D.Bayliss and D.H.Ballard, 2000); y (b) aquellos que están controlados por una **modulación voluntaria** de la actividad cerebral (J.R.Wolpaw and D.J.McFarland, 2004; J.d.R. Millán, F. Renkens, J. Mouriño, and W. Gerstner, 2004).

Las BCIs de la primera categoría están basadas en los potenciales evocados, que son potenciales que se generan en el cerebro provocados por trenes de estímulos internos o externos. Su naturaleza es una respuesta cerebral evocada o relacionada con eventos que pueden ser visuales, auditivos o somatosensoriales. El funcionamiento de una BCI basada en potenciales evocados es el siguiente. En primer lugar, el usuario centra su atención en una opción concreta. Entonces, un fenómeno de estimulación revisa todas las opciones, y cuando la opción deseada es estimulada, entonces se produce el potencial evocado asociado al evento concreto. En paralelo, las herramientas de señal trabajan para detectar en línea este potencial y así deducir la opción en la que el usuario está concentrado. A estas BCIs se les denomina **síncronas** porque el usuario está sincronizado con la BCI, dado que es la interfaz la que presenta los estímulos a la persona.

El ejemplo previo de escritura con el pensamiento es un ejemplo clásico de BCI en esta categoría. Durante los últimos años se ha utilizado el potencial P300 para realizar BCIs a modo de deletreadores (Guan *et al.*, 2004), buscadores de internet (Karim *et al.*, 2006), sistemas de movimiento de sillas de ruedas (Rebsamen *et al.*, 2007; Iturrate *et al.*, 2009), teleoperación de un robot (Escolano *et al.*, 2009), etc. Otro ejemplo de potencial asociado a evento que se ha empezado a utilizar recientemente son los potenciales de error (Ferrez and Millán, 2008), los cuales aparecen como una deflexión positiva del potencial del EEG en las áreas centrales unos 400ms después de la percepción de que se ha cometido un error propio (Falkenstein *et al.*, 2000), de observación de otros (van Schie *et al.*, 2004), de observación de una máquina (Ferrez and Millán, 2008) e incluso de un robot (I.Iturrate *et al.*, 2010a). Las aplicaciones están relacionadas con utilizar la BCI para corregir sus propios errores mientras se utiliza para escribir con el pensamiento (Seno, 2009), o corregir el movimiento mientras se controla una silla de ruedas (Millán, n.d.). Recientemente se ha demostrado que se pueden usar estos potenciales también para corregir a brazos manipuladores cuando realizan tareas (I.Iturrate *et al.*, 2010a) e incluso se les puede enseñar a realizar tareas en entornos controlados (I.Iturrate *et al.*, 2010b).

La segunda categoría de BCIs están basadas en una modulación voluntaria de la actividad cerebral, la cual genera unos patrones de actividad conocidos o que se pueden medir y distinguir de todo el background del EEG. En estas BCIs hay un proceso intrínseco en el cual la persona aprende a realizar el pensamiento de la forma en la que las máquinas de procesamiento de señal maximicen su reconocimiento (es una respuesta modulada del usuario que mejora progresivamente durante el uso). Una de las BCIs más extendidas se basa en la imaginación motora o *motor imagery* (Wolpaw and McFarland, 2004). Muchos estudios en neuroimagen funcional han demostrado que la imaginación del movimiento está relacionada con la activación de los circuitos neurales involucrados en estadios previos del control motor. Estos circuitos incluyen el área motora suplementaria y la corteza motora primaria entre otras. El funcionamiento de una BCI basado en imaginación motora es el siguiente. El usuario se

concentra imaginándose el movimiento de una de sus extremidades, por ejemplo el pie derecho. Este pensamiento crea una actividad en la corteza motora en la zona relacionada con el pie, que se refleja en una desincronización del EEG en esa zona. Las herramientas de procesamiento de señal detectan esa desincronización, la cual se interpreta como una entrada binaria al sistema. Otro tipo de BCI está basada en tareas mentales (J.d.R. Millán, F. Renkens, J. Mouriño, and W. Gerstner, 2004). En este paradigma, el usuario se concentra en alguna de las tareas mentales predefinidas relacionadas con el lenguaje, el cálculo, la rotación de figuras complejas, etc. Estas tareas activan unas áreas específicas que se pueden identificar aplicando filtros espaciales a la señal, y con ello, deducir la intención del usuario. A estas BCIs se les denomina **asíncronas** dado que es el usuario el que puede decidir cuando enviar un comando a voluntad (de forma asíncrona para el sistema).

Hasta la fecha la imaginación motora ha sido ampliamente utilizada en BCIs para mover un ratón por la pantalla (J.R.Wolpaw and D.J.McFarland, 2004), activar sistemas de estimulación eléctrica funcional (Pfurtscheller *et al.*, 2005) y videojuegos (M. Tangermann, 2009), entre otros. Las tareas mentales se han utilizado fundamentalmente para controlar robots (J.d.R. Millán, F. Renkens, J. Mouriño, and W. Gerstner, 2004) y sillas de ruedas robóticas (Vanacker *et al.*, 2007).

4. MOTOR DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL

Toda BCI tiene asociada un motor de procesamiento de señal encargado de extraer el proceso neural de base de la señal cerebral. Este proceso es totalmente dependiente de la modalidad de medida elegida (sensor) y es la parte más compleja del diseño, dado que como toda interfaz se desea que sea rápida y con una gran precisión. Actualmente esto es un reto dado que las BCIs o son lentas o son poco precisas.



Figura 8. La BCI requiere un profundo entendimiento del procesamiento de señal cerebral.

El procesamiento de señal de la BCI es totalmente dependiente del proceso neural utilizado de base, en particular de si son potenciales evocados o actividad espontánea. Sin embargo, el problema de obtener información de la actividad cerebral tiene de forma intrínseca las siguientes dificultades. En primer lugar los **artefactos**, que es actividad eléctrica presente en el EEG pero que no tiene su origen en el cerebro. El movimiento de los ojos, de la lengua, de los músculos del cuerpo, etc; crea una actividad que puede aparecer en el EEG. Su presencia tiene dos dificultades. La primera es que los procesos cerebrales a decodificar pueden verse afectados o incluso eliminados por la actividad de los artefactos; y la segunda es que puede darse

el caso en el que las herramientas de procesamiento aprendan a identificar la actividad de los artefactos como la objetivo a decodificar. En segundo lugar la actividad medida en el EEG tiene una naturaleza **no estacionaria**, lo que hace que varíe en el tiempo para una misma persona durante el uso de la BCI y entre diferentes sesiones. Esto dificulta enormemente las estrategias de procesamiento de señal que deben de ser capaces de adaptarse en línea durante cada sesión, y recalibrarse antes de empezar una nueva sesión. El tercer aspecto es que todas las personas tenemos una actividad cerebral **diferente** en los dominios temporales, frecuenciales y espaciales. Las herramientas de señal que se utilizan han de tener la capacidad de aprender a identificar los patrones de cada persona en particular basándose en fenómenos de autocalibración.

El grueso de investigación que se está realizando en BCIs no invasivas está centrado en alguna de estas tres áreas, con el objetivo de filtrar mejor los artefactos, desarrollar sistemas que se adapten automáticamente durante la ejecución, y en disminuir el tiempo de calibración de las herramientas para adaptarlas a cada individuo en particular.

5. APLICACIONES

Muchas son las aplicaciones en las que uno puede pensar en relación con esta tecnología, algunas de las cuales vienen representadas en la Figura 9. Una de las primeras que aparece es el **control de videojuegos** por medio de la BCI y así por medio del pensamiento (Nijholt, 2008). El salto cualitativo obtenido por el uso de la BCI en estas tecnologías es enorme, por lo que se espera un gran retorno por el volumen de negocio que maneja este mercado. Además, los estudios de mercado señalan que éste será el canal por el que primero se introducirá esta tecnología. Esto se debe a que los usuarios de videojuegos son un colectivo muy amplio, son muy tolerantes con cualquier tecnología (se espera que en sus fases más primitivas con una baja robustez y precisión), y además son usuarios que pasan muchas horas utilizándola (lo que los convierte en testadores de la misma). De hecho, los primeros prototipos comerciales de interfaz cerebro-computador (Emotiv³ y NeuroSky⁴) están persiguiendo de forma muy agresiva este mercado.

Recuperar o sustituir funciones humanas motoras ha sido uno de las áreas más fascinantes pero frustrantes de investigación del último siglo. La posibilidad de interconectar el sistema nervioso humano con un **sistema robótico o mecatrónico**, y usar este concepto para recuperar alguna función motora, ha fascinado a los científicos durante años. El paradigma típico de trabajo es un paciente con una lesión medular grave o una enfermedad neuromuscular crónica que interrumpe el flujo de información

neural motora hacia las extremidades del cuerpo. Uno de los aspectos que ha permitido estos desarrollos ha sido el avance en tecnología BCI dado que son sistemas que permiten traducir en tiempo real la actividad eléctrica resultado del pensamiento en órdenes para controlar directamente dispositivos. Esto ofrece un canal de comunicación directa desde el sistema nervioso central con los dispositivos, evitando el uso de los caminos neuronales que ya no pueden ser utilizados normalmente debido a la presencia de enfermedades neuromusculares graves, tales como la esclerosis lateral amiotrófica, infarto cerebral, parálisis cerebral o lesiones en la columna vertebral. Por otro lado, la robótica ha avanzado enormemente en los últimos años en diferentes materias como los sensores, actuadores, capacidad de procesamiento y autonomía. Esto ha proporcionado entidades físicas con diferentes grados de inteligencia embebida en un escenario concreto; preparadas para percibir, manipular, explorar, navegar e interactuar con el entorno. La sinergia de ambos campos ha abierto un amplio abanico de posibilidades en términos de investigación para la recuperación o sustitución de capacidades humanas en contextos asistenciales y de rehabilitación. Algunos ejemplos en esta línea incluyen el control de robots (J.d.R. Millán, F. Renkens, J. Mouriño, and W. Gerstner, 2004), control de sillas de ruedas (Vanacker *et al.*, 2007; Ferreira *et al.*, 2007; Rebsamen *et al.*, 2007; Luth *et al.*, 2007; Iturrate *et al.*, 2009), los sistemas de telepresencia robótica (Escolano *et al.*, 2009), y los brazos manipuladores (A. Ferreira, 2006; I.Iturrate *et al.*, 2010b).

Actualmente, se está realizando mucha investigación en lo que se ha denominado los **ambientes inteligentes**. Estos involucran una inteligencia empotrada en el mismo entorno capaz de interactuar con el usuario de una manera autónoma, con el fin de facilitar la vida a las personas en diferentes campos. Uno de los aspectos clave de esta interacción son las interfaces hombre máquina que incluyen dispositivos vestibles o presentes en el propio entorno, y que miden aspectos que después se reflejan en la adaptabilidad del mismo entorno. Entre ellos se incluyen modificar la iluminación, calefacción, alarmas o subir/bajar persianas, etc. La BCI en este contexto proporciona un canal de comunicación directo con el ambiente para realizar órdenes de control sobre el mismo (Garipelli *et al.*, 2008), y a su vez podría proporcionar información sobre el estado cognitivo y emocional de los usuarios, con lo que el entorno podría tomar decisiones más inteligentes adecuadas a cada persona. Este tipo de dispositivos están muy enfocados hacia la domótica pero también hacia las personas con discapacidad, en donde el uso de este canal de comunicación con la vivienda es más necesario.

La suplantación de la propia persona es una dirección lógica a la que se tiende en el mundo de internet, el cual permite estar presente en cualquier sitio con la única necesidad de tener disponible un ordenador y una conexión a la red. La internet está plagada de salas de usuarios de chats en las que uno puede ser quien quiere o puede sin la necesidad de estar presente. A su vez, ya es común usar espacios de internet como *Second Life* para realizar reuniones privadas o incluso de trabajo. La suplantación de la propia persona en entornos virtuales es un paso lógico hacia la **telepresencia** tanto lúdica como laboral. Sin embargo, todos los sistemas de control de telepresencia virtual comparten la misma característica: son fríos. Es decir, no tienen ninguna información ni cognitiva ni afectiva del usuario que los está usando. Si la persona está triste activa el icono que representa este estado, pero no hay ninguna forma de que el sistema deduzca esta información de la persona

³ Fuente Ojo Internet (20 Diciembre 2008): Emotive Communications, un proveedor de entretenimiento móvil, ha recibido una segunda ronda de inversión de 6,25 millones de dólares a principios de esta semana. La financiación le ha dado el empuje necesario para adquirir la compañía Sennari Entertainment, desarrolladora de juegos para móviles y servicios de micro-pagos. El precio de la operación no ha sido divulgado, pero Sennari había recibido unos 17 millones de dólares en financiación hasta la fecha. Por su parte, Emotive había recibido previamente 7,7 millones de dólares. Entre sus inversores se incluyen Mayfield Fund, D.E. Shaw Group y Bertelsmann Digital Media Investments.

⁴ Fuente Forbes.com (25 Marzo 2009): Tan imperfecta como las tecnologías de ambas empresas puede ser, cada uno de ellos han encontrado fondos de riesgo real. NeuroSky dice que recibió un total de 7,7 millones de dólares en inversiones, pero no quiso revelar los inversores. Emotiv ha dado con 15 millones de dólares en fondos de Technology Venture Partners, Epicure Capital Partners, Stillwater Capital y el gobierno federal de Australia.

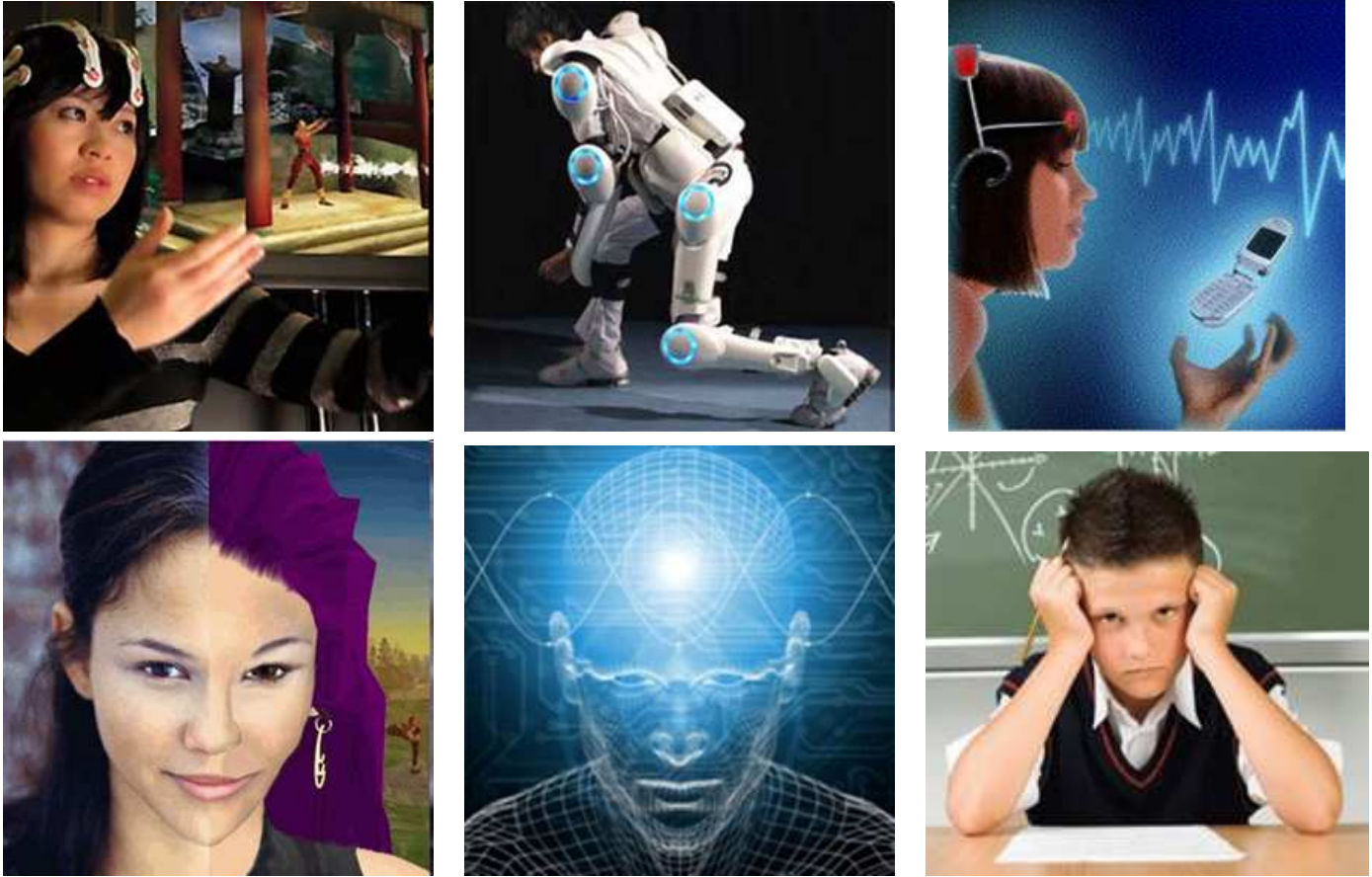


Figura 9. Algunos de los múltiples campos actuales de trabajo en aplicaciones de las interfaces BCI: videojuegos (prototipo de gorro de Emotiv), robótica orientada a la rehabilitación (exoesqueleto robótico de Cyberdyne), interacción con dispositivos móviles (prototipo de gorro de NeuroSky), suplantación de la personalidad por realidad virtual, biometría, y mejora de las capacidades humanas o tratamiento de trastornos (neurofeedback).

en sí. En principio, la BCI puede tener acceso a ese tipo de información con lo que permitiría cambiar totalmente la forma en la que interactuamos con las personas en cualquier entorno virtual. Ya se han realizado los primeros prototipos de control de movimiento de avatares en entornos como *Second Life* con movimientos muy simples Castro-Perea (2007) y monitorizado aspectos como la atención durante su uso (Rebolledo-Mendez and de Freitas, 2008). Los siguientes pasos serán mejorar el tipo de control hacia más natural y usar esa información cognitiva del usuario durante la interacción.

La **biometría** es el estudio de métodos automáticos para el reconocimiento único de humanos basados en uno o más rasgos conductuales o físicos intrínsecos, es decir identificación. En un contexto informático, se realiza mediante la aplicación de técnicas matemáticas y estadísticas sobre los rasgos físicos o de conducta de un individuo, para verificar identidades o para identificar individuos. Dentro de las características están las físicas (las huellas dactilares, las retinas, el iris, los patrones faciales, de venas de la mano o la geometría de la palma de la mano) y las de comportamiento (la firma o el paso). Los desarrollos en tecnología video digital, infrarrojos, rayos X, tecnologías inalámbricas, ADN, dotan al sistema con nuevos métodos para buscar e investigar bastas bases de datos individuales y colectivas de información sobre la población en general. Una de estas nuevas tecnologías es la identificación y uso de las ondas cerebrales por medio de una BCI para

reconocimiento único de rasgos humanos, denominado autenticación (M. Poulos and Evangelou, 1999; Palaniappan and Ravi, 2003; Paranjape *et al.*, 2001). Muy relacionado con este aspecto está la seguridad y almacenamiento de la información, cuyo acceso se realiza previa autenticación (muchas de la información que manejamos diariamente está protegida con una contraseña). Una aplicación de la BCI que se ha comenzado a explorar recientemente está en la autenticación, en donde la contraseña personal es un conjunto de pensamientos (Marcel and Millan, 2007).

El **neurofeedback**, también denominado neuroterapia, es una técnica que se basa en medir la actividad cerebral y enseñar a las personas su propia regulación por aprendizaje condicionado. Los fundamentos del neurofeedback están en la neurociencia básica y aplicada, y en la práctica clínica. El principio básico que rige esta aplicación es el de medir la actividad cerebral e identificar, gracias a un procesado del EEG, los patrones a potenciar del usuario. Si los patrones que reflejan la actividad cerebral son los adecuados, al individuo se le da un feedback positivo (visual, auditivo o somatosensorial), mientras que si no son los adecuados el feedback positivo se inhibe. De esta forma, por aprendizaje condicionado, se entrena el cambio en la actividad cerebral en la dirección que desea el terapeuta. El objetivo final es que los cambios en los patrones de actividad cerebral se reflejen en una mejora del comportamiento (en el caso de trastornos neurológicos) o una mejora de las

capacidades personales (en el caso de neurofeedback dirigido a personas sanas). El principio básico del neurofeedback fue revelado a finales de los años sesenta por el Prof. Sterman con su investigación en gatos, ver revisión en (Sterman, 1996).

En este contexto hay dos grandes ramas de aplicación. En primera instancia está la dirigida al tratamiento de enfermedades neurológicas, en la cual se han tratado trastornos como el déficit de atención, la epilepsia, el autismo, la lesión cerebral traumática; aunque sólo los tratamientos para el déficit de atención (Strehl *et al.*, 2006; Leins *et al.*, 2006) y de la epilepsia han mostrado mejoras en el comportamiento de los pacientes con consolidación de las mismas a largo plazo (Sterman, 2006). Aun así, dado el diseño intrínseco que tienen todos estos estudios, su aceptación médica se enfrenta a la gran dificultad de pasar los tests de placebo y los estudios double-blind, lo que hace difícil que estas terapias suban en las escalas de tratamiento médico. Recientemente se ha publicado un estudio en la revista de mayor factor en psicología y psiquiatría infantil que demuestra la efectividad del neurofeedback como tratamiento del déficit de atención en niños, superando uno de estos escollos (H. Gevensleben, 2009). En segunda instancia, se están utilizando estas estrategias para mejorar las capacidades de personas sanas en el empeño de tareas. En este caso se trabajan aspectos como la ejecución más eficiente, el autocontrol, el mantenimiento de estados de gran concentración ó foco, etc). Estos tratamientos están dirigidos a personas como atletas de élite y se han denominado de *peak performance* (Vernon, 2005).

El trabajo en el área de neurofeedback a día de hoy no necesita sofisticadas herramientas de procesamiento de señal, sin embargo la dirección en investigación en esta línea tenderá a converger con la BCI en materias de individualización de las terapias y en la adaptación de las mismas para favorecer el aprendizaje de los patrones deseados.

Las aplicaciones nombradas son un ejemplo del amplio rango de posibilidades que abre esta tecnología. Se han dejado de nombrar otras muchas que se irán describiendo más adelante en el curso.

6. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

En 2007 se creó un **panel de expertos** para estudiar el estado de la tecnología BCI en el mundo (Berger *et al.*, 2007). Se identificaron los siguientes aspectos. En primer lugar hay esfuerzos en esta línea muy significativos en Estados Unidos, en Europa y en Asia, donde claramente la cantidad de investigación en esta materia es a aumentar. En segundo lugar, el estado actual de la BCI está, si no apunta, ya entrando en la generación de dispositivos médicos, aunque se espera que tenga una fuerte aceleración en áreas no técnicas y en entornos más comerciales como son los videojuegos, la industria de la automoción y la robótica. En tercer lugar, los esfuerzos investigadores están orientados hacia tecnologías invasivas en los Estados Unidos, las no invasivas en Europa, y la sinergia entre los dos tipos de interfaces y la robótica en Japón.

En términos de **financiación**, en Europa se están proponiendo y desarrollando una gran cantidad de programas en gran medida orientados a dispositivos robóticos controlados con la BCI. El rango de financiación para estas iniciativas es multidisciplinar y multinacional (en los que están involucrados diferentes tipos de laboratorios), lo que hace que se logren amplios márgenes de financiación en relación a los programas Estadounidenses



Figura 10. Estado de la financiación y relación de programas en el mundo.

y Canadienses. En el caso de los Estados Unidos, se han empujado programas para desarrollar prótesis neurales y BCIs, sin embargo los fondos privados todavía no han tenido el impacto necesario para hacerse significativos. En esta línea, se han lanzado iniciativas de financiación para apoyar empresas innovadoras y de transferencia de tecnología, pero se está lejos de llegar a prototipos para comercializar. En el caso de Asia y en particular de China, se ha invertido en programas de ciencias biológicas y de ingeniería, lo que ha hecho crecer la inversión en BCI y en áreas relacionadas. En el caso de Japón, se está incrementando en gran medida los programas en institutos y laboratorios orientados hacia la inversión en BCI. En particular, Japón está enfocándose hacia aplicaciones no médicas siempre en relación con programas de robótica (para rentabilizar la gran inversión que se ha hecho en los últimos 15 años en esta disciplina).

Enfocando la atención en Europa, el programa director de la investigación en los próximos años es el **VII Programa Marco de la EU** (2007-2013). En relación con las TIC *Information and Communication Technologies* en el programa de trabajo, el *Challenge 7: ICT for Independent Living, Inclusion and Governance* reserva el *Challenge 7.2* exclusivo para las interfaces BCI no invasivas.

ICT restoring and augmenting human capabilities compensating for people with reduced motor functions or disabilities: Radically new ICT-enabled approaches to restore and augment the ability of people in their daily life with a focus on reduced motor functions. Research should aim for breakthroughs in the way humans interact with computers and how they may overcome their disability and augment their capabilities.

The research should build on progress in non-invasive sensor and actuator concepts for brain / neuronal-computer interaction (BNCI), smart biosensors, self-learning / adaptive systems and advanced signal processing.

Emphasis is put on smart system solutions compensating for limited signal bandwidth that combine 1) design of HW/SW architectures including BNCI and different multi-sensor interfaces 2) programming abstraction and support tools to facilitate modularity and flexible integration 3) advanced sensing and control in real user environments at home or at work. This should open up possibilities for flexible usage in different application areas, in particular for individuals with disabilities. Possible

spill-over into mainstream applications should also be considered.

La Comisión Europea está solicitando proyectos que construyan las bases de la interacción hombre máquina basadas en BCIs no invasivas y en todas las herramientas periféricas de interacción, siempre en un contexto de rehabilitación para restauración o rehabilitación motora. Esta iniciativa está respaldada por 33 millones de euros de financiación a lo largo de la duración del programa. Algunos de los proyectos relacionados con BCI son:

- El **BRAIN2ROBOT** fue un proyecto financiado por el VI Programa Marco por medio de una Marie Curie Excellence Grant. El objetivo de este proyecto fue integrar la tecnología BCI con la tecnología de un *eye tracker*⁵ para mover un brazo robótico asistente de una persona discapacitada en tareas diarias. El concepto es el desarrollo de un sistema en el que el usuario mira a donde quiere dirigir el brazo y la posición se deducía con la información del *eye tracker*. El movimiento se iniciaba con la BCI (en particular con un protocolo de imaginación motora).
- Un gran proyecto del VII Programa Marco es **TOBI** (*Tools for brain-computer interaction*), el cual está orientado a desarrollar tecnología práctica para el desarrollo de prototipos orientados a BCIs no invasiva, que además se puedan combinar con otro tipo de tecnologías de asistencia, para mejora de la calidad de vida de gente con discapacidad motora y la efectividad de su rehabilitación. El enfoque de aplicación de las BCI es hacia la comunicación y el control, a la sustitución de movimiento, entretenimiento y la recuperación motora. La financiación global de este proyecto es de 12 millones de euros a 5 años.
- Otro proyecto del VII Programa Marco relacionado es **BRAIN** (*BCIs with rapid automated interfaces for non-experts*), el cual está orientado al desarrollo de interfaces cerebro-computador para personas no expertas con equipamiento muy básico y sencillo de utilizar. El objetivo es desarrollar herramientas de asistencia práctica para mejorar la inclusión de personas con un amplio rango de discapacidades. La financiación es de 2.7 millones a 3 años.
- El objetivo del proyecto **BETTER** (*BNCI-driven robotic physical therapies in stroke rehabilitation of Gait disorders*), el cual está enfocado hacia mejorar las terapias de rehabilitación física de desórdenes de la marcha para personas que han sufrido accidentes vasculares, gracias al uso de las BCIs. El proyecto validará técnica, funcional y clínicamente la idea de mejorar la rehabilitación del stroke con exoesqueletos. Financiación de 2.95 millones de euros a 3 años.
- El proyecto **HIVE** (*Hyper interaction viability experiments*) está orientado, no en construir BCIs para comunicar con los computadores sino al contrario, en que los computadores dirijan la estimulación en el cerebro. La idea es desarrollar paradigmas para diseñar, desarrollar y testear una nueva generación de tecnologías no invasivas de estimulación del cerebro. Financiación de 2.3 millones de euros a 4 años.
- El proyecto **TREMOR** (*An ambulatory BCI-driven tremor suppression system based on functional electrical stimulation*) trata de validar técnica, funcional y clíni-

camente un nuevo concepto de sistema para reducir el temblor por medio de estimulación eléctrica funcional de los músculos. Financiación de 2.14 millones de euros a 3 años.



Figura 11. Distribución geográfica de la investigación y desarrollo de BCI en el mundo.

En Europa los grupos de investigación más relevantes en BCI con su perfil investigador pueden distribuirse de la siguiente forma:

- **Berlin, Alemania:** El BCCI de Berlín tiene un perfil muy marcado de machine learning en el que se están desarrollando sofisticadas herramientas matemáticas de procesamiento de señal para tratar el EEG. El objetivo es reducir al máximo si no a cero los tiempos de entrenamiento y calibración de los aparatos, y los efectos de la no estacionariedad de la señal en el tiempo. Fueron pioneros y actualmente la referencia en el desarrollo de herramientas de tratamiento del EEG para sistemas BCI.
- **Graz, Austria:** El grupo de Graz es uno de los líderes europeos en BCI que combina los estudios neuropsicológicos con el desarrollo de potentes herramientas de procesamiento de señal para EEG. Han trabajado en todos los aspectos de la BCI y aplicado el conocimiento a deletreadores, juegos, estimulación eléctrica funcional, realidad virtual y recientemente a rehabilitación por neurofeedback.
- **Tubingen, Alemania:** El grupo de Tubingen lidera la investigación en la aplicación de estas tecnologías a pacientes con parálisis cerebral y esclerosis amiotrófica lateral. Este grupo construyó uno de los primeros sistemas no invasivos de comunicación para pacientes reales y tiene mucha experiencia también en neuro-psicopsiología. Este grupo tiene una de las pocas publicaciones de BCI en Nature (et al., 1999).
- **EPFL, Suiza:** El grupo de la EPFL tiene gran experiencia en el uso de la BCI para aplicaciones más tecnológicas, en particular para el uso en inteligencia ambiental, en biometría, y en control de sistemas para rehabilitación como sillas de ruedas o robots. Este grupo de investigación fué el primero en demostrar el control efectivo de un robot con el pensamiento (J.d.R. Millán, F. Renkens, J. Mouriño, and W. Gerstner, 2004) y fueron los primeros

⁵ Un eye tracker es una tecnología que permite hacer un seguimiento del iris para deducir dónde está mirando la persona. Suelen estar basados en infrarrojos.

en construir la primera silla funcional controlada por la BCI (Vanacker *et al.*, 2007).

- **Fondazione Santa Lucia, Italia:** El grupo del hospital Santa Lucía tiene un perfil muy aplicado a rehabilitación motora. El grupo está muy orientado al desarrollo de tecnologías BCI para su aplicación en pacientes, estandarización, etc. Es un equipo de profesionales fuertemente multidisciplinar en donde se promueve el uso de la BCI como herramienta de validación (evaluación), como herramienta de rehabilitación en términos de sustitución (por ejemplo en comunicación y entretenimiento) o recuperación funcional (rehabilitación).

7. CONCLUSIONES

En este documento se ha introducido la tecnología de interfaces cerebro computador desde un punto de vista tecnológico. En primer lugar se ha introducido la tecnología de interfaz cerebro computador dentro de su contexto actual, se han identificado las partes de una BCI y las problemáticas tecnológicas e investigadoras asociadas a cada una de ellas. En segundo lugar se ha revisado un panorama actual de aplicaciones presentes y futuras orientado hacia las ingenierías. Finalmente se han desglosado mecanismos de financiación Europeos y los grupos de investigación más relevantes.

REFERENCIAS

- A. Ferreira, T.F. Bastos-Filho, M. Sarcinelli-Filho F.A. Cheein J.F. Postigo R. Carelli (2006). Teleoperation of an Industrial Manipulator Through a TCP/IP Channel Using EEG Signals. In: *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2006)*. pp. 3066–3071.
- Berger, T.W., J.K. Chapin, G.A. Gerhardt, D.J. McFarland, J.C. Principe, W.V. Soussou, D.M. Taylor and P.A. Tresco (2007). International assessment of research and development in brain-computer interfaces. In: *WTEC Panel Report*.
- Castro-Perea, O. (2007). Ya es posible vivir en second life sólo con el pensamiento. *Tendencias* 21.
- Escolano, C., J. Antelis and J. Minguez (2009). Human Brain-Teleoperated Robot between Remote Places. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- et al.*, N. Birbaumer (1999). A spelling device for the paralyzed. *Nature* **398**, 297–298.
- Falkenstein, M., J. Hoormann, S. Christ and J. Hohnsbein (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: A tutorial. *Biological Psychology* **51**, 87–107.
- Farwell, L.A. and E. Donchin (1988). Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing eve brain potentials. *EEG Clinical Neurophysiology* **70**(6), 510–23.
- Ferreira, A., R.L. Silva, W.C. Celeste, T.F. Bastos and M. Sarcinelli (2007). Human-Machine Interface Based on Muscular and Brain Signals applied to a Robotic Wheelchair. *IOP Publishing Ltd.* **07**, 1541–1672.
- Ferrez, P.W. and J.d.R. Millán (2008). Error-related eeg potentials generated during simulated brain-computer interaction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **55**(3), 923–929.
- Garipelli, G., F. Galán, R. Chavarriaga, P.W. Ferrez, E. Lew and J.R. Millán (2008). *The use of brain-computer interfacing for ambient intelligence*. LNCS, Springer Verlag.
- Guan, Cuntai, M. Thulasidas and Jiankang Wu (2004). High performance P300 speller for brain-computer interface. *Biomedical Circuits and Systems, 2004 IEEE International Workshop*.
- H. Gevensleben, B. Holl, B. Albrecht C. Vogel D. Schlamp O. Kratz P. Studer A. Rothenberger G.H Moll H. Heinrich (2009). Physiological origins and functional correlates of eeg rhythmic activities: implications for self-regulation. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* **50**(7), 780–789.
- I. Iturrate, L. Montesano and J. Minguez (2010a). Robot Reinforcement Learning using EEG-based reward signals. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- I. Iturrate, L. Montesano and J. Minguez (2010b). Robotic Arm Task Learning using EEG Brain Activity Elicited During Observation of Robot Operation. In: *Robotics: Science and Systems*.
- Iturrate, I., J. Antelis, A. Kuebler and J. Minguez (2009). Non-Invasive Brain-Actuated Wheelchair based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation. *IEEE Transactions on Robotics* **25**(3), 614–627.
- J.D. Bayliss and D.H. Ballard (2000). Recognizing evoked potentials in a virtual environment. *NIPS*.
- J.d.R. Millán, F. Renkens, J. Mouriño, and W. Gerstner (2004). Noninvasive Brain-Actuated Control of a Mobile Robot by Human EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*.
- J.R. Wolpaw and D.J. McFarland (2004). Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans. *Proc Natl Acad Sci USA* **101**(51), 17849–54.
- Karim, A.A., T. Hinterberger and J. Richter (2006). Neural Internet: Web Surfing with Brain Potentials for the Completely Paralyzed. *Neurorehabilitation and Neural Repair* **20**(4), 508–515.
- Krusienski, D. J., E. W. Sellers, F. Cabestaing, S. Bayoudd, D. J. McFarland, T. M. Vaughan and J. R. Wolpaw (2006). A comparison of classification techniques for the P300 Speller. *Journal of Neural Engineering* **3**, 299–305.
- Leins, U., G. Goth, T. Hinterberger, C. Klinger, N. Rumpf and U. S. (2006). Neurofeedback for children with adhd: A comparison of scp and theta/beta protocols. (2), 73.
- López-Muñoz, F., J. Boya and C. Alamo (2006). Neuron theory, the cornerstone of neuroscience, on the centenary of the nobel prize award to santiago ramón y cajal. *Brain Research Bulletin* **70**(4-6), 391 – 405.
- Luth, T., D. Ojdanic, O. Friman, O. Prenzel and A. Graser (2007). Low level control in a semi-autonomous rehabilitation robotic system via a Brain-Computer Interface.
- M. Poulos, M. Rangoussi, V. Chrissicopoulos and A. Evangelou (1999). Person identification based on parametric processing on the eeg. *Proceedings of the Sixth International Conference on Electronics, Circuits and Systems* p. 283.
- M. Tangermann, M. Krauledat, K. Grzeska M. Sagebaum C. Vidaurre B. Blankertz K-R. Müller (2009). Playing pinball with non-invasive bci. In: *Neural Information Processing Systems (NIPS)*.
- Marcel, S. and J.R. Millan (2007). Person authentication using brainwaves (EEG) and maximum a posteriori model adaptation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - Special Issue on Biometrics*.
- Millán, J.d.R. (n.d.). *Interfaces Cerebrales*.
- Nijholt, A. (2008). Bci for games: A 'state of the art' survey. *Lecture Notes in Computer Science*.

- Palaniappan, R. and K.V.R. Ravi (2003). A new method to identify individuals using signals from the brain. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Communications and Signal Processing* p. 15.
- Paranjape, R.B., J. Mahovsky, L. Benedicenti and Z. Koles (2001). The electroencephalogram as a biometric. *Proceedings of the Canadian Conference On Electrical And Computer Engineering* p. 1363.
- Pfurtscheller, Gert, Gernot R. Müller-Putz, Jörg Pfurtscheller and Rüdiger Rupp (2005). Eeg-based asynchronous bci controls functional electrical stimulation in a tetraplegic patient. *EURASIP J. Appl. Signal Process.* **2005**, 3152–3155.
- Picton, T.W. (1992). The p300 wave of the human event-related potential. *Journal of Clinical Neurophysiology*.
- Rebolledo-Mendez, G. and S. de Freitas (2008). Attention modeling using inputs from a Brain Computer Interface and user-generated data in Second Life. In: *Workshop of Affective Interaction in Natural Environments (AFFINE) 2008*.
- Rebsamen, B., C.L. Teo, Q. Zeng, M.H. Ang, E. Burdet, C. Guan, H. Zhang and C. Laugier (2007). Controlling a Wheelchair Indoors Using Thought. *IEEE Intelligent Systems* **07**, 1541–1672.
- Seno, B. Dal (2009). Toward An Integrated P300- And ErrP-Based Brain-Computer Interface. PhD thesis. Politecnico di Milano.
- Sokoloff, L. (1989). Circulation and energy metabolism of the brain. *Basic Neurochemistry* p. 565.
- Sterman, M.B. (1996). Physiological origins and functional correlates of eeg rhythmic activities: implications for self-regulation. *Biofeedback Self Regulation* **21**(1), 3–33.
- Sterman, M.B. (2006). Foundation and practice of neurofeedback for the treatment of epilepsy. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* (1), 21.
- Strehl, U., U. Leins, G. Goth, C. Klinger and T. Hinterberger (2006). Self-regulation of slow cortical potentials: A new treatment for children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Pediatrics*.
- van Schie, H.T., R.B. Mars, M.G.H Coles and H. Bekkering (2004). Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during error observation. *Neural Networks* **7**, 549–554.
- Vanacker, G., J.d.R.Millán, E. Lew, P. W.Ferrez, F.G. Moles, J. Philips, H. V. Brussel and M.Ñuttin (2007). Context-Based Filtering for Assisted Brain-Actuated Wheelchair Driving. *Computational Intelligence and Neuroscience*.
- Vernon, D. (2005). Can neurofeedback training enhance performance? an evaluation of the evidence with implications for future research. (4), 347.
- Wolpaw, J. R. and D. J. McFarland (2004). National Academy of Sciences of the United States of America. In: *Robotics: Science and Systems*.