

VARIABLES PSICOLÓGICAS EN EL CONTROL DE INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA

Leandro da Silva Sauer, Luis Valero Aguayo, Francisco Velasco Álvarez y Ricardo Ron Angevin
Universidad de Málaga

BCI (Brain Computer Interface) es un sistema que permite la interacción entre el cerebro humano y un ordenador. Se basa en el análisis de señales electroencefalográficas (EEG) y el procesado de éstas para generar comandos de control. En el estudio se analizó la posible influencia de variables psicológicas como la capacidad imaginativa sinestésica y la ansiedad en relación al desempeño en un BCI. Todos los participantes (4 hombres y 19 mujeres estudiantes) realizaron los cuestionarios y una sesión de BCI para controlar con sus señales EEG un entorno virtual de un coche por una carretera recta. El grupo se dividió en dos subgrupos en función de que sus señales EEG consiguieran o no respuestas diferenciales en esa discriminación izquierda-derecha. Los resultados del estudio no mostraron diferencias significativas en las variables cognitivas de imaginación, ni tampoco en ansiedad. Al comparar ese grado de control BCI de los participantes se encontró un nuevo parámetro cuantitativo que permite comparar ejecuciones y tomar decisiones en el procesado de señales. Se discuten los hallazgos, el proceso de investigación en marcha para refinar el control de un BCI y la interacción de procedimientos psicológicos e informáticos.

Psychological variables in the control of brain-computer interfaces. BCI (Brain-Computer Interface) is a system that allows interaction between the human brain and a computer. It is based on analyzing electroencephalographic signals (EEG) and processing them to generate control commands. The study analyzed the possible influence of psychological variables, such as the imaginative kinesthetic capacity and anxiety, in relation to performance in a BCI. All participants (4 male and 19 female students) completed the questionnaires and carried out a session of BCI to control their EEG signals in a virtual setting of a car along a straight road. The group was divided into two subgroups according to their EEG signals or differential responses obtained in the left-right discrimination. Study results showed no significant differences in cognitive variables of imagination or in anxiety. By comparing the degree of participants' BCI control, a new quantitative parameter for comparing performances and making decisions in signal processing was found. The findings, the ongoing research process to refine the control of a BCI, and the interaction of psychological and computer procedures are discussed.

Actualmente los avances de las tecnologías proporcionan una importante ayuda en todas las áreas de la ciencia, además de llegar prácticamente a todos los ámbitos de la vida cotidiana. Se han aplicado a la Psicología nuevas tecnologías en el ámbito experimental, educativo, social, psicométrico y clínico (Bornas, Rodrigo y Barceló, 2002). Junto a los avances técnicos para beneficiar la vida cotidiana han surgido nuevas aplicaciones en distintas áreas de la ciencia, como ejemplo, prácticas complementarias en el futuro de los tratamientos psicológicos con nuevas tecnologías.

Por ejemplo, se sabe que la realidad virtual y la realidad aumentada se muestran eficaces a través del desarrollo de *hardware* avanzados y *software* que ofrecen ambientes propicios para la mayoría de los tratamientos psicológicos. Las técnicas basadas en estas tecnologías consiguen resultados iguales o superiores a los

tratamientos clínicos de primera opción (Botella, García-Palacios, Baños y Quero, 2007; Gutiérrez, 2002).

El desarrollo de un interfaz entre el cerebro humano y un sistema artificial, tal como una computadora, no es un propósito reciente, aunque en los últimos años se ha producido un interés creciente por lograr este objetivo. En el futuro, una de las aplicaciones más importantes de los BCIs podría darse en el campo de la salud y más concretamente en la rehabilitación, contribuyendo al establecimiento de un canal de comunicación y control para aquellos individuos con importantes deficiencias en sus funciones motoras pero que no presentan trastornos a nivel cerebral (Birbaumer, 2006).

Una de las particularidades de este tipo de interfaces es que son capaces de determinar un estado neuronal general a partir de las señales EEG disponibles, pudiendo de esta forma proveer a un sujeto de un alfabeto mínimo de comunicación, básicamente como activación/desactivación de una zona cerebral o de una frecuencia de onda determinada. Para lograr este propósito con cierto éxito es necesario que el sistema discrimine al menos dos señales bioeléctricas diferentes. Las señales EEG en el sistema BCI pueden ser obtenidas a través de la realización de distintas tareas mentales, bien imaginando actividades o situaciones determinadas (Neuper, Sherer, Wriessnegger y Pfurtscheller, 2009).

Los sistemas BCI pueden ser exógenos (los estímulos de la señal EEG son externos a la persona) y endógenos (los estímulos parten de la persona). Uno de los tipos de señales que se pueden procesar en los sistemas endógenos son los ritmos cerebrales μ (8-12Hz) y β (13-28Hz), que son patrones eléctricos que se observan en el estado de vigilia y se registran principalmente en la zona sensoriomotora (Wolpaw, McFarland y Vaughan, 2000). La ventaja de este tipo de sistema es que se puede comprobar los cambios en las señales EEG captadas durante algún tipo de *Imaginación Motora (IM)*. Estos cambios consisten en la comparación de ondas por: (1) el decrecimiento contralateral de la amplitud en ciertos intervalos de frecuencias, denominado *Event-Related Desynchronization (ERD)*; y (2) el aumento ipsilateral de la amplitud de esos intervalos, denominado *Event-Related Synchronization (ERS)* (Neuper, Wortz, y Pfurtscheller, 2006; Pfurtscheller y Lopes da Silva, 1999). Los ritmos cerebrales se han utilizado para proveer al usuario de control sobre diversos dispositivos que le permitan manejar su medio (Millán, Renkens y Mourinho, 2004), comunicarse (Obermaier y Müller, 2003) u operar programas en un ordenador (Pineda, Silverman, Vankov y Hesténse, 2003; Muller, Tangermann, Dornhege, Krauledat, Curio y Blankertz, 2008).

Stecklow, Infantosi y Cagy (2008) hicieron un estudio con deportistas y no deportistas comparando la IM de una tarea previamente entrenada. Observaron resultados diferenciados en esas señales, sin embargo, confirman la participación también del córtex parietal posterior del hemisferio contralateral (ERD) en la planificación y simulación de tareas mentales, área también observada por Rushworth, Nixon, Renowden, Wade y Passingham (1997). También indicaron que esa lateralización en las diferentes señales (activación en el electrodo c3) ocurre según el conocimiento previo de IM que tenga el individuo.

En líneas generales la estructura de un sistema BCI está basada en la adquisición, amplificación, digitalización y procesado de las señales EEG. Por último, se encuentra la etapa de salida, donde las señales son transformadas para generar comandos de control. Así, el sujeto percibe el feedback indicando su rendimiento (figura 1).

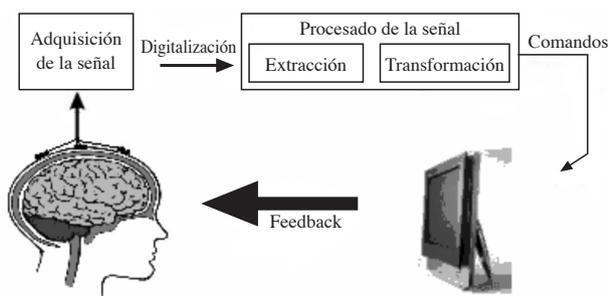


Figura 1. Estructura básica de un sistema BCI

Actualmente una de las prioridades en el desarrollo de un BCI desde un punto técnico consiste en conseguir algoritmos de procesamiento que permitan extraer y clasificar características distintivas de las señales EEG. Si bien es cierto que se está llevando a cabo un gran esfuerzo de investigación, existen algunos aspectos que no han sido abordados con la intensidad que se merecen y en especial aquellos relacionados con la persona, sus comportamientos y los aspectos psicológicos en general.

Eskandari y Erfanian (2008) verificaron la influencia de la meditación en el manejo de un BCI y concluyeron que personas que

tienen experiencias anteriores con meditación lograban mejores resultados en el momento de discriminar las ondas en relación a las que no lo hacían. Ellos se basan en que la meditación es el proceso natural de la retirada de la atención de factores externos, incluidos los procesos físicos y mentales. La práctica de la meditación podría permitir eliminar pensamientos concurrentes a la propia meditación, inhibición de otros pensamientos, «apagar» otras estimulaciones y centrarse en el propio acto de meditar. Así, facilita que la persona consiga diferentes estados de la conciencia y la «conciencia sin pensamientos» durante el desempeño de una tarea mental. Los resultados de su investigación demuestran que hay que ampliar los estudios de BCI a variables del sujeto como ansiedad e imaginación, para que pueda generar de forma fiable un mismo patrón electroencefalográfico en función de los requisitos de las diferentes tareas mentales.

En particular, los sistemas endógenos requieren mucho entrenamiento para manejar un BCI y dependen significativamente del grado de modulación, muchas veces obtenidas a través de la IM, de los ritmos cerebrales por el sujeto (Fetz, 2007). La atención sostenida y capacidad de predecir efectos futuros (Neumann y Kubler, 2003), frustración, cansancio y distracción (Strong et al., 1999), motivación (Delci, Koestner y Ryan, 1999; Neumann y Kubler, 2003) son algunos de los factores que pueden afectar a la capacidad para controlar las señales EEG, y han de ser tenidas en cuenta a la hora de establecer un protocolo de entrenamiento que garantice un aprendizaje más eficaz.

La IM se define como un proceso neuronal-mental dinámico en el cual un individuo simula una tarea motora sin que ocurra el movimiento de cualquiera de los segmentos corporales asociados a esta tarea (Decety e Ingvar, 1990; Gentili, Papaxanthis y Pozzo, 2006). Dicho proceso imaginativo parte de orígenes básicamente visuales y cinestésicos (Rodrigues et al., 2003). En la modalidad visual, en la tarea se le pide al individuo la simulación mental (que imagine) una determinada tarea como si estuviese observando en un vídeo mental. Mientras que en modalidad cinestésica se le pide que imagine y esté atento a sus sensaciones, debe sentir como si su cuerpo estuviese en movimiento, buscando obtener sensaciones relacionadas a las contracciones musculares y la posición de las partes de su cuerpo en el espacio, aunque no debe moverse. Para la evaluación de esta IM tanto visual como cinestésica se han utilizado cuestionarios o autoinformes relacionados a los grados de claridad o percepción de la IM. La mayoría de los estudios sobre BCI se han realizado desde un punto de vista meramente tecnológico o informático, y se asume que cuando se pide al individuo que imagine un movimiento, efectivamente lo está haciendo. Pero no se evalúa, ni se relaciona este tipo de variable psicológica, con el grado de consecución de la tarea de imaginación y las propias respuestas neurológicas en el BCI.

Por otro lado, en el proceso de interacción del individuo con esta BCI cabe suponer que la misma instrumentación, la medición, la intensidad de la tarea, el contexto experimental, etc., puedan influir en las propias señales neuronales y la tarea mental solicitada por el experimentador. La ansiedad definida como una emoción, con componentes fisiológicos y cognitivos, podría inducir cambios en las señales neurológicas, o bien en la facilidad o dificultad para realizar la tarea de imaginación propuesta. Sin embargo, no existen estudios psicológicos sobre BCI que hayan estudiado la posible influencia de estas variables emocionales. Este desempeño podría estar asociado bien a una dimensión afectiva más estable (Ansiedad-Rasgo) característica del individuo, o bien el nivel de

ansiedad podría estar relacionada con la demanda de la tarea y las condiciones ambientales del momento (Ansiedad-Estado). Según los estudios de ansiedad en otro tipo de experimentos tecnológicos, se puede esperar que el rendimiento sea reducido en individuos con alto rasgo de ansiedad que están inmersos en una tarea estresante, aumentando su estado de ansiedad (Broadbent y Broadbent, 1988; Egloff y Hock, 2001; Eysenck y Calvo, 1992).

Se presenta aquí un estudio cuyo propósito general es estudiar la relación de factores psicológicos en la adquisición de control en los sistemas BCI. El objetivo básico es mejorar el procedimiento BCI, que tendría un propósito posterior de utilización en una población especial con discapacidad física para mover una silla de ruedas eléctrica solo con la actividad mental-neuronal. Estudiando la relación de variables psicológicas como la capacidad de imaginación cinestésica y visual, así como la ansiedad del individuo en la primera sesión en BCI. También se busca estandarizar la medida del procedimiento con una medida cuantitativa alternativa a través de la media de diferencia generada por el espectro de la onda EEG en el rango de frecuencia de 5-22 Hz, para poder comparar grupos y efecto de variables técnicas durante su aplicación con tipos de poblaciones diferentes.

Método

Participantes

Los participantes formaban parte de un estudio más amplio sobre BCI, en el que se tomaban diferentes señales EEG con instrucciones y registros diferentes. En este estudio se seleccionaron 23 participantes, estudiantes de Psicología de la Universidad de Málaga, 4 eran hombres y 19 mujeres, con una edad media de 22,12 años ($DT= 2,4$). El criterio de selección era haber realizado con éxito el registro de EEG de «mano derecha» frente a «reposo» en un estudio anterior. Todos ellos contestaron los mismos tests de evaluación psicológica, y posteriormente realizaron una sesión en BCI sin *feedback*, intentando mover «mentalmente» un coche en un entorno virtual (EV).

Instrumentos

Para la obtención de las medidas psicológicas se han utilizado diversos cuestionarios. Para la evaluación del factor de IM se ha utilizado *Movement Imagery Questionnaire - Revised* (MIQ-R), de Hall y Martin (1997), para evaluar imaginación visual y cinestésica. Tiene alta fiabilidad y ha sido utilizado en estudios previos con deportistas para valorar la imaginación de movimientos y actividad física (Rodgers, Hall y Buckolz, 1991; Gregg, Hall y Nederhof, 2005). Su coeficiente interno de validación es de 0,88 para visual y 0,89 para cinestésica. Acaba de aparecer una aplicación de este MIQ-R en población española mostrando alta consistencia interna y confirmando los dos factores de imaginación cinestésica y visual (Campos y González, 2010). También se ha utilizado el *Vividness of Movement Imagery Questionnaire*, de Roberts, Callow, Hardy, Markland y Bringer (2008), para medir la claridad de imaginación visual interna, externa y cinestésica, un cuestionario revisado con validez interna significativa en un estudio con 706 deportistas. Para la evaluación de ansiedad se ha utilizado el *Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo* (STAI), de Spielberger, Gorsuch y Lushene (1970), que constituye un estándar con alta fiabilidad y validez en multitud de estudios sobre ansiedad.

Para el registro del sistema BCI se han utilizado los siguientes instrumentos. Para el registro de la señal EEG se utilizaron electrodos en torno al área central, uno referencial en Fpz y otros dos a 3 cm de la posición C3 y C4 en configuración bipolar, según el sistema internacional 10/20 de la *Federación Internacional de Sociedades de Electroencefalografía* (Jasper, 1958). Se han utilizado electrodos superficiales sobre el cuero cabelludo de 8 mm de Ag/AgCl. Las señales fueron procesadas con un amplificador EEG de dieciséis canales modelo *gBSamp* (*gTech*) y digitalizados a través de una tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6210 (*National Instruments*) a una frecuencia de 128Hz. En suma, todos estos instrumentos constituyen un sistema BCI endógeno (cambios voluntarios del EEG) basado en el control de los ritmos sensorio-motores (*SMR-based*) y una interfaz virtual síncrona con movimientos izquierda/derecha.

Procedimiento

Una vez explicado a cada participante el procedimiento, la instrumentación y en qué consistía la medición EEG y el BCI, se obtenía su consentimiento. En la primera parte de la sesión cada participante contestaba por escrito los cuestionarios, tanto al STAI (Estado/Rasgo) como las escalas de imaginación MIQ-R y VMIQ. La tarea de BCI se realizaba en esa misma sesión, dividida en 3 bloques de 40 ensayos (120 ensayos en total por sesión). Cada ensayo duraba 8 segundos con un intervalo de descanso de 1,5 segundos. A continuación se le ponía el gorro de electrodos y se iniciaba la primera prueba técnica del aparataje para comprobar que todas las señales, la calibración y el funcionamiento eran correctos. Se instó a todos los participantes a que no se moviesen durante las pruebas, dado que cualquier movimiento corporal podía generar ruido en la señal EEG.

Para realizar la tarea de BCI se daba a los sujetos la instrucción de la tarea mental que debían realizar mientras estuviese con el EV para intentar controlar el movimiento del coche. Se les informaba que no habría *feedback*, es decir, el coche no se movía, solo debían intentarlo y se registraban sus respuestas EEG. Se le pedía al individuo realizar una de estas dos tareas mentales en imaginación: (1) imaginar el movimiento de la mano derecha abriendo y cerrando continuamente, si el «charco de agua» estuviera en la izquierda; y (2) imaginarse en reposo, no hacer nada, si el charco de agua, se pidió a los participantes que se mantuvieran en reposo hasta que se presentara el estímulo visual del charco (figura 2).

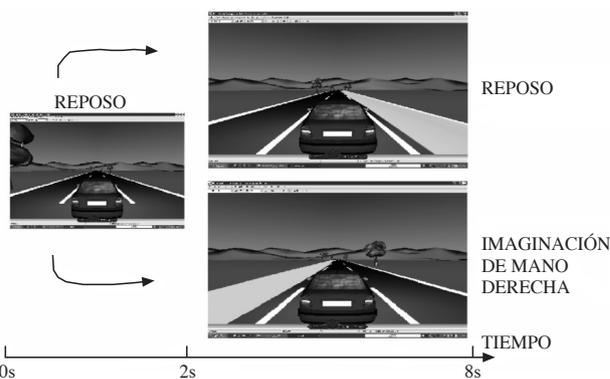


Figura 2. Representación gráfica del entorno virtual con el esquema de tarea y tiempo en cada ensayo

El EV incluía sonidos de motor mientras el coche estaba en movimiento. Posteriormente se procesaron las señales en un programa específico para análisis de las ondas desarrollado en MATLAB®.

Se analizaban visualmente las curvas ERD/ERS (figura 3) para obtener un criterio práctico sobre si se había obtenido discriminación entre dos señales neuronales o estados mentales diferentes, escogiendo visualmente la mejor frecuencia (Ron-Angevin y Díaz-Estrella, 2009).

Con estas mismas señales se realizó un proceso matemático para obtener las medias de las curvas de diferencias entre las señales de mano derecha y las señales de reposo, con objeto de obtener un parámetro medio diferencial y cuantitativo utilizando el rango de frecuencias comprendidas entre 5 y 22 Hz (figura 4) que pudiese servir también como criterio de discriminación.

Análisis de datos

Se ha utilizado un diseño casi-experimental de grupos asignados. Una vez realizado el estudio, se ha dividido a los sujetos en dos grupos de acuerdo con variables de ejecución en sus resultados en las señales del BCI, y después también se realizó un estudio correlacional entre el parámetro diferencial del BCI y las variables psicológicas de IM (cinestésica y visual) y ansiedad (estado/rasgo).

Para el análisis de las variables obtenidas en el sistema BCI, se desarrolló un programa en MATLAB que permitía un estudio tanto *on-line* como *off-line* de todas las señales y su estudio comparativo posterior. Por otro lado, se ha utilizado un EV de un coche moviéndose en una carretera recta, que se proyectaba sobre una pantalla de $2 \times 1,5$ metros. Se ha utilizado el mismo procedimiento de procesado de las señales EEG utilizados en el estudio de Ron-Angevin

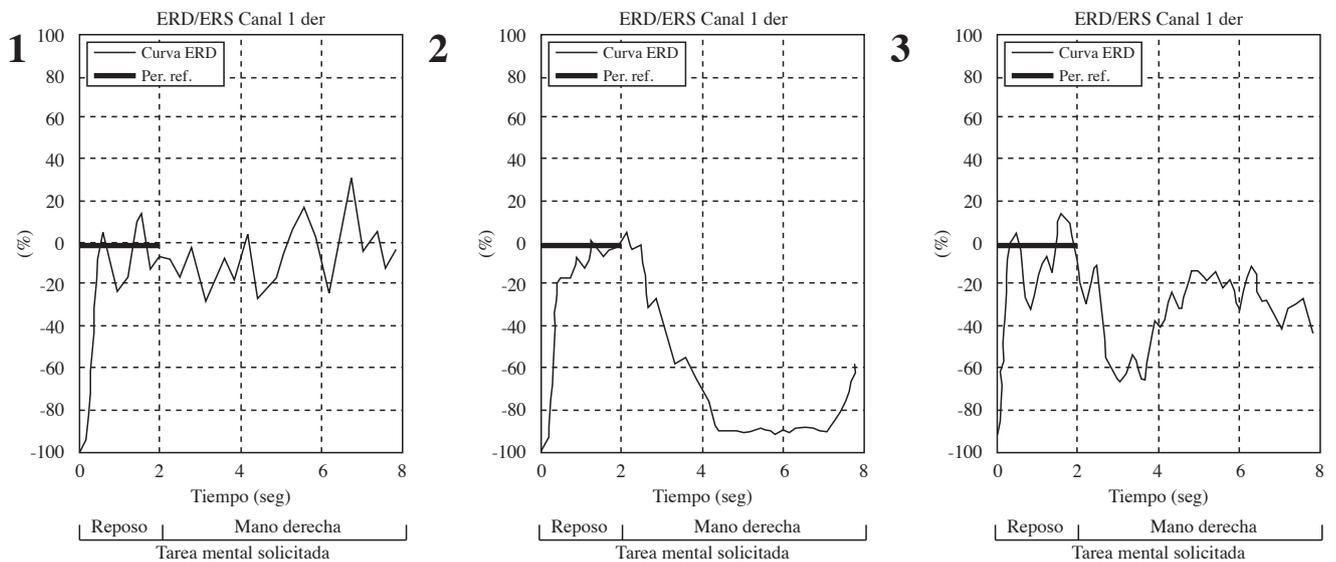


Figura 3. Gráficas ERD/ERS en C3 de mano derecha durante un bloque, representando los 8 segundos de ensayo. Se presenta, como ejemplo: (1) participante con baja discriminación, (2) participante con alta discriminación, (3) participante con media discriminación

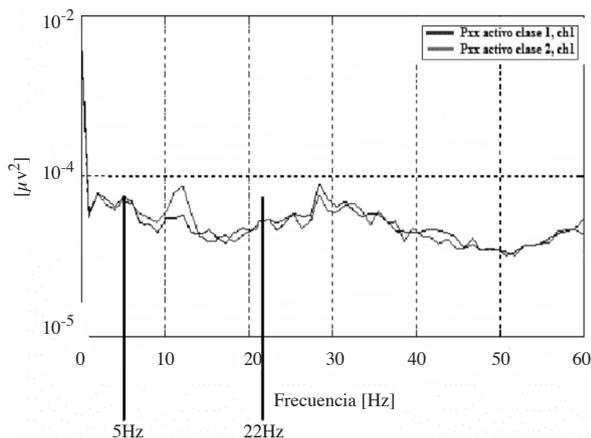


Figura 4. Gráfica del espectro de potencia donde se puede observar el rango de frecuencia de 5 a 22Hz que fue utilizado para sacar la media de la curva diferencial entre mano derecha (activo de clase 1, ch1) y reposo (activo de clase 2, ch1)

y Díaz-Estrella (2009). Para análisis estadístico se ha utilizado el programa SPSS 17.

Resultados

Los resultados de los participantes se dividieron en dos subgrupos con o sin discriminación en el BCI en función de su ejecución en las curvas ERD/ERS. Se ha comparado el método estándar de selección de participantes con o sin discriminación, que consiste en seleccionar la mejor frecuencia posible a través de la observación de las gráficas de onda de cada participante en cuestión, con el parámetro cuantitativo obtenido con la diferencia media entre ondas de activación/reposo de esas mismas curvas ERD/ERS.

La media de la curva diferencial en las tareas mentales de mano y reposo en el rango de frecuencia 5-22Hz obtiene diferencias significativas en las medias entre los dos grupos preestablecidos por el procedimiento estándar, ERD $N=12$ y ERS $N=11$ ($t(21)=-5,402$; $p=0,0001$). Se han asumido varianzas iguales según el estadístico de Levene ($F=2,036$; $p=,168$). Se obtiene que las medias

de los sujetos clasificados en el subgrupo que ha obtenido ERD son más bajas que de los que fueran clasificados en el subgrupo con ERS por el procedimiento estándar. Lo que significa que cuanto más baja es esa diferencia en ERD o ERS se obtiene mejor control; y cuanto más cerca de cero, menos diferencias, peor control (figura 5).

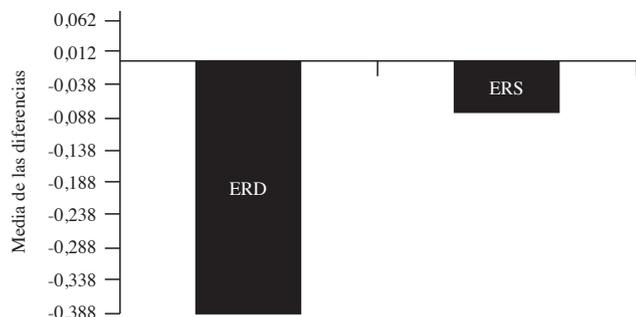


Figura 5. Media de todos los sujetos clasificados como ERD y ERS en la curva diferencial del rango 5-22Hz:

Para comparar estos dos procedimientos de selección de sujetos con o sin discriminación se ha utilizado un conglomerado de K medias para distribuir las puntuaciones de la media de la curva de diferencias de los 23 sujetos. La media en un conglomerado de sujetos es $-0,11$ y en el otro subgrupo es $-0,46$. Posteriormente se ha aplicado el estadístico *chi-cuadrado*, comparando la distribución de participantes según uno y otro criterio. Los resultados muestran que las variables no se diferencian estadísticamente ($\chi^2(1) = 0,43$; $p = 0,83$) y que, por tanto, la distribución de sujetos con ambos procedimientos (visual y matemático) puede considerarse la misma. En suma, con ambos tipos de análisis se puede afirmar que 12 participantes obtienen buenas señales EEG de discriminación, y otros 11 participantes no consiguen una respuesta diferencial.

A partir de los dos grupos, ERD y ERS, se han comparado las medidas psicológicas en ansiedad e imaginación. No se han encontrado diferencias significativas entre los dos grupos en la capacidad de imaginación visual externa, imaginación visual interna y cinestésica. Tampoco se han encontrado diferencias significativas en la ansiedad-estado y ansiedad-rasgo entre sujetos clasificados como ERD o con ERS.

Por otro lado, las escalas sobre imaginación visual, cinestésica y de movimientos presentaban altas correlaciones entre sí ($r = 0,65$; $0,64$; $0,45$; $0,79$; $0,54$; $p < 0,01$), lo que contribuye a acentuar la validez de constructo de esa «imaginación cinestésica», aunque no parezca tener una relación directa con los resultados en un sistema BCI.

Como conclusión de este estudio puede afirmarse que las variables psicológicas, como la capacidad de imaginación, no mejora la discriminación de dos respuestas neurológicas en un sistema BCI; ni tampoco que la ansiedad parece ser una variable diferenciadora con una mejor o peor ejecución en las tareas EEG del sistema BCI. Además, por otro lado, se ha conseguido un parámetro cuantitativo en el análisis de la diferencia media entre imaginación de mano-reposo en la frecuencia de 5-22Hz, lo que permitiría tomar decisiones más objetivas y ajustadas cuantitativamente a la ejecución de los participantes.

Discusión y conclusiones

Se han estudiado aquí diversas variables psicológicas que podrían influir en el manejo de un sistema BCI, y que pueden ayudar

a mejorarlo. Por un lado, se ha mostrado que la capacidad imaginativa de movimientos no es requisito para conseguir una respuesta neuronal diferencial. Esta capacidad imaginativa, sea cinestésica o sensorial, no parece una habilidad imprescindible en los participantes para facilitar la discriminación de esas ondas cerebrales. Estos resultados ponen en cuestión el contenido medido por escalas donde la persona hace un autoanálisis del grado de claridad y viveza de una situación imaginada. Quizá no tiene por qué haber una correspondencia necesariamente entre la actividad subjetiva de imaginación y el registro de la actividad neuronal de esa misma persona cuando se le solicita que imagine esa actividad mental de ejecución de movimiento o de reposo. Sin embargo, en el estudio de Stecklow, Infantosi y Cagy (2008), la diferencia en las señales estaba asociada al entrenamiento de una tarea mental específica, aunque ellos utilizaron sujetos de alto nivel deportivo a los que pedían imaginar tareas que dominaban con destreza (lanzamiento del balón). Parece que se activarían cadenas neuronales específicas al imaginar una conducta precisa, que sería más fácil desactivar cuando esa persona tiene un alto nivel de concentración, como ocurre en los deportistas de élite. En este sentido, el presente estudio sugiere investigaciones futuras sobre la imaginación de movimientos, concentración en imágenes, o tareas cognitivas que podrían ser mejores indicadores diferenciales de la actividad eléctrica neuronal. Con todo, este tipo de tareas de «IM» son las que habitualmente se utilizan en las investigaciones y aplicaciones de BCI, por lo que se obtienen de una manera empírica, aunque sin conocer con exactitud la respuesta o tarea neuronal que el individuo está realmente realizando en ese momento (Neuper, Sherer, Wriessnegger y Pfurtscheller, 2009).

La ansiedad tampoco aparece relacionada con la actividad de las curvas ERD/ERS. Es decir, el nivel de ansiedad no parece que empeore, ni mejore, una tarea de ejecución en un sistema BCI. Estos resultados de ausencia de relación, no significa que no puedan existir otras variables psicológicas que sí mejoren esa ejecución, por ejemplo, los encontrados por Eskandari y Erfanian (2008), que concluyeron que sujetos que practicaban meditación obtenían mejor control. La meditación es una técnica que además de bajar los niveles de ansiedad implica otras tareas cognitivas, como concentración, atención sostenida y autocontrol. Estudios como los de Neumann y Kubler (2003) y Strong et al. (1999) afirman que son funciones cognitivas que se deben tener en consideración en la práctica de un sistema BCI. Los hallazgos encontrados no agotan los estudios de interacción entre la Psicología y los BCIs, tal como proponen Angelakis, Hatzis, Panourias y Sakas (2007), las interfaces BCI podrían ser una herramienta para el tratamiento de trastornos psiquiátricos y neurológicos como la epilepsia, el TDAH y la ansiedad, así como la oportunidad de individuos sanos de mejorar su rendimiento cognitivo. Estudios como los de Hardt y Kamiya (1978) verificaron una reducción en el potencial de amplitud de la banda alfa para bajar niveles de ansiedad con *neurofeedback*; y Vernon et al. (2003) encontraron mejoras cognitivas en individuos sanos utilizando *neurofeedback*. Esos trabajos sostienen que la actividad neuronal registrada tiene fuertes componentes cognitivos, especialmente por las fuertes demandas de atención que exige la tarea de BCI durante los ensayos, tal como se ha descrito en el procedimiento. Podría ocurrir que una persona con un estado de preocupación por la prueba produjese alta actividad neuronal que llenase de ruido la señal eléctrica EEG; mientras que una persona con mayor concentración, que pudiese cambiar rápidamente de una situación de alta concentración a otra de gran relajación,

quizá podría conseguir mejores resultados en las respuestas BCI diferenciadas. Una propuesta futura de investigación es estudiar variables como la capacidad de concentración y de atención, que quizá pudiesen estar más relacionadas con buenos resultados en la ejecución en un sistema BCI.

Por otro lado, en este estudio se ha obtenido un parámetro que consideramos relevante para futuros estudios en el campo del BCI: la medida obtenida de una curva media diferencial entre las frecuencias de imaginar «mano derecha» y «reposo», en el rango de 5 a 22 Hz. Este parámetro cuantitativo permitiría identificar matemáticamente aquellos sujetos con mayor capacidad discriminativa neuronal, y con ello no depender de decisiones subjetivas y visuales al juzgar sobre las frecuencias de onda adecuadas donde exista discriminación entre respuestas neuronales. Hasta ahora no

se conoce en la literatura de investigación sobre BCI un parámetro cuantitativo similar para establecer comparaciones entre sujetos o entre procedimientos, tal y como se ha utilizado aquí.

Con todo, los sistemas BCI y todos los aspectos de interacción psicológicos implicados en ellos constituyen una fuente inagotable de nuevas investigaciones. El cambio en algún procedimiento supone nuevos hallazgos que a su vez repercuten en mejoras de ese procedimiento, cada vez más refinado y específico.

Agradecimientos

Estudio parcialmente financiado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, proyecto de excelencia P07-TIC-0331.

Referencias

- Angelakis, E., Hatzis, A., Panourias, I.G., y Sakas, D.E. (2007). Brain-computer interface: A reciprocal self-regulated neuromodulation. *Neurosurgical Research*, 97(2), 555-559.
- Botella, A. García-Palacios, A., Baños, R., y Quero, S. (2007). Realidad virtual y tratamientos psicológicos. *Cuadernos de Medicina Psicosomática y Psiquiatría de Enlace*, 81, 35-46.
- Birbaumer, N. (2006). Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control. *Psychophysiology*, 46(6), 517-532.
- Bornas, X., Rodrigo, T., Barceló, F., y Toledo, M. (2002). Las nuevas tecnologías en la terapia cognitivo-conductual: una revisión. *Revista Internacional de Psicología Clínica y de la Salud*, 2, 533-541.
- Broadbent, D., y Broadbent, M. (1988). Anxiety and attentional bias: State and trait. *Cognition and Emotion*, 2, 165-183.
- Campos, A., y González, M.A. (2010). Versión española del Cuestionario-Revisado de Imagen del Movimiento (MIQ-R): validación y propiedades psicométricas. *Revista de Psicología del Deporte*, 19(2), 265-275.
- Decety, J., e Ingvor, D.H. (1990). Brain structures participating in mental simulation of motor behavior: A neuropsychological interpretation. *Acta Psychologica*, 73, 13-34.
- Delci, E.L., Koestner, R., y Ryan, R.M. (1999). A meta-analytic review of experiments examining the effects of extrinsic rewards on intrinsic motivation. *Psychological Bulletin*, 125(6), 627-668.
- Egloff, B., y Hock, M. (2001). Interactive effects of state anxiety and trait anxiety on emotional Stroop interference. *Personality and Individual Differences*, 31, 875-882.
- Eskandari, P., y Erfanian, A. (2008). Improving the Performance of Brain-Computer Interface through Meditation Practicing in *30th Annual International IEEE EMBS Conference Vancouver* (pp. 20-24). Vancouver, Canadá: British Columbia.
- Eysenck, M.W., y Calvo, M.G. (1992). Anxiety and performance: The processing efficiency theory. *Cognition and Emotion*, 6, 409-434.
- Fetz, E.E. (2007). Volitional control of neural activity: Implications for brain-computer interfaces. *The Journal of Physiology*, 579(3), 571-579.
- Gentili, R., Papaxanthis, C., y Pozzo, T. (2006). Improvement and generalization of arm motor performance through motor imagery practice. *Neuroscience*, 137, 761-772.
- Gregg, M., Hall, C., y Netherhof, E. (2005). The imagery ability, imagery use, and performance relationship. *The Sport Psychologist*, 19, 93-99.
- Gutiérrez, J. (2002). Aplicaciones de la realidad virtual en psicología clínica. *Aula Médica Psiquiatría*, 4(2), 96-126.
- Hall, C.R., y Martin, K.A. (1997). Measuring movement imagery abilities: A revision of the Movement Imagery Questionnaire. *Journal of Mental Imagery*, 21, 143-154.
- Hardt, J.V., y Kamiya, J. (1978). Anxiety change through electroencephalographic alpha feedback seen only in high anxiety subjects. *Science*, 201, 79-81.
- Jasper, H.H. (1958). The ten-twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
- Millán, J.R., Renkens, F., y Mourinho, J. (2004). Noninvasive Brain-Actuated Control of a Mobile Robot by Human EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(6), 1026-1033.
- Muller, K.-R., Tangermann, M., Dornhege, G., Krauledat, M., Curio, G., y Blankertz, B. (2008). Machine learning for real-time single-trial EEG-analysis: From brain-computer interfacing to mental state monitoring. *Journal of Neuroscience Methods*, 167, 82-90.
- Neumann, N., y Kubler, A. (2003). Training locked-in patients: A challenge for the use of brain-computer-interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11, 169-172.
- Neuper, C., Wörtz, M., y Pfurtscheller, G. (2006). ERD/ERS patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation. *Progress in Brain Research*, 159, 211-222.
- Neuper, C., Scherer, R., Wriessnegger, S., y Pfurtscheller, G. (2009). Motor imagery and action observation: Modulation of sensorimotor brain rhythms during mental control of a brain-computer interface. *Clinical Neurophysiology*, 120(2), 239-247.
- Obermaier, B., y Müller, G.R. (2003). Virtual «Keyboard» Controlled by Spontaneous EEG Activity. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11(4), 422-426.
- Pfurtscheller, G., y Lopes da Silva, F.H. (1999). Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology: Event-Related Desynchronization (Volume 6). Amsterdam: Elsevier.
- Pineda, J.A., Silverman, D.S., Vankov, A., y Hestenes, J. (2003). Learning to Control Brain Rhythms: Making a Brain-Computer Interface Possible. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11(2), 181-184.
- Rodgers, W., Hall, C., y Buckolz, E. (1991). The effect of an imagery training program on imagery ability, imagery use, and figure skating performance. *Journal of Applied Sport Psychology*, 3, 109-125.
- Ron-Angevin, R., y Díaz-Estrella, A. (2009). Brain-Computer interface: Changes in performance using virtual reality techniques. *Neuroscience Letters*, 449, 123-127.
- Rodrigues, E.C., Imbiriba, L.A., Leite, G.R., Magalhães, J., Volchan, E., y Vargas, C.D. (2003). Efeito da estratégia de simulação mental sobre o controle postural. *Revista Brasileira de Psiquiatria*, 25, 33-35.
- Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., y Bringer, J. (2008). Movement imagery ability: Development and assessment of a revised version of the vividness of movement imagery questionnaire. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 30, 200-221.
- Rushworth, M.F.S., Nixon, P.D., Renowden, S., Wade, D.T., y Passingham, R.E. (1997). Left parietal cortex and motor attention. *Neuropsychologia*, 35, 1261-1273.
- Spielberger, C.D., Gorsuch, R.L., y Lushene, R.E. (1970). *Manual for the state-trait inventory*. Palo Alto: Consulting Psychological Press.
- Stecklow, M.V., Infantosi, A.F.C., y Cagy, M. (2008). Alterações na banda alfa do eletrencefalograma durante imagética motora visual e cinestésica. *Arquivos de Neuropsiquiatria*, 64, 1084-1088.

Strong, M.J., Grace, G.M., Orange, J.B., Leeper, H.A., Menon, R.S., y Aere, C. (1999). A prospective study of cognitive impairment in ALS. *Neurology*, 53, 1665-1670.

Vernon, D., Egner, T., Cooper, N., Compton, T., Neilends, C., Sheri, A., y Gruzelier, J. (2003). The effect of training distinct neurofeedback pro-

ocols on aspects of cognitive performance. *International Journal of Psychophysiology*, 47, 75-85.

Wolpaw, J.R., McFarland D.J., y Vaughan, T.M. (2000). Brain-Computer interface research at the Wadsworth Center. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 8, 222-225.