



## ORIGINAL

## Interfaz cerebral no invasiva para control de un sistema domótico por personas discapacitadas

### Non-invasive cerebral interface to control a domotic system by disabled people

Azorín J M<sup>1</sup>, Iáñez E<sup>1</sup>, Sabater J M<sup>1</sup>, García N M<sup>1</sup>, Pérez C<sup>1</sup>, Fernández E<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Virtual Reality and Robotics Lab. <sup>2</sup> Instituto de Bioingeniería. Universidad Miguel Hernández de Elche. Elche

Esta investigación ha sido financiada por FUNDACIÓN MAPFRE

#### Resumen

**Objetivo:** Desarrollar una interfaz cerebral no invasiva basada en señales EEG que diferencie estados mentales generados de forma intencionada por una persona para controlar el sistema domótico de una vivienda.

**Material y método:** Participaron 5 voluntarios hombres sanos, con edades comprendidas entre 23 y 28 años. Se procesaron y clasificaron los datos para obtener la configuración de los algoritmos que mejor diferencian entre los diferentes estados mentales. Se realizó una emulación del tiempo real para determinar como se comporta el sistema y medir el tiempo requerido por el usuario para modificar las opciones del sistema domótico.

**Resultados:** En las pruebas *offline* se obtuvieron el 59.4% de acierto, un 27.7% de no detección y un 12.9% de error. En las pruebas *online* mejoraron los resultados obtenidos con un 70.7% de acierto, un 23.4% de no detección y un 5.9% de error y un tiempo medio de 15 segundos para activar una opción en el menú domótico.

**Conclusiones:** La interfaz cerebral permite de forma satisfactoria controlar el sistema domótico.

#### Palabras Clave:

BCI, EEG, domótica.

#### Abstract

**Objective:** To develop an EEG-based non-invasive cerebral interface to differentiate between several mental states intentionally generated by a person with the purpose of controlling the domotic system of a house.

**Material and method:** 5 healthy volunteer subjects, all men between 23 and 28 years old, have participated in the study. Offline data have been collected, processed and classified in order to obtain the best configuration of the algorithms that allow differentiate between the mental states. Then, an emulation of the real time has been done to analyze the behaviour of the system and to measure the time required by the user to modify the options of the domotic system.

**Results:** in the offline tests, means % of 59.4% of success, a 27.7% of non-detection and a 12.9% of error have been obtained. In the online tests, the results have been improved. Means % of 70.7% of success, a 23.4% of non-detection and a 5.9% of error, and an average time required of 15 seconds to activate an option of the domotic menu have been obtained.

**Conclusions:** based on the results with the system we can conclude that the brain interface allows successfully control the domotic system.

#### Keywords:

BCI, EEG, domotic.

#### Correspondencia

J. M. Azorín Poveda  
Universidad Miguel Hernández de Elche  
Avda. Universidad s/n. Edificio Quorum V. 03202 Elche (Alicante)  
jm.azorin@umh.es



## Introducción

Durante la última década se han extendido las Interfaces Cerebro Computador (BCI: Brain Computer Interfaces), basadas en el registro de la actividad bioeléctrica cerebral mediante electrodos, con el fin de generar acciones sobre un computador sin necesidad de movimiento físico por parte del usuario [1][2]. Por ello estas interfaces son de gran valor para personas discapacitadas.

Existen dos técnicas, invasivas y no invasivas, pero este trabajo se centra en las no invasivas que consisten en registrar las señales electroencefalográficas (EEG) mediante electrodos de superficie, eliminando los posibles riesgos médicos de una intervención. Estas técnicas pueden ser clasificadas, a su vez, en evocadas y espontáneas. En las espontáneas se requiere de un estímulo externo para medir la respuesta automática a éste, con lo cual limita su número de aplicaciones [3-4]. En este trabajo se ha realizado de forma que la persona lleve a cabo las tareas mentales por propia voluntad y de forma espontánea [5].

El objetivo de este trabajo es desarrollar una interfaz cerebral no invasiva basada en señales EEG que permita distinguir entre diferentes estados mentales generados de forma intencionada por una persona con la finalidad de que ésta pueda controlar el sistema domótico de una vivienda. Para ello se ha desarrollado un sistema que permita la adquisición de las señales EEG, en segundo lugar se han programado los algoritmos de procesamiento y clasificación que permitan diferenciar entre diferentes tareas mentales y finalmente se ha desarrollado una interfaz *hardware* y *software* del sistema domótico de una vivienda.

## Pacientes y metodología

Hemos utilizado la FFT como algoritmo de procesamiento y la red neuronal como clasificador [6]. Las dos tareas o estados mentales que se han diferenciado consisten en la imaginación del movimiento del brazo derecho y del estado de reposo o relajación. La imaginación del movimiento es una tarea de tipo motor, donde imaginar un movimiento genera el mismo proceso mental e incluso físico que realizar el movimiento, salvo que éste queda bloqueado [7].

De este modo, para realizar el registro de las señales EEG se han ubicado los electrodos en las cercanías del área motora, siguiendo el sistema internacional 10/20 [8] (Figura 1). El área motora corresponde a las posiciones Ci.

### Sistema de Adquisición de Señales EEG

Para distinguir satisfactoriamente entre los dos estados mentales se utilizó el sistema NeuroScan® para adquirir las señales EEG, utilizando hasta 64 electrodos. La frecuen-

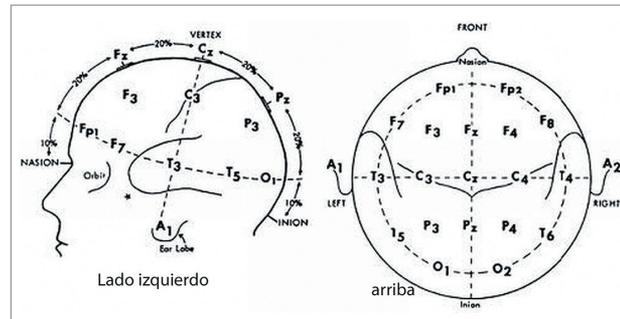


Fig. 1. Sistema Internacional 10/20 para la colocación de los electrodos.

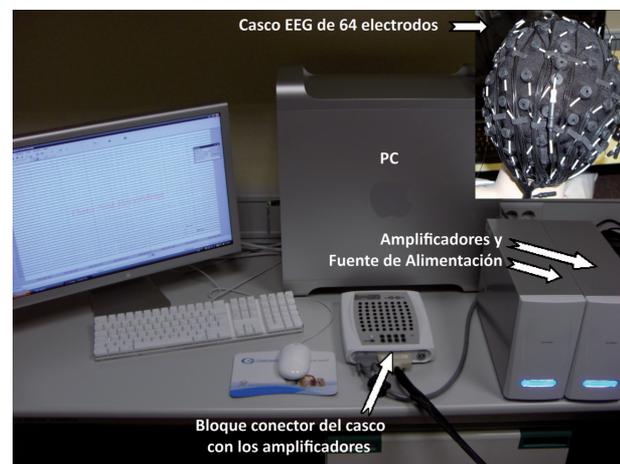


Fig. 2. Imagen real del sistema de adquisición EEG final.

cia de muestreo utilizada para adquirir las señales fue de 1KHz en cada canal (Figura 2).

Para obtener y analizar los datos se utilizó el programa Acquire® (NeuroScan) que los presentaba en la pantalla con un punto rojo para el estado de relajación y un punto verde para imaginar el movimiento del brazo derecho durante 6 segundos cada uno. Se realizaron 20 iteraciones con el programa Presentation® (Neurobehavioral Systems) que además de mostrar por pantalla los puntos con la temporización correcta, enviaba pulsos sincronizados con la muestra de las imágenes al usuario. Los datos se obtuvieron en tiempo real, se procesaron y se decidió el estado mental con el programa Matlab®.

Para diferenciar los dos estados mentales se utilizaron 8 electrodos que se ubicaron, siguiendo el sistema internacional 10/20, en las posiciones F3, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, y P4 (Figura 1). Se utilizaron canales adicionales adyacentes a los citados con el fin de mejorar la calidad de la señal en las posiciones principales.

### Procesamiento de las señales EEG

El procesamiento implementó el algoritmo basado en el dominio de la frecuencia la transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform). El rango de frecuencias de las señales EEG iba desde los 0,5 hasta los 32 Hz aproximadamente, y se subdividió en distintas bandas: delta (0,5 – 3.5 Hz), theta (4 – 7 Hz), alfa (8 – 13 Hz) y beta (14 – 32 Hz). En función del tipo de actividad mental que se desarrollaba se encontraron variaciones en unas u otras bandas.

La FFT permite calcular la densidad espectral de potencia de las señales EEG que permitió obtener el espectro en frecuencia de la señal. Elegimos un algoritmo basado en la frecuencia para procesar las señales ya que son los más adecuados para señales EEG al proporcionar buenos resultados en la discriminación de tareas mentales.

Para cada uno de los electrodos seleccionados se calculan también el promedio temporal de los electrodos adyacentes. Para cada electrodo seleccionado se le restó este promedio y, finalmente, se aplicó el algoritmo de procesamiento. Conseguimos así obtener una señal de mayor calidad para cada uno de los electrodos seleccionados, ya que se eliminó la contribución media de la zona.

El clasificador permitió obtener el estado mental a partir de las características extraídas de las señales EEG por el algoritmo de procesamiento. El clasificador correspondió a una Red Neuronal Perceptrón Multicapa, con aprendizaje por el método de Retropropagación (BP: Back Propagation) (Figura 3). La red neuronal tenía diversos parámetros que conformaban su arquitectura, como son el número de neuronas, el número de entradas y las capas ocultas, así como parámetros que definirán su aprendizaje, como el número de iteraciones, la tasa de aprendizaje y el momento. La red neuronal se programó de forma genérica, para obtener la configuración que ofrecía mejores resultados.

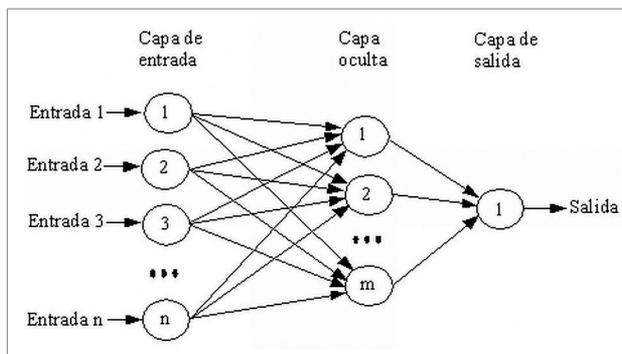


Fig. 3. Red Neuronal Perceptrón Multicapa.

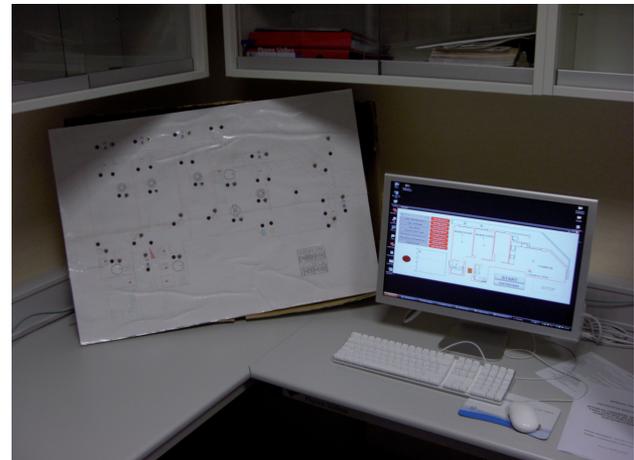


Fig. 4. Interfaz del sistema domótico junto a la maqueta.



Fig. 5. Interfaz gráfica de usuario del sistema domótico.

Para entrenar la red neuronal se utilizaron los patrones generados por los algoritmos de procesamiento. Cada patrón junto al estado mental al que correspondía se utilizó como entrada a la red neuronal para realizar el aprendizaje y crear un modelo de red neuronal. Es decir, con el proceso de aprendizaje se ajustaron los pesos de las neuronas para que, ante un patrón desconocido, la red neuronal proporcione el estado mental con el mayor porcentaje posible de acierto.

### Sistema domótico

Se realizó una interfaz gráfica y una maqueta para simular ciertos elementos de una vivienda (Figura 4). En la maqueta se utilizaron *leds* para visualizar el estado de los diferentes dispositivos a controlar. Por otra parte se desarrolló una rutina para modificar las salidas digitales y modificar el estado de cualquier elemento de la maqueta conectado a la tarjeta. También se desarrolló la interfaz gráfica de usuario del sistema domótico (Figura 5) que se compuso principalmente del



plano de la vivienda con los dispositivos que pueden ser controlados (luces, puertas, persianas o calefacción) y el estado en que se encuentran. Las acciones que pueden realizarse sobre cada elemento consistirán, en el caso de las luces y la calefacción, encender y apagar; en el de las puertas abrir y cerrar; y en el de las persianas subir y bajar. El menú del sistema domótico con la lista de dispositivos a controlar junto con su estado actual. El círculo que informa del estado en el que se está pensando, rojo para el estado de relajación y verde para la imaginación del brazo derecho. La barra de progreso en la cual, una vez se llegue al umbral imaginando de forma consecutiva el movimiento del brazo derecho, cambiará el estado del dispositivo seleccionado actualmente y los botones de «start», «stop» y entrenamiento.

#### Integración del sistema

Se integraron los componentes de la interfaz cerebral no invasiva, es decir, el sistema de adquisición de señales EEG, el algoritmo de procesamiento elegido y el clasificador, con el sistema domótico, con la finalidad de que el usuario pueda actuar sobre el sistema domótico a partir del estado mental generado voluntariamente. El funcionamiento del sistema era como sigue:

1. Tras pulsar el botón de «start», cada 2 segundos se tomaron las muestras de los 3 segundos anteriores, es decir, se tomó una decisión cada 2 segundos tomando los datos con un solape de un segundo con las muestras anteriores.
2. Se procesaron los datos y se simularon mediante la red neuronal para obtener el estado en el que se está pensando actualmente. Esto se resumió con un 0 para el estado de relajación y un 1 para la imaginación del movimiento del brazo derecho.
3. En función del estado detectado se iluminaba el punto en rojo o verde para que el usuario tuviese una realimentación visual del estado en el que está pensando y sepa si lo está haciendo correctamente.
4. Se envió el valor 0 ó 1 detectado a una función que se encargaba de incrementar o decrementar la barra de progreso. Se tenía en cuenta el estado detectado anterior con el fin de que si se piensa varias veces seguidas en el mismo estado la barra incremente su valor con mayor rapidez o en el caso del estado de reposo decremente rápidamente para no efectuar ninguna acción. Cuando esta barra llegaba al umbral seleccionado se actuaba sobre el elemento del menú, seleccionado en este momento cambiando su valor.
5. La posición del menú cambiaba cada tiempo determinado, fijado en 25 segundos, aunque se podía variar en función de los porcentajes de acierto del usuario.

#### Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales *offline* consistieron en registrar las señales EEG para, posteriormente, determinar el algoritmo de procesamiento y el clasificador a utilizar para diferenciar satisfactoriamente los estados mentales. En las pruebas *online*, los resultados fueron emulados para obtener una estimación de los resultados como si el usuario hubiera utilizado el sistema en tiempo real.

#### Pruebas *offline*

En las pruebas *offline* participaron 5 voluntarios sanos que dieron su consentimiento por escrito, todos hombres, con edades comprendidas entre 23 y 28 años. Los usuarios realizaron 2 tareas mentales, imaginación del movimiento del brazo derecho y relajación. El primer segundo, de los 6 que se recogieron en cada iteración de cada estado, no se utilizó para entrenar la red neuronal, debido a que el usuario se encuentra en el cambio entre un estado y otro y los datos de ese segundo no corresponden correctamente al estado indicado. Los segundos del 1 al 6 se analizaron cogiendo bloques de 3 segundos ya que se tomaron decisiones cada 2 segundos con un solapamiento de 1 segundo.

Se seleccionó como clasificador una red neuronal con 1 capa oculta, 30 neuronas en la capa, una tasa de aprendizaje de 0,03 y un momento de 0,2. El número de iteraciones fue limitado a 100. Cada red neuronal se ajustó para cada usuario tras el debido entrenamiento de la red.

La validación cruzada que dividió los datos en varios grupos y utilizó todos menos uno para entrenar la red y el restante para testarla. Estos grupos se crearon de forma aleatoria y se repitió el proceso 10 veces para promediar los resultados (Tabla 1). Los porcentajes se diferenciaron en tres categorías: porcentaje de acierto, de no detección y de error. El porcentaje de acierto corresponde a cuando estamos pensando en uno de los dos estados y lo detectamos correctamente. El porcentaje de no detección consiste en estar imaginando el movimiento del brazo derecho y detectarlo como reposo. Esto no implicaría un error grave al sis-

Tabla 1. Porcentaje de resultados *offline*.

	% acierto	% no detección	% error
Usuario#1	53,1	32,0	15,0
Usuario#2	63,4	23,7	13,0
Usuario#3	66,0	22,9	11,2
Usuario#4	54,2	32,7	13,2
Usuario#5	60,5	27,2	12,4
Media+Desv.	59,4±5,7%	27,7±4,5%	12,9±1,4%

Tabla 2. Porcentaje de resultados *online*.

	Tiempo medio	% de acierto	% de no detección	% de error
Usuario#2	14.8 seg.	72.8 %	19.8 %	7.4 %
Usuario#3	14.9 seg.	72.2 %	21.4 %	6.4 %
Usuario#5	15.2 seg.	67.2 %	29.0 %	3.8 %
Media+Desv.	15.0±0.2 seg.	70,7±3,1%	23,4±4,9%	5.9±1,9%

tema ya que no efectuaría ninguna acción y el porcentaje de error, implica estar en reposo y que el sistema detecte que estamos imaginando el movimiento del brazo derecho. Para solventarlo se programó la barra de progreso, de forma que errores puntuales no implicasen una acción no deseada, siendo necesario pensar en un estado varias veces consecutivas para actuar sobre el menú.

#### Pruebas *online*

En estas pruebas se utilizaron los datos de 3 usuarios que anteriormente también habían participado en las pruebas *offline* (usuario 2, usuario 3 y usuario 5). Se utilizó la misma configuración de electrodos y los mismos algoritmos de procesamiento y clasificación que en las pruebas *offline*. Para ello se ha procedido del siguiente modo, de los N ficheros de cada usuario, se utilizaron todos menos uno para entrenar la red neuronal. El fichero restante se procesó con el algoritmo de procesamiento seleccionado para las pruebas *offline* y se simuló con la red creada. Con esto se obtuvieron 2 vectores de 0 sec y 1 sec que se correspondían con el estado de reposo y la imaginación del movimiento del brazo derecho. Con estos vectores se midieron los porcentajes de acierto, no detección y error. A continuación se introdujeron estos vectores en el sistema emulando el tiempo real para medir el tiempo que tardaría el usuario imaginando el movimiento del brazo derecho de forma sucesivamente en activar un estado, es decir, cuanto tarda la barra de progreso en superar el umbral. El umbral seleccionado en función de las pruebas realizadas y de los porcentajes *offline* fue de 5, es decir, debía igualarse este valor para que se active la opción en el menú. Esto se repitió N veces, una por cada fichero del usuario y se promediaron los resultados.

El tiempo en segundos midió el tiempo que tarda el usuario en cambiar el estado del dispositivo, es decir, en superar el umbral de la barra de progreso. El porcentaje de acierto es cuando el usuario está en reposo o imaginando el movimiento del brazo derecho y esto se detecta correctamente. El porcentaje de no detección es cuando el usuario está imaginando el movimiento del brazo derecho y éste no es detectado. El porcentaje de error es cuando se detecta que

se está imaginando el movimiento del brazo derecho mientras que el usuario está en reposo.

#### Resultados

Los porcentajes de aciertos de la red neuronal son muy cercanos al 100%, pero esto sucedió cuando se entrenó la red neuronal con los mismos valores que se usaban para testearla. En la última fila de la Tabla 1 se muestran los valores medios de todos los usuarios así como su desviación típica.

Para las pruebas *online* se realizó la secuencia y se obtuvieron los porcentajes de acierto, no detección y error, así como el tiempo medio requerido para activar una opción en el menú (Tabla 2). En la última fila de la tabla 2 se muestran los valores medios de todos los usuarios así como su desviación típica.

#### Discusión

A la vista de los resultados *offline* se concluye que éstos son porcentajes aceptables para el control de un sistema domótico. Los resultados *offline* se obtienen unos porcentajes de acierto y de error aceptables, pero al realizar la emulación *online* éstos mejoran notablemente. El porcentaje de acierto mejora aproximadamente un 10%, mientras que el de error se reduce en aproximadamente un 7%, y el de no detección se redujo también en un 4%.

Al realizar la emulación de tiempo real se obtiene que se requieren una media de 15 segundos para activar una opción del sistema domótico, teniendo en cuenta que el tiempo mínimo es de 10 segundos para el valor del umbral seleccionado en 5 (se toman decisiones cada 2 segundos).

En base a los resultados obtenidos con el sistema se puede concluir que la interfaz cerebral permite de forma satisfactoria controlar el sistema domótico. ■

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dornhege G, Millán JR, Hinterberger T, McFarland D, Müller K. Towards brain-computer interfacing. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. Forthcoming, 2006.



2. Nicoletis MAL. Actions from Thoughts. *Nature* 2001; 409:403-7.
3. Bayliss JD. Use of the Evoked Potential P3 Component for Control in a Virtual Environment. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2003; 11:113-6.
4. Gao X, Dignfeng X, Cheng M, Gao S. A BCI-based environmental controller for the motion-disabled. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2003; 11:137-40.
5. Millán JR, Ferrez PW, Buttfeld A. Non invasive brain-machine interfaces - Final report. IDIAP Research Institute - ESA, 2005.
6. Bashashati A, Fatourehchi M, Ward RK, Birch GE. A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals. *Journal of Neural Engineering* 2007; 4:R32-R57.
7. Decety J, Lindgren M. Sensation of effort and duration of mentally executed actions. *Scand. J Psychol* 1991; 32:97-104.
8. Clin J. Guidelines for standard electrode positions nomenclature. American Electroencephalographic Society. *Neurophysiol* 1991; 3:38-42.

---

**Conflicto de intereses**

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este trabajo. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.