
CASEIB
2022

XL Congreso
Anual de la
Sociedad
Española de
Ingeniería
Biomédica

40 AÑOS UNIENDO FUERZAS
PARA IMPULSAR LA
INGENIERÍA BIOMÉDICA

23-25 NOVIEMBRE 2022 | VALLADOLID

LIBRO DE ACTAS



GRUPO DE
INGENIERÍA
BIOMÉDICA
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



Sesión oral: Neurotecnologías II

Moderadores: Eduardo Rocón De Lima y Ana de los Reyes Guzmán

Evaluación del nivel de atención durante el entrenamiento de una BMI con un exoesqueleto de miembro inferior	308
Neuroprótesis para evaluar el efecto de estimulación vibratoria mecánica en el freezing de pacientes con Parkinson	312
Caracterización espacio-temporal de la clasificación de imaginación motora con herramientas de <i>explainable artificial intelligence</i> (XAI)	316
Diseño de una BCI mediante redes convolucionales profundas para la detección de la intención de parar ante un obstáculo inesperado	320
Evaluación de un videojuego multijugador basado en Brain Computer Interfaces utilizando c-VEPs	324
Rehabilitación de la marcha asistida por un sistema híbrido personalizable en dos casos de lesión medular incompleta	328

Evaluación de un videojuego multijugador basado en Brain Computer Interfaces utilizando c-VEPs

Selene Moreno-Calderón ^a, Víctor Martínez-Cagigal ^{a,b}, Eduardo Santamaría-Vázquez ^{a,b}, Sergio Pérez-Velasco ^a, Diego Marcos-Martínez ^a y Roberto Hornero ^{a,b}

^aGrupo de Ingeniería Biomédica (GIB), E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Valladolid;

^bCentro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN).

(selene.moreno@gib.tel.uva.es, robhor@tel.uva.es).

Resumen

Los videojuegos se han convertido en un elemento indispensable en el ámbito del entretenimiento. Estos tienen un gran potencial en los sistemas brain-computer interface (BCI), debido a la motivación que proporcionan. Para mejorar esta combinación, es conveniente centrarnos en la usabilidad y experiencia del usuario. Es por ello, que en este estudio se presenta la evaluación un videojuego BCI multijugador competitivo utilizando las propias señales cerebrales de los usuarios. El sistema ha sido probado en 22 sujetos de control. Se evaluó la eficiencia, eficacia y satisfacción mediante un análisis cuantitativo (precisión e ITR) y un análisis cualitativo (NASA-TLX y cuestionario de usabilidad). Tras la realización de las diferentes tareas se obtuvieron resultados preliminares los cuales mostraron que los usuarios no solo controlaron con éxito el sistema, alcanzando una precisión media de $95.47\% \pm 9.01\%$ sino que también se mostraban satisfechos con su uso.

1. Introducción

Los sistemas *brain-computer interface* (BCI) se definen como sistemas de comunicación que permiten al usuario interactuar con el medio a partir de la monitorización de su actividad cerebral, sin la intervención de músculos o nervios periféricos. Para interpretar las intenciones del usuario, en primer lugar, se registra su actividad cerebral mediante electroencefalografía, este suele ser el método más comúnmente usado debido su carácter no invasivo, su portabilidad y por ser de bajo coste [1].

Dado el gran avance en los últimos años del sector de los videojuegos, se estima que en la actualidad existen 18,1 millones de personas que juegan a videojuegos en España [2]. No obstante, la mayor cantidad de videojuegos están desarrollados de forma que se controlan mediante teclado, ratón o *joystick* dificultando así la accesibilidad de personas con grave discapacidad. Es por ello, que parece conveniente ahondar en la combinación videojuegos y sistemas BCI, con el objetivo de mejorar su calidad de vida e incrementar la independencia.

Hoy en día, el éxito o evaluación de sistemas BCI se suele centrar en la precisión y rendimiento. Sin embargo, aunque es un factor importante para la usabilidad del sistema, hay otros factores determinantes que también influyen y que puede afectar de manera positiva al funcionamiento general del sistema.

Es por ello, que es importante tener en cuenta un aspecto clave a la hora de trabajar con videojuegos BCI, la motivación [5] y no solo para sujetos sanos. Existen

estudios que sugieren que el juego competitivo mejora la atención y motivación de pacientes con ictus, siendo estos factores muy relevantes debido a las extensas terapias de rehabilitación. Por otro lado, otros experimentos hacen hincapié en el papel de evaluar la experiencia del usuario, así como la usabilidad y estabilidad de los sistemas BCI con la finalidad de mejorar los diseños y poder aumentar dicha motivación [6]. En resumen, la literatura científica sugiere que, a pesar de los avances en las capacidades de los sistemas BCI, existe una falta de usabilidad de estas por desarrolladores no expertos.

Un ejemplo de videojuego multijugador competitivo que se ha trasladado a sistemas BCI es el conocido juego “Conecta 4”, donde dos usuarios compiten para ganar con el objetivo de alinear 4 monedas del mismo color en horizontal, vertical o diagonal. Anteriormente, distintas versiones de este juego fueron llevadas a cabo en los estudios de Maby *et al.* [5] y Holz *et al.* [7] utilizando P300 y SMR, respectivamente. Las limitaciones de estos estudios recaen en los elevados tiempos de calibración y precisiones limitadas. Para suplir estas carencias, nos vamos a centrar en los potenciales evocados visuales modulados mediante código (c-VEPs), una señal de control caracterizada por alcanzar precisiones superiores con tiempos de calibración muy reducidos (e.g., >90% con 30s)

Tras realizar un análisis del estado de la técnica, no se ha encontrado ningún estudio que presente un videojuego BCI multijugador competitivo basado en c-VEPs, ni la evaluación de la usabilidad y cómo influye esta en el rendimiento del sistema. Por ello, en este estudio se ha tratado de proporcionar un videojuego BCI que cubra estas necesidades para los diferentes parámetros que evalúan la usabilidad y poder así aumentar dicha motivación. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo es presentar la evaluación de la usabilidad de un videojuego multijugador utilizando c-VEPs así como la comparativa con estudios previos que utilizan distintas señales de control. La aplicación ha sido evaluada por 22 sujetos sanos durante una única sesión, donde realizaron tareas guiadas, tareas libres y tareas multijugador competitivas.

2. Sujetos y metodología

2.1. Sujetos

22 sujetos de control (28 años \pm 2.60 años, 12 varones) participaron en los experimentos. Todos los sujetos dieron su consentimiento para participar y fueron informados previamente del objetivo del estudio.

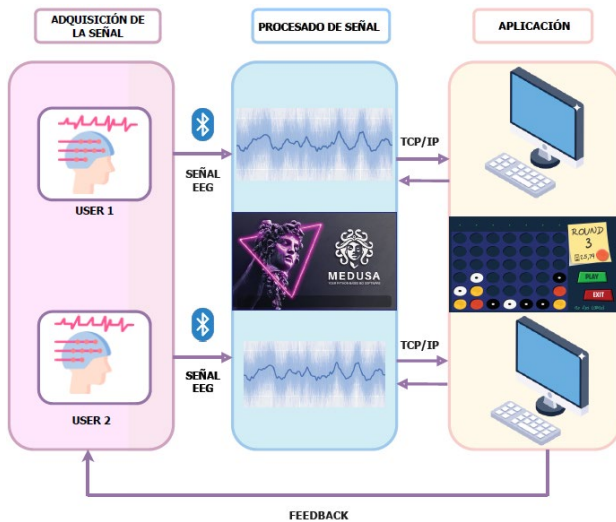


Figura 1. Arquitectura del sistema BCI.

2.2. Arquitectura del sistema BCI.

Tal y como muestra la Figura 1, el sistema BCI está formado por 3 etapas principales comunicadas entre sí: (1) adquisición del EEG; (2) procesado de la señal a través de MEDUSA [8], una plataforma de desarrollo de sistemas BCI (www.medusabci.com); y (3) la aplicación, el videojuego desarrollado en Unity.

2.2.1 Adquisición

La señal EEG se registró mediante dos equipos g.Nautilus Pro (g.Tec, Guger Technologies, Austria), con una frecuencia de muestreo de 250 Hz. Esta señal se transmitía a través de Bluetooth al ordenador que ejecutaba la instancia del videojuego. Se ubicaron 8 electrodos en el cuero cabelludo en las posiciones Fz, Cz, Pz, P3, P4, PO7, PO8, Oz, con referencia el lóbulo de la oreja derecha (A2) y tierra sobre AFz.

2.2.2 Procesado de la señal

Los 2 jugadores deben colocar las monedas en una de las siete columnas del tablero. Para determinar en qué columna debe caer la moneda en cada turno, se hace uso del procesado de referencia para c-VEPs basado en paradigma circular, compuesto por un filtrado paso-banda y un análisis de correlación canónica para generar la plantilla principal para cada comando. Dicha plantilla representa la respuesta c-VEP del sujeto. La plantilla para el resto de los comandos se calcula mediante desplazamiento circular. Para más información, se puede consultar el estudio de Martínez-Cagigal et al. [6].

Los sujetos centran su atención en la celda del tablero donde desean situar la moneda, mientras cada una de las posiciones posibles se ilumina siguiendo una versión desfasada de una secuencia pseudo-aleatoria de máxima longitud (m -secuencia) de 63 bits. La frecuencia de actualización de pantalla es de 120 Hz, por lo que la duración de un ciclo completo de la secuencia corresponde a 0.525 s (i.e. 63/120) [6].

La matriz de selección está formada por 7 comandos, correspondientes a cada una de las columnas donde puede colocar la moneda. Los retardos se determinaron en

múltiplos de 9 muestras con el objetivo de distanciar lo máximo posible los retardos en la m -secuencia de 63 bits, facilitando su posterior decodificación.

La atención del usuario a dicho estímulo visual genera una respuesta cerebral específica que se ve reflejada en el EEG, permitiendo determinar la posición en la que el usuario quiere colocar la moneda mediante un procesado de señal basado en el paradigma de desplazamiento circular [6].

2.2.3 Aplicación

La aplicación consiste en una versión del famoso juego “Conecta 4” en la que la finalidad es alinear cuatro monedas del mismo color en horizontal, vertical o diagonal en un tablero de 6x7 celdas. Los dos jugadores colocan las monedas de manera alterna, en una de las siete columnas del tablero.

3. Protocolo experimental

El procedimiento para evaluar la aplicación se llevó a cabo por 22 sujetos de control mediante 7 tareas en una única sesión. Las tareas realizadas se dividieron en 3 bloques diferenciados: tareas guiadas, tareas libres y modo multijugador.

En primer lugar, de cara a tener un mayor número de selecciones y corroborar el correcto funcionamiento del sistema, un solo sujeto realizaba las tareas de manera individual, intentado seguir las figuras de la plantilla proporcionada. Se realizaron 4 tareas guiadas, incrementando el número de selecciones a realizar, donde el usuario debía colocar la moneda en función a la figura de la plantilla; y 3 tareas libres con un número de selecciones menor y con mayor autonomía. Por último, en el modo multijugador, dos sujetos competían entre sí en 3 partidas diferentes.

Previo a la realización de todas las tareas, se realizó un entrenamiento para determinar los patrones c-VEP del sujeto y poder identificar hacia donde miraba en cada momento. En dicho entrenamiento se le pidió que centrara su atención en la primera celda. Se registraron 10 *trials* con 10 ciclos, 100 ciclos en total (52.50 s).

Para calcular los parámetros establecidos en cuanto a la usabilidad: (1) eficiencia, se calculó la precisión para cada tarea de cada usuario y la tasa de información por minuto (ITR); (2) eficacia: se evaluó de manera cualitativa a través del cuestionario estandarizado NASA-TLX; y (3) satisfacción, estimada mediante un cuestionario SUS de 10 preguntas de aspecto positivo y negativo. El cuestionario puntuaba según la escala de Likert de 1 a 5 puntos. La última pregunta estaba enfocada a propuestas de mejoras de la aplicación.

4. Resultados y discusión

A raíz de los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema BCI propuesto funciona de manera favorable. Todos los sujetos respaldan estos resultados tanto de forma objetiva, mediante mediciones, como subjetiva, mediante cuestionarios (NASA-TLX y SUS).

SUJETO	TAREAS GUIADAS	TAREAS LIBRES	MULTIJUGADOR	TOTAL
S01	98.95 %	100.00 %	100.00 %	99.65 %±0.49 %
S02	96.24 %	94.10 %	95.23 %	95.19 %± 0.87 %
S03	91.20 %	94.10 %	90.50 %	91.93 %±1.55 %
S04	95.29 %	97.44 %	87.03 %	93.25 %±4.48 %
S05	100.00 %	100.00 %	85.00 %	95.00 %±7.07 %
S06	85.08 %	91.11 %	88.33 %	88.17 %±2.42 %
S07	92.87 %	94.87 %	91.53 %	93.09 %±1.37 %
S08	92.04 %	87.87 %	100.00 %	93.30 %±5.03 %
S09	97.06 %	100.00 %	100.00 %	99.02 %±1.38 %
S10	78.28 %	81.83 %	71.20 %	77.10 %±4.42 %
S11	100.00 %	100.00 %	100.00 %	100.00 % ±0.00 %
S12	100.00 %	100.00 %	95.23 %	98.41 %± 2.25 %
S13	100.00 %	100.00 %	86.57 %	95.52 %±6.33 %
S14	100.00 %	100.00 %	86.06 %	95.35 %± 6.57 %
S15	96.67 %	100.00 %	95.23 %	97.30 %±1.99 %
S16	95.76 %	96.67 %	85.94 %	92.79 %±4.85 %
S17	95.71 %	100.00 %	100.00 %	98.57 %±2.02 %
S18	82.45 %	92.64 %	100.00 %	91.69 %±7.19 %
S19	92.67 %	92.65 %	96.29 %	93.87 %±1.71 %
S20	92.67 %	93.26 %	96.66 %	97.32 %± 1.97 %
S21	100.00 %	100.00 %	77.81 %	92.60 %±10.46 %
S22	98.61 %	100.00 %	82.14 %	93.58 %± 8.11 %
MEDIA+STD	94.30 %±6.30 %	95.60 %±8.30 %	92.8 %±7.14 %	95.47 %±9.01 %
ITR+STD	27.58 bpm± 4.25 bpm	28.83 bpm±3.79 bpm	25.53 bpm± 5.40 bpm	27.07 bpm±5.32 bpm

Tabla 1. Resultados del análisis cuantitativo (precisión e ITR).

4.1. Eficiencia

En la Tabla 1 se muestran las precisiones medias de cada sujeto para el conjunto de cada tipo de tarea, así como el total de todas estas y la ITR. La precisión media alcanzada para todas las tareas y de todos los sujetos fue de $95.47\% \pm 9.01\%$. Todos los sujetos fueron capaces de completar todas las tareas, y cabe resaltar que hubo sujetos que no tuvieron errores durante la elección de los comandos en diferentes tareas.

Por otro lado, se puede observar cómo existe cierto compromiso entre la precisión y la ITR. La precisión fue elevada para todas las tareas, siendo levemente inferior en el modo multijugador, esta diferencia se puede deber a la presión que genera competir contra otra persona, o al no tener tanta determinación para situar la moneda ya que solo se tiene 5,25 segundos para seleccionar la mejor opción y contrarrestar el movimiento del adversario. En cambio, la ITR máxima fue de 28,83 bpm para las tareas libres, esta se ve limitada puesto que, según la fórmula, esta depende directamente del número de comandos totales, establecido en este caso en 7, según el número de columnas donde el usuario podía situar la moneda.

4.2. Eficacia

En la Figura 2a), se muestran las puntuaciones medias obtenidas en el cuestionario NASA-TLX para todos los sujetos, donde se puede observar la importancia de cada uno de los factores como causantes de esa carga de trabajo y su importancia en cada tarea. La exigencia temporal es predominante. Las valoraciones de frustración, esfuerzo mental y esfuerzo físico son notablemente bajas. La puntuación global fue de 28.82 puntos, correspondiente a la media ponderada de las puntuaciones de los 6 parámetros.

El parámetro que más afectó al experimento fue la exigencia temporal, es decir, el usuario sentía cierta presión de tiempo debido al ritmo de selección de comandos. Hubo

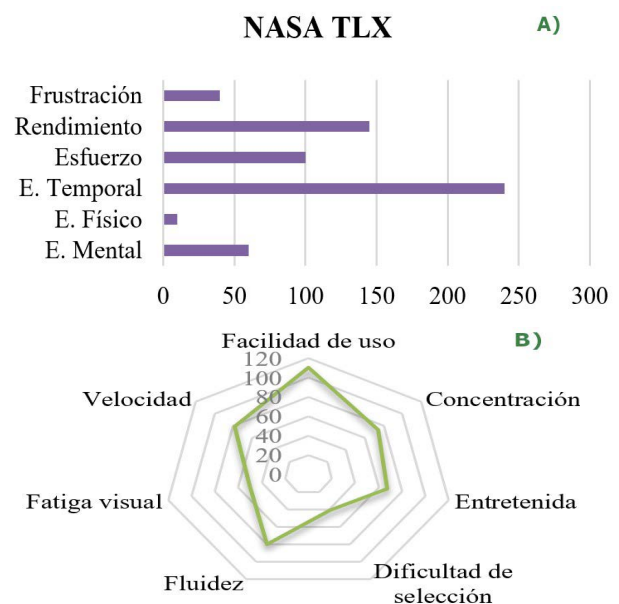


Figura 2. Resultados del análisis cualitativo del videojuego BCI. A) Resultados del cuestionario NASA-TLX. B) Resultados del cuestionario SUS.

cierta discordancia en este parámetro, por otro lado, algunos usuarios tenían seguridad e indicaron que con menor tiempo también podrían haber realizado la selección, por lo que el tiempo establecido no les parecía el más adecuado.

En general, los sujetos destacaron que no tuvieron demasiada fatiga, por lo que esto permitía utilizar la aplicación durante un largo periodo de tiempo sin tener cansancio visual. Por otro lado, los usuarios se sentían seguros y relajados a medida que iban realizando las selecciones e indicaron que las tareas propuestas fueron fáciles y sencillas, y que se sentían satisfechos con el nivel de ejecución de estas.

4.3. Satisfacción

En la Figura 2b) se muestran los resultados cualitativos del cuestionario SUS proporcionado a los sujetos, reflejando que todos los sujetos fueron considerados satisfechos con la aplicación. Los sujetos indicaron que la aplicación desarrollada era fácil de usar y respondía con velocidad y fluidez. Se alcanzó un valor total de 80.60 sobre 100.

El aspecto mejor valorado fue el de interfaz de usuario, debido a ser intuitiva y accesible. Algunos sujetos indicaron que tuvieron dificultad para seleccionar comandos, esto estaba correlacionado con aquellos que alcanzaron una precisión levemente inferior. En contraposición, el aspecto peor valorado fue el tiempo de selección de comandos. De la misma manera, los resultados son consistentes entre los sujetos, lo que indica que dichas conclusiones están correctamente fundamentadas.

Como sugerencias de mejora se indicó incrementar el espacio entre iluminaciones para evitar posibles distracciones y ajustar el tiempo de selección a cada usuario, algunos sujetos necesitaban más tiempo para

pensar dónde querían colocar la moneda y otros necesitaban menos tiempo para concentrarse.

5.4 Comparativa con otros estudios

A diferencia de los otros estudios BCI que desarrollaron un videojuego multijugador de tipo “Conecta 4” [5, 7] este alcanza precisiones muy elevadas a la par de valoraciones positivas en cuanto a la satisfacción.

En Maby *et al.* [7], se presentó una versión BCI del juego “Conecta 4” utilizando potenciales evocados P300. La evaluación experimental se realizó con 2 sujetos de control, obteniendo una precisión media del 83,30% e ITR de 37,00 bpm. Por otro lado, en Holz *et al.* [5] se desarrolló el videojuego “Connect 4” utilizando los SMR elicitados mediante imaginación motora de manos y pie. Se evaluó la aplicación en 4 usuarios con restricciones motoras severas. Se obtuvo una precisión media de 62,65% con ITR media de 0,53 bpm. Al constar de varias sesiones la carga de trabajo fue moderada, aunque la frustración contribuyó a la fatiga de algunos sujetos

Como se puede observar, la precisión de nuestro estudio ($95.47\% \pm 9.01\%$) fue superior frente al 83,30% en Maby *et al.* [7] y 62,25% en Holz *et al.* [5]. Estos resultados sugieren que el tipo de señal más apropiada para sistemas de control es c-VEPs. En nuestro estudio se necesitó 52.50 segundos para calibrar el sistema BCI. Sin embargo, en el caso del entrenamiento para P300 se suele tardar entre 20 y 30 minutos, tiempo que se incrementa para el caso de SMR pudiendo durar horas o días, e incluso hay personas que nunca llegan a generarlos de manera satisfactoria.

Por otro lado, los videojuegos tienen un gran potencial para su uso en sistemas BCI, puesto que tienen como finalidad entretener y motivar a los usuarios. La motivación juega un papel relevante en el éxito de la interacción BCI. El número de sesiones se relaciona con la motivación y el estado del ánimo. En nuestro estudio y en Maby *et al.* [7] los sujetos pudieron alcanzar una mayor precisión después de una sola sesión, mientras que en Holz *et al.* [5] ningún usuario pudo usar SMR después de una sola sesión, teniendo que realizar 9 sesiones. A pesar de ello, no pudieron alcanzar una precisión del 70%, considerado el mínimo para obtener el control de un sistema BCI [6].

5.5 Limitaciones y líneas futuras

A pesar de los resultados favorables y de la consecución con éxito del objetivo, este estudio no está exento de limitaciones. Si bien se ha demostrado la usabilidad del videojuego BCI desarrollado con sujetos de control, creemos que sería necesario evaluarlo también en personas con grave discapacidad motora, puesto que tradicionalmente han sido el objetivo de los sistemas BCI.

Por otro lado, como el parámetro con aspecto negativo fue la velocidad de selección, para superar esta limitación se contempla implementar técnicas de “early stopping”. Este algoritmo detectaría de forma dinámica el número de ciclos necesarios para emitir una selección, con lo cual no se

necesitaría esperar a que se mostraran los 10 ciclos establecidos, sino que se adaptaría a cada usuario.

5. Conclusiones

Este estudio se ha centrado en evaluar un videojuego BCI multijugador basado en c-VEPs en 22 sujetos de control. Para ello, se han llevado a cabo distintas tareas. Además, este estudio presenta ventajas frente a otros videojuegos BCI “Connect 4” anteriores. El videojuego obtuvo una eficiencia, eficacia y satisfacción elevada, justificada mediante el análisis cuantitativo (se alcanzó una precisión del $95.47\% \pm 9.01\%$) y cualitativo correspondiente (resultados de los cuestionarios muy favorables).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos RTC2019-007350-1, PID2020-115468RB-I00 y TED2021-129915B-I00 del Ministerio de Ciencia, Innovación/Agencia Estatal de Investigación y European Regional Development Fund (ERDF), así como por CIBER-BBN a través del Instituto de Salud Carlos III.

Referencias

- [1] Wolpaw J. R., Birbaumer N., McFarland D. J., G. Pfurtscheller, and Vaughan T. M., (2002) “Brain-computer interfaces for communication and control.” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 113, no. 6, pp. 767–91.
- [2] AEVI, Anuario de la industria del videojuego en España, 2021, pp 22.
- [3] Gürkök, Hayrettin; Nijholt, Anton; Poel, Mannes; Obbink, Michel, (2013). “Evaluating a multi-player brain-computer interface game: Challenge versus co-experience”. Entertainment Computing
- [4] Holz, E., Höhne, J., Staiger-Sälzer, P., Tangemann, M., y Kübler, A. (2013). “Brain-computer interface controlled gaming: Evaluation of usability by severely motor restricted end-users.” *Artificial Intelligence in Medicine*, 59(2), 111–120. g, 4(3), 195–203.
- [5] Holz, E., Höhne, J., Staiger-Sälzer, P., Tangemann, M., y Kübler, A. (2013). “Brain-computer interface controlled gaming: Evaluation of usability by severely motor restricted end-users.” *Artificial Intelligence in Medicine*, 59(2), 111–120.
- [6] Martínez-Cagigal V, Thielen J, Santamaría-Vázquez E, Pérez-Velasco S, Desain P, Hornero R., (2021) “Brain-computer interfaces based on code-modulated visual evoked potentials (c-VEP): a literature review.” *J Neural Eng.* Nov 26;18(6).
- [7] Maby, E., Perrin, M., Bertrand, O., Sanchez, G., y Mattout, J. (2012). “BCI Could Make Old Two-Player Games Even More Fun: A Proof of Concept with “Connect Four.”.” *Advances in Human-Computer Interaction*, 1–8.
- [8] Santamaría-Vázquez, E., Martínez-Cagigal V., and Hornero R., (2018) “MEDUSA: Una Nueva Herramienta Para El Desarrollo de Sistemas Brain-Computer Interface Basada En Python.” *Cognitive Area Networks* 5 (1): 87–92.
- [9] Martínez-Cagigal, V., Gómez-Pilar, J., Alvarez, D., & Hornero, R., (2016). “An asynchronous P300-based brain-computer interface web browser for severely disabled people.” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(8), 1332-1342.