

Jornadas de Automática

Desarrollo y validación de un videojuego basado en IM para la neurorrehabilitación de pacientes con limitaciones motoras de miembro inferior

Cavaliere-Ballesta, Carlo.^{a,b}, Quiles, Vicente^{a,b}, Polo-Hortigüela, Cristina^{a,b}, Ortiz, Mario^{a,b,*},
Iáñez, Eduardo^{a,b}, Azorín, José M.^{a,b,c}

^aBrain-Machine Interface Systems Lab, Miguel Hernández University of Elche, Elche, Spain

^bEngineering Research Institute of Elche – I3E, Miguel Hernández University of Elche, Elche, Spain

^cValencian Graduated School and Research Network of Artificial Intelligence - ValGRAI, Valencia, Spain

To cite this article: Cavaliere-Ballesta, Carlo, Quiles, Vicente, Polo-Hortigüela, Cristina, Ortiz, Mario, Iáñez, Eduardo, Azorín, José M. 2025. Development and validation of a motor imagery-based serious game for the neurorehabilitation of patients with lower-limb motor impairments. *Jornadas de Automática*, 46.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12111>

Resumen

Las interfaces cerebro-computadora (BCIs) se han consolidado como una herramienta prometedora para la neurorrehabilitación. Entre los paradigmas de control más utilizados en este contexto se encuentra la IM, debido a su capacidad para activar áreas corticales relacionadas con el movimiento. No obstante, el entrenamiento previo del sujeto y el coste asociado pueden dificultar su aplicación clínica. Con esto en mente, se ha desarrollado un sistema de bajo coste basado en un videojuego controlado por IM, diseñado para ser utilizado de forma autónoma en el hogar y así fomentar la participación activa en la rehabilitación. El sistema fue validado experimentalmente con dos sujetos de control: el primero alcanzó una exactitud media de 69 % y el segundo, del 80 %. Ambos completaron con éxito las partidas, lo que sugiere que el uso del videojuego puede contribuir positivamente al proceso de rehabilitación, ofreciendo un apoyo accesible y motivador a las rutinas clínicas.

Palabras clave: Interfaces cerebro-computadora, IM, Neurorrehabilitación, Procesamiento de señales biomédicas, Rehabilitación domiciliaria, Videojuegos serios

Development and Validation of a Motor Imagery-Based Video Game for the Neurorehabilitation of Patients with Lower Limb Motor Impairments

Abstract

Brain-computer interfaces (BCIs) have become a promising tool for neurorehabilitation. Among the most widely used control paradigms in this context is motor imagery, due to its ability to activate cortical areas related to movement. However, the need for prior user training and the associated cost can hinder its practical clinical application. With this in mind, a low-cost system based on a motor imagery-controlled video game has been developed, designed for autonomous use at home, promoting both training in BCI usage and active participation in the rehabilitation process. The system was experimentally validated with two control subjects, with mean accuracies of 69 % and 80 % during validation. Both successfully completed the game sessions, suggesting that the use of the video game may positively contribute to the rehabilitation process, offering an accessible and motivating complement to clinical routines.

Keywords: Brain-computer interfaces, Motor imagery, Neurorehabilitation, Biomedical signal processing, Home-based rehabilitation, Serious games

*Autor para correspondencia: ccavaliere@umh.es

1. Introducción

La pérdida de movilidad en las extremidades inferiores afecta considerablemente la calidad de vida de las personas, limitando su autonomía y participación en actividades cotidianas. Si bien esta pérdida puede deberse a múltiples causas, una de las más prevalentes es el accidente cerebrovascular (ACV), que puede provocar daños en áreas encargadas de la planificación y ejecución del movimiento, y es responsable de aproximadamente el 60 % de los casos de discapacidad motora en adultos mayores, aumentando con la edad (Langhorne et al., 2009), afectando a 93.8 millones de personas vivas con antecedentes a nivel global (Feigin et al., 2022). Otra etiología relevante es la lesión medular (LM), una condición crónica que afecta actualmente a más de 15 millones de personas en todo el mundo y que generó aproximadamente 4.5 millones de años vividos con discapacidad en 2021 (Organization, 2024).

Las terapias tradicionales de rehabilitación motora, como la fisioterapia convencional o los ejercicios asistidos manualmente, constituyen la base del tratamiento inicial tras una lesión neurológica. No obstante, su eficacia suele depender en gran medida de la intensidad, frecuencia y duración de las sesiones, así como del nivel de implicación del paciente (Dobkin, 2004).

En los últimos años, las interfaces cerebro-computador (BCI) han surgido como una alternativa innovadora para la neurorrehabilitación de estos pacientes, al permitir la interacción con dispositivos externos a través de señales neuronales (Ortiz et al., 2020). En particular, las BCI basadas en electroencefalografía (EEG) y en el paradigma de la Imaginación Motora (IM) han demostrado ser útiles para activar áreas motoras del cerebro sin necesidad de movimiento físico, favoreciendo así la neuroplasticidad y la recuperación funcional (Pfurtscheller and Neuper, 1997).

Sin embargo, las soluciones basadas en BCI también presentan ciertas limitaciones que dificultan su aplicación generalizada. Por un lado, el equipamiento necesario puede resultar costoso y complejo de instalar fuera del ámbito clínico. Por otro, el uso efectivo de estas tecnologías requiere habitualmente un período de entrenamiento prolongado por parte del paciente, lo que puede reducir su adherencia y eficacia terapéutica (Costa-García et al., 2019).

Con el objetivo de superar estas barreras, se propone el desarrollo de un sistema de bajo coste basado en EEG y un videojuego serio que permita realizar sesiones de entrenamiento desde el domicilio. Por videojuego serio se entiende un software interactivo diseñado con un propósito principal distinto al entretenimiento, como la educación, la formación o, en este caso, la rehabilitación funcional (Michael and Chen, 2006). Esta categoría de juegos ha demostrado ser eficaz para aumentar la participación del sujeto y reforzar la adherencia terapéutica en entornos clínicos, con estudios que reportan una ventaja estadísticamente significativa frente a la fisioterapia convencional (Meijer et al., 2018; Vieira et al., 2021).

Este enfoque no solo reduce la necesidad de equipamiento especializado y supervisión clínica, sino que también mejora la motivación del sujeto mediante una experiencia lúdica e interactiva, facilitando el aprendizaje del control mental y su aplicación en procesos de rehabilitación motora, como ya se ha sugerido en estudios anteriores (Ferrero et al., 2021). La

BCI ha sido diseñada para personas con ACV o LM, y el presente estudio constituye una primera validación realizada con sujetos sanos.

2. Método

2.1. Participantes

Dos sujetos sanos (edad media 25.5 ± 2.1 años) fueron evaluados, los cuales fueron previamente informados sobre los experimentos, firmando también un consentimiento informado de acuerdo con los principios establecidos en la Declaración de Helsinki.

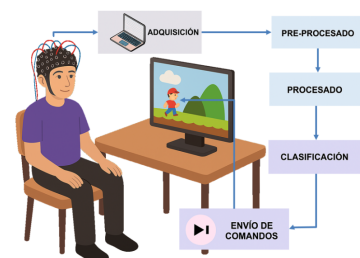
Ninguno de los dos sujetos control presentó enfermedades ni alteraciones motoras. Ambos habían participado previamente en varios estudios relacionados con la IM.

El estudio fue evaluado y aprobado por el Comité de Ética e Integridad de la Universidad Miguel Hernández de Elche (código: DIS.JAP.01.22).

2.2. Material

El montaje experimental, mostrado en la Figura 1, incluye los siguientes elementos:

- Un sistema de amplificación EEG Unicorn Hybrid Black (gTec, Austria) para registrar señales cerebrales. Este dispositivo tiene una frecuencia de muestreo de hasta 250 Hz y dispone de 8 canales de adquisición: Fz, Cz, P3, Pz, P4, PO7 y Oz, siguiendo el sistema internacional 10-20.
- Un ordenador portátil fue utilizado para conectar el dispositivo EEG y operar con la interfaz del videojuego.



(a) Esquema de la BCI



(b) Ejemplo de partida

Figura 1: Sistema experimental



Figura 2: Capturas del videojuego desarrollado.

2.3. Protocolo de pruebas

En la Figura 2 se muestran algunas capturas del videojuego. El objetivo de los jugadores es ayudar al protagonista a llegar al final de un escenario unidimensional (es decir, un entorno lineal donde el personaje solo puede avanzar o detenerse a lo largo de un eje horizontal fijo, sin desplazamiento vertical ni exploración libre) sin ser derrotado por los enemigos. Para ello, durante la partida deben seguir dos instrucciones que aparecen en pantalla durante algunos segundos: *Imagina*, la instrucción que deberán mantener durante gran parte de la partida, en la cual los pacientes deben realizar IM de caminar para que el avatar comience a moverse o continúe en movimiento evitando así ser alcanzado por el enemigo que lo persigue; y *Relax*, que indica al sujeto que debe relajarse para que el personaje se detenga y pueda neutralizar a los enemigos que aparecen por la derecha de la pantalla (dirección en la que avanza el personaje). El avatar dispone de cinco vidas en total, lo que le permite perder como máximo cuatro.

Para que este lazo cerrado funcione correctamente, es decir, para que los sujetos sientan que controlan al personaje a través de sus estados mentales, cada sesión experimental se divide en tres fases: instrumentación, entrenamiento y validación, con una duración total aproximada de 45 minutos.

1. Fase de instrumentación (aproximadamente 10 minutos): los sujetos se colocan frente a la pantalla del ordenador. Tras una explicación breve y concisa sobre las tareas a realizar y cómo ejecutar correctamente la IM, se toman las medidas axiales y coronales necesarias para la colocación del gorro. Finalmente, se aplica gel conductor a los electrodos, verificando la calidad de la señal durante el proceso.
2. Fase de entrenamiento: consiste en aproximadamente cinco sesiones de dos minutos cada una. Durante esta fase, la BCI opera en lazo abierto, es decir, la información del EEG del sujeto no se utiliza aún para controlar al avatar. En su lugar, se ejecuta una partida perfecta donde el avatar se comporta de manera ideal: se mueve y se detiene exactamente cuando corresponde. El EEG se registra durante estas sesiones con el fin de entrenar el modelo de aprendizaje automático. Al finalizar cada

sesión, el modelo se entrena no solo con los datos recién adquiridos, sino también con los de todas las sesiones anteriores, aplicando un proceso de reentrenamiento continuo.

3. Fase de validación: se realizan tres partidas reales, durante las cuales el sujeto controla efectivamente al avatar mediante sus estados mentales, según el modelo entrenado previamente. La duración de cada partida varía entre dos y tres minutos, dependiendo del número de paradas innecesarias. Al finalizar cada partida, se muestran al sujeto las vidas restantes y la cantidad de enemigos derrotados.

2.4. Secuencia de la BCI

Tanto en la fase offline (tras los entrenamientos) como en la online (durante la validación), las señales EEG adquiridas en ocho canales se separan en bandas con tres filtros de variable de estado: la banda Alfa (6-14 Hz), la banda Beta baja (10-28 Hz) y la banda Beta alta (23-47 Hz). También se aplica un filtro Notch a 50 Hz para reducir la interferencia de la red eléctrica. De esta forma, aislamos la señal cerebral de posibles ruidos que tengan otro origen.

Con tal de ser capaces de poder discernir los momentos de mayor involucración motora, a esta señal preprocesada se le aplica un algoritmo de Common Spatial Patterns (CSP), extrayendo un vector de características espaciales por época y reduciendo así las dimensiones. Estos datos procesados se introducen en un clasificador LDA (Análisis Discriminante Lineal), obteniendo finalmente una distinción de dos posibles clases: Relax (clase 0) o IM (clase 1).

La BCI trabaja con ventanas de dos segundos de señal (500 muestras), con un avance de 0.2 segundos (50 muestras), realizándose predicciones en cada época. El avatar del videojuego tendrá una velocidad que dependerá de las veinte últimas predicciones, estableciéndose umbrales dependiendo de la exactitud promedio: menos de ocho predicciones de clase IM asignará una velocidad de 0 (parado), entre 8 y 12 tendrá una velocidad de 1 (caminar), entre 12 y 16 de 2 (trote) y entre 17 y 20, de 3 (carrera).

3. Resultados

3.1. Exactitudes del clasificador

Los resultados presentados en la Figura 3 muestran las exactitudes generales del clasificador LDA (sin distinguir entre clases Relax e IM).

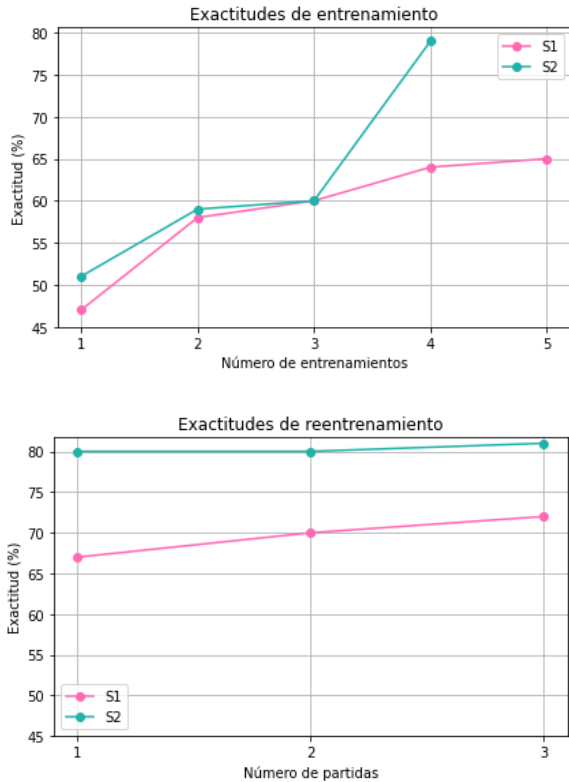


Figura 3: Exactitudes vs. índice de la sesión

En la primera gráfica se muestran los resultados correspondientes a las partidas de entrenamiento (lazo abierto) para el primer sujeto (S1) y para el segundo (S2). El primer punto representa la exactitud tras evaluar la primera sesión; el segundo, tras evaluar la primera y la segunda, y así sucesivamente, hasta el cuarto o quinto punto, que considera todas las sesiones anteriores. En la segunda gráfica se representan las exactitudes obtenidas al evaluar todas las sesiones de entrenamiento más cada partida adicional de validación.

Ambos sujetos mejoran progresivamente su exactitud a medida que completan más sesiones, tanto en la fase de entrenamiento como en la de validación. No obstante, esta mejora es más pronunciada durante el entrenamiento que en las repeticiones del test de validación.

3.2. Puntuaciones de las partidas

Además de las exactitudes de clasificación, se recopilaban métricas adicionales relevantes para evaluar el desempeño en cada partida, como se muestra en la Figura 4.

Cada enemigo derrotado equivale a una vida no perdida. Sin embargo, también pueden perderse vidas si el enemigo que persigue al jugador lo alcanza. Otro indicador relevante es el número de arranques y paradas: aunque exceder el número ideal no implica directamente una pérdida de vidas, sí puede prolongar la duración de la prueba y aumentar la frustración

del sujeto, por lo que se considera un parámetro inversamente proporcional al desempeño.

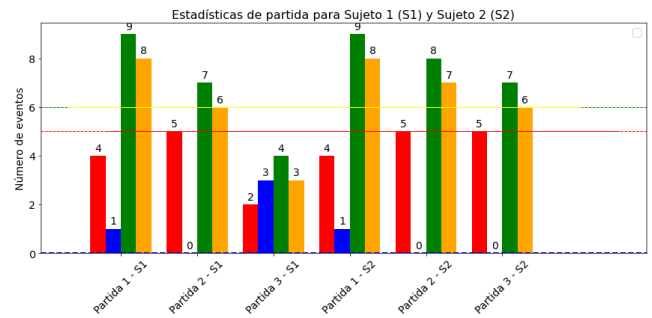


Figura 4: Puntuaciones de cada partida jugada. En azul: el número de criaturas derrotadas. En rojo: el número de veces que las criaturas han hecho daño al personaje. En verde: el número de arranques para llegar a correr. En amarillo: el número de detenciones.

Las líneas horizontales discontinuas en la gráfica indican los valores ideales: cinco enemigos derrotados, cero vidas perdidas, cinco paradas (una por cada enemigo más la última, al llegar a la bandera) y seis arranques (una inicial más una para cada parada).

Tanto S1 como S2 logran sobrevivir durante todas las partidas. Es más: el sujeto S1 completa una partida sin perder ninguna vida, y el sujeto S2, dos.

Dado que el número de arranques y paradas no supera de forma significativa los valores ideales, se considera que el control ejercido sobre el personaje fue adecuado.

4. Discusión

En primer lugar, las puntuaciones de exactitud alcanzadas por los participantes, tanto en fase de entrenamiento como en validación, fueron similares o mayores comparadas a otros estudios que emplean IM en BCI Ferrero et al. (2022) (López-Larraz et al., 2012), lo que sugiere que es factible emplear BCI basadas en IM como sistema de control en videojuegos serios.

Un aspecto destacable es que, si bien se han desarrollado otros juegos serios que funcionan con BCI Atilla et al. (2024), su cantidad es limitada, sobre todo en el campo de la neurorehabilitación.

Si bien el montaje de un sistema EEG siempre requiere de cierta instrucción y práctica previa, sobre todo teniendo en cuenta la carga habitual del personal clínico, el reducido número de electrodos y la ausencia de otros elementos más allá de un PC portátil facilitan esta transferibilidad a entornos clínicos reales e incluso al hogar del paciente, mejorando su integración con los ejercicios de rehabilitación que los pacientes estén realizando.

No obstante, deben reconocerse ciertas limitaciones del estudio. El tamaño de muestra fue reducido a sólo dos pacientes, lo cual impide realizar inferencias generalizables o comparar subgrupos clínicos. Además, ambos sujetos contaban con experiencia previa en el uso de sistemas BCI, lo que podría haber influido positivamente en los resultados obtenidos. Para futuras validaciones, sería deseable incluir una

muestra más amplia y diversa, incorporando pacientes sin experiencia previa en interfaces neuronales. Esto permitiría evaluar con mayor realismo la usabilidad y la curva de aprendizaje del sistema en sujetos clínicos típicos.

Como mejora, se propone proporcionar al sujeto un mayor número de indicadores de lo bien que se ha jugado la partida, como por ejemplo un sistema de puntuación de 0 al 100 que incluya no solo vidas perdidas y enemigos derrotados, sino también tiempo de partida. Este sistema de recompensas mejoraría la interacción y la retroalimentación positiva para el sujeto, potencialmente llevándolo a querer mejorar con el tiempo y así mejorar su adherencia a este ejercicio de apoyo a la rehabilitación.

Otro aspecto a considerar es la duración del entrenamiento. Aunque se obtuvieron resultados positivos, se plantea la posibilidad de sustituir algunas de las partidas de entrenamiento, durante las cuales el sujeto no controla el personaje, por partidas de validación, mucho más interactivas, y comprobar que se observen incrementos similares en la exactitud de los clasificadores.

Agradecimientos

Esta contribución es parte del proyecto PDC2022-133539-I00 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. Además, también ha sido financiada por la Ayuda PRE2022-103336 financiada por MICIU/AEI /10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Referencias

- Atilla, S., et al., 2024. A novel approach for brain-computer interface-based rehabilitation using serious games. *Heliyon* 10 (1), e02431.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451958824001416>
DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e02431
- Costa-García, A., Iáñez, E., del Ama, A. J., Gil-Agudo, A., Azorín, J. M., 2019. Eeg model stability and online decoding of attentional demand during gait using gamma band features. *Neurocomputing* 360, 151–162.
DOI: 10.1016/j.neucom.2019.06.021
- Dobkin, B. H., 2004. Strategies for stroke rehabilitation. *Lancet Neurology* 3 (9), 528–536.
DOI: 10.1016/S1474-4422(04)00851-8
- Feigin, V. L., Stark, B. A., Johnson, C. O., Roth, G. A., et al., 2022. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019. *The Lancet Neurology* 21 (10), 795–820.
DOI: 10.1016/S1474-4422(22)00210-0
- Ferrero, L., Ortiz, M., Quiles, V., Iáñez, E., Azorín, J. M., 2021. Improving motor imagery of gait on a brain–computer interface by means of virtual reality: A case of study. *IEEE Access* 9, 49121–49130.
DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068929
- Ferrero, L., Quiles, V., Ortiz, M., Iáñez, E., Azorín, J. M., 2022. Bmi basada en imaginación motora de la marcha para el control de un exoesqueleto en pacientes con lesión medular. In: *XLIII Jornadas de Automática: libro de actas*. Universidad da Coruña, pp. 79–86.
URL: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/31357>
DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0079
- Langhorne, P., Bernhardt, J., Kwakkel, G., 2009. Stroke rehabilitation. *The Lancet* 373 (9678), 1693–1702.
DOI: 10.1016/S0140-6736(09)60338-1
- López-Larraz, E., Antelis, J. M., Montesano, L., Gil-Agudo, A., Minguez, J., 2012. Continuous decoding of motor attempt and motor imagery from eeg activity in spinal cord injury patients. In: *Proceedings of the 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. pp. 1798–1801.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6346299>
DOI: 10.1109/EMBC.2012.6346299
- Meijer, H., Graafland, M., Goslings, J., Schijven, M., 2018. Systematic review on the effects of serious games and wearable technology used in rehabilitation of patients with traumatic bone and soft tissue injuries. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 99 (10), 1890–1899.
DOI: 10.1016/j.apmr.2018.02.022
- Michael, D. R., Chen, S., 2006. *Serious Games: Games That Educate, Train, and Inform*. Thomson Course Technology, Boston, MA.
- Organization, W. H., 2024. Spinal cord injury.
url<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>, fact sheet, 16 April 2024.
- Ortiz, M., Iáñez, E., Gaxiola-Tirado, J. A., Gutiérrez, D., Azorín, J. M., 2020. Study of the functional brain connectivity and lower-limb motor imagery performance after transcranial direct current stimulation. *International Journal of Neural Systems* 30 (08), 2050038.
DOI: 10.1142/S0129065720500380
- Pfurtscheller, G., Neuper, C., 1997. Motor imagery activates primary sensorimotor area in humans. *Neuroscience Letters* 239 (2–3), 65–68.
DOI: 10.1016/S0304-3940(97)00889-6
- Vieira, C., da Silva Pais-Vieira, C. F., Novais, J., Perrotta, A., Sep. 2021. Serious game design and clinical improvement in physical rehabilitation: Systematic review. *JMIR Serious Games* 9 (3), e20066, revisión sistemática.
DOI: 10.2196/20066