



PROYECTOS CERO – ENVEJECIMIENTO

FUNDACIÓN GENERAL CSIC

Aplicación de sistemas *Brain Computer Interface* (BCI) al entrenamiento cognitivo y al control domótico para prevenir los efectos del envejecimiento

Resultados del proyecto

Autores:

Grupo de Ingeniería Biomédica (GIB) – Universidad de Valladolid

Centro de Referencia Estatal de Discapacidad y Dependencia– CRE-DyD

Cognitive Bioengineering Group – CSIC



Contenidos

1.	Introducción	3
2.	Desarrollo de una herramienta basada en BCI para el entrenamiento cognitivo de personas mayores	3
2.1.	Herramienta BCI de entrenamiento cognitivo	3
2.2.	Evaluación de la aplicación NFT basada en BCI.....	11
3.	Desarrollo de una herramienta basada en BCI para la asistencia de personas con discapacidad severa en el hogar.....	16
3.1.	Herramienta BCI de asistencia a personas con discapacidad severa en el hogar.....	16
3.2.	Evaluación de la aplicación asistiva basada en BCI	23
4.	Análisis conjunto de las aplicaciones BCI desarrolladas	25
4.1.	Población bajo estudio	25
4.2.	Protocolo del experimento	25
4.3.	Resultados	27
4.4.	Discusión de los resultados	28

1. Introducción

El proyecto BCI-Ageing propone el empleo de herramientas basadas en sistemas *Brain Computer Interface* (BCI) con el objetivo de promover el envejecimiento activo. Para ello, se han diseñado, desarrollado y evaluado 2 herramientas BCI: (i) aplicación BCI de entrenamiento cognitivo contra los efectos del envejecimiento y (ii) aplicación BCI domótica para asistir en el hogar a las personas mayores dependientes. En primer lugar, este documento describe las principales características de las herramientas desarrolladas, así como los resultados de su evaluación por parte de usuarios reales. En segundo lugar, se muestra el protocolo de pruebas desarrollado para evaluar conjuntamente ambas aplicaciones, con el objetivo de estudiar la influencia de un entrenamiento cognitivo previo sobre la capacidad de los usuarios para utilizar la herramienta asistiva de control domótico.

2. Desarrollo de una herramienta basada en BCI para el entrenamiento cognitivo de personas mayores

2.1. Herramienta BCI de entrenamiento cognitivo

En el proyecto BCI-Ageing se ha desarrollado una herramienta BCI orientada al entrenamiento cognitivo basada en la detección de ritmos sensoriomotores. La herramienta propuesta permite a los usuarios realizar tareas de entrenamiento cognitivo (CT) y *neurofeedback training* (NFT). Concretamente, la herramienta integra 5 tareas NFT y una tarea CT. A continuación, se describen estas tareas:

- Tarea NFT de tipo 1. En esta tarea de entrenamiento básico se propone a los usuarios 2 posibles ejercicios. En los ejercicios del primer tipo se muestra en la pantalla del ordenador una imagen que corresponde a una puerta cerrada. El usuario debe imaginar repetidamente movimientos de la mano derecha para que la puerta se abra durante la fase de realimentación. Para reforzar las instrucciones dadas al usuario, la aplicación muestra un mensaje escrito con el tipo de movimiento que debe imaginar, en este primer caso "Derecha". Mediante el análisis de las bandas de frecuencia μ y β del registro de EEG del usuario se detectará si está pensando en movimientos de la mano derecha y se mostrará una nueva imagen con una puerta abierta durante la fase de post-realimentación. El segundo tipo de ejercicio muestra una ventana cerrada. En este caso, el usuario debe imaginar repetidamente movimientos de la mano izquierda durante la fase de realimentación para que la ventana se abra. La aplicación también muestra un mensaje escrito con el tipo de movimiento que debe imaginar el usuario, en este segundo caso "Izquierda". Si la aplicación detecta que se está realizando

la tarea de imaginación correcta, se mostrará una ventana abierta durante la fase de post-realimentación. Ambos tipos de ejercicios se muestran en las Figuras 1 y 2.

- Tarea NFT de tipo 2. Esta tarea contiene 6 escenarios diferentes con 3 posibles objetivos. Durante la fase de pre-realimentación se muestra la imagen de una casa, de un armario o de un frigorífico aleatoriamente a la derecha o a la izquierda de la pantalla del ordenador. Durante la fase de realimentación se muestra en el centro de la pantalla la silueta de una persona, unos pantalones o un alimento (pescado), respectivamente. Durante esta fase, el usuario debe imaginar repetidamente movimientos de la mano derecha o izquierda para mover el cursor (imagen central) hacia el lado de la pantalla en el que se encuentre el objetivo. Durante la ejecución de esta tarea la aplicación también muestra un mensaje en la pantalla con el tipo de movimiento que el usuario debe imaginar: “Derecha” o “Izquierda”. Si el cursor alcanza el objetivo en el tiempo proporcionado, entonces la aplicación muestra una nueva imagen con la puerta de la casa, del armario o del frigorífico abierta durante la fase de post-realimentación. Las Figuras 3 y 4 muestran diferentes capturas de pantalla durante la realización de tareas NFT de tipo 2.

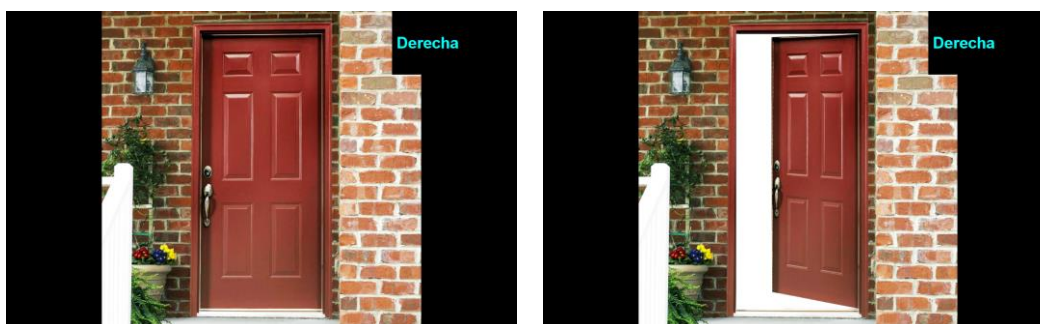


Figura 1. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 1 – Tipo de ejercicio: Derecha.



Figura 2. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 1 – Tipo de ejercicio: Izquierda.

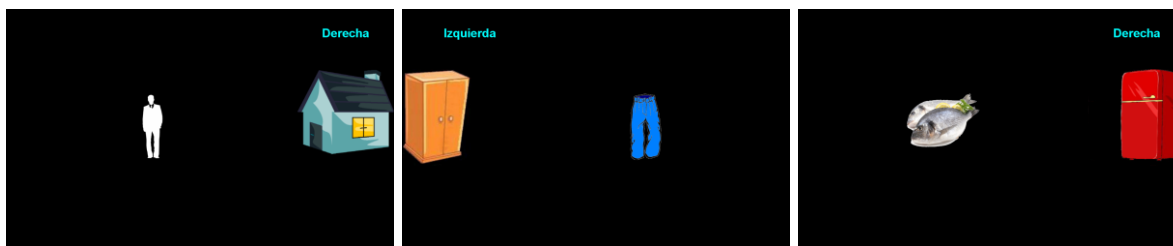


Figura 3. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 2 – Diferentes tipos de cursores y objetivos.

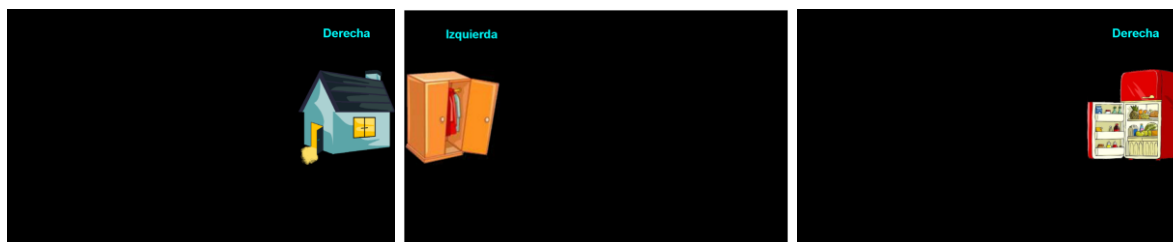


Figura 4. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 2 – Diferentes escenarios cuando el cursor móvil alcanza su objetivo.

- Tarea NFT de tipo 3. En esta tarea se presentan 4 escenarios diferentes. Durante la fase de pre-feedback se muestra la imagen de un armario y de un frigorífico uno a cada lado de la pantalla del ordenador. Durante la fase de realimentación, se muestra un cursor en el centro de la pantalla, que podrá ser la imagen de unos pantalones, una camiseta, un pescado o un trozo de carne. Durante esta fase, el usuario debe imaginar repetidamente movimientos de la mano derecha o izquierda para que el cursor se mueva hacia el objetivo correcto (hacia el armario para los cursores que representen prendas de vestir y hacia el frigorífico para los alimentos). Si las imágenes que representan prendas de vestir alcanzan el armario, entonces la aplicación muestra la puerta del armario abierta durante la fase de post-realimentación. Si los cursores que representan alimentos alcanzan el frigorífico, entonces la aplicación mostrará un frigorífico con la puerta abierta. Las Figuras 5 y 6 muestran capturas de pantalla durante la realización de ejercicios NFT de tipo 3.
- Tarea NFT de tipo 4. En esta tarea el cursor móvil que aparece en el centro de la pantalla representa a un hombre paseando por un camino. El usuario de la aplicación debe desplazar al caminante hacia la izquierda o hacia la derecha del camino para poder esquivar los obstáculos que se van aproximando: animales (cerdos y vacas) y rocas. Los obstáculos se muestran al principio de la fase de feedback. Esta tarea tiene 2 niveles de dificultad. En el nivel “fácil”, la aplicación muestra un mensaje textual en el que se indica el movimiento que debe realizar el usuario para evitar los obstáculos (“Derecha” o “Izquierda”). Además,

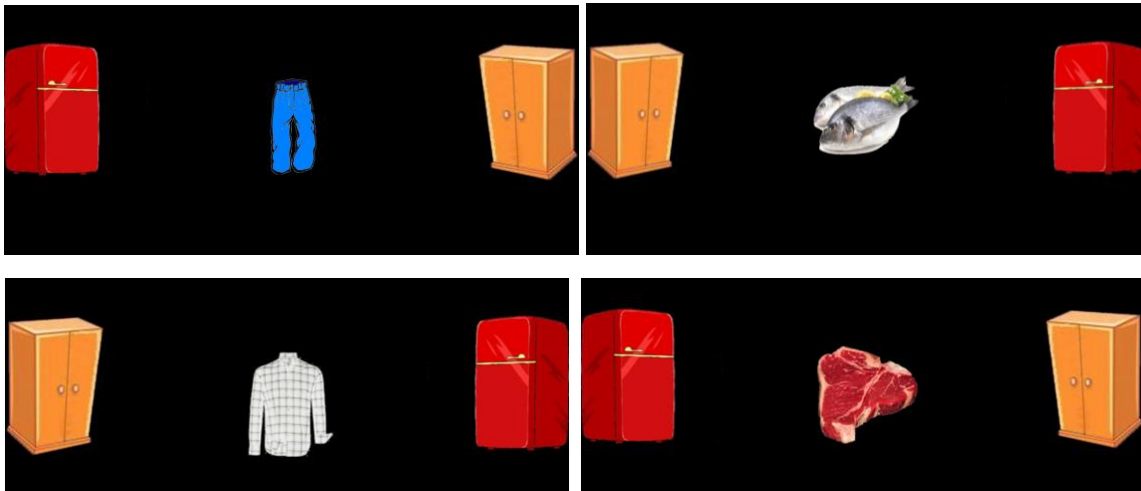


Figura 5. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 3 – Diferentes tipos de cursores y posiciones de los objetivos.

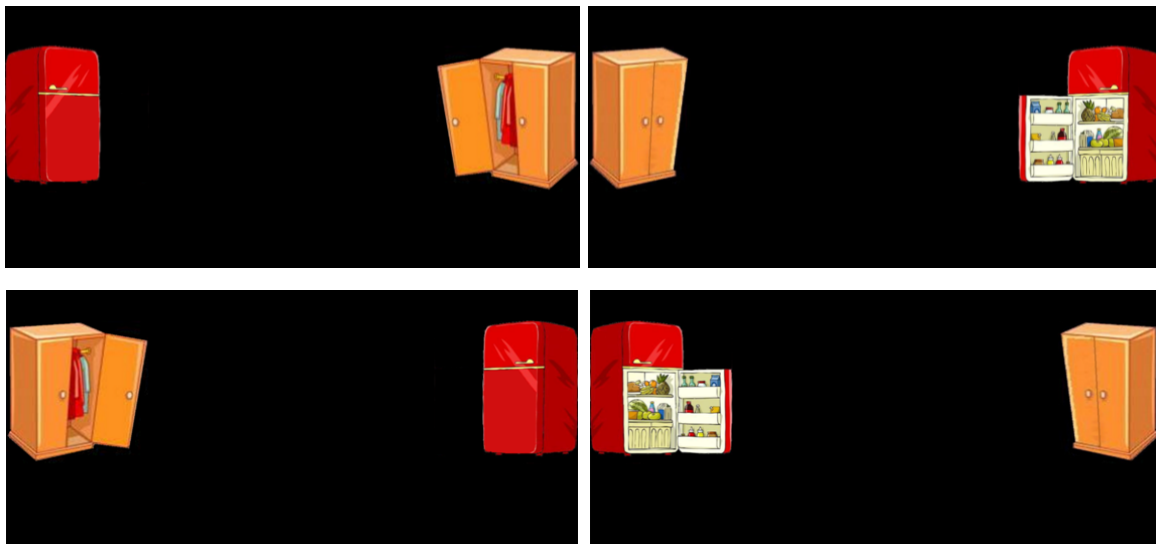


Figura 6. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 3 – Diferentes escenarios cuando el cursor móvil alcanza su objetivo.

en este nivel los obstáculos se mueven lentamente, para que el usuario tenga más tiempo de reacción. En el nivel de dificultad “difícil”, la aplicación no muestra ningún tipo de información sobre el tipo de acción a realizar por el usuario y los obstáculos se desplazan a mayor velocidad. La Figura 7 muestra capturas de pantalla de ejercicios de este tipo de tarea correspondientes al nivel “fácil”. Como refuerzo positivo de la actividad de usuario, si este consigue evitar un obstáculo, la aplicación muestra el mensaje “¡Muy Bien!” durante la fase de post-realimentación, mientras que si el usuario no consigue evitar el obstáculo se muestra un mensaje de “¡Ánimo!”. Finalmente, para calificar la actividad del usuario durante la tarea, la aplicación muestra en color verde el número de obstáculos correctamente evitados por el usuario y en color rojo el número de veces que éstos no han sido superados.



Figura 7. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 4 (Nivel Fácil) – Diferentes tipos de obstáculos.

- Tarea NFT de tipo 5. Esta tarea presenta al usuario 2 posibles objetivos (izquierda o derecha) y tiene 3 niveles de dificultad. En el nivel 1, la aplicación muestra una figura a la izquierda de la pantalla y una figura diferente en el lado derecho durante la fase de pre-realimentación. En este nivel, ambas figuras son del mismo color. Posteriormente, ambas figuras desaparecen y, tras un tiempo de espera, la aplicación muestra 2 nuevas figuras: una coincidirá con alguna de las 2 figuras previamente mostradas, mientras que la otra será diferente. Durante la fase de feedback aparecerá un cursor de color rojo en el centro de la pantalla que el usuario deberá desplazar hacia el objetivo (imagen repetida) correcto mediante la imaginación repetitiva de movimientos de la mano derecha (desplazamiento del cursor hacia la derecha de la pantalla) o de la mano izquierda (desplazamiento del cursor hacia la izquierda de la pantalla).

pantalla). En el segundo nivel las figuras presentadas al usuario pueden tener diferente color. En las Figuras 8 y 9 se muestran capturas de pantalla de ejercicios de este tipo de tarea con niveles de dificultad 1 y 2, respectivamente. En el nivel de dificultad 3, la aplicación muestra una cara que simula diferentes expresiones durante la fase de pre-realimentación. Posteriormente, la aplicación muestra 2 nuevas caras: una coincidirá con la presentada al inicio de la tarea y la otra será diferente. Durante la fase de realimentación, el usuario deberá imaginar repetidamente movimientos de la mano derecha o izquierda para desplazar el cursor central hacia la imagen (cara/expresión facial) correcta. La Figura 10 muestra varias capturas de pantalla durante la realización de ejercicios de este tipo de tarea.

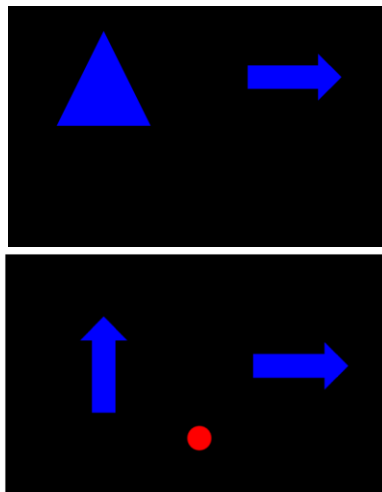


Figura 8. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 5 – Nivel 1 (2 figuras, mismo color).

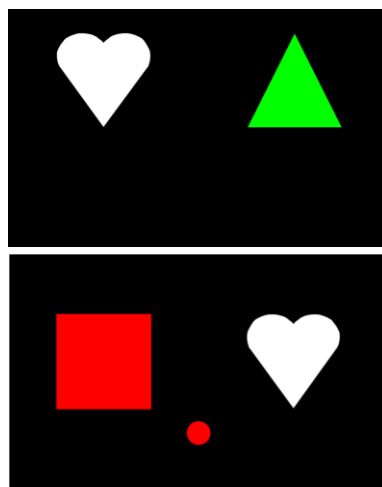


Figura 9. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 5 – Nivel 2 (2 figuras, diferente color).

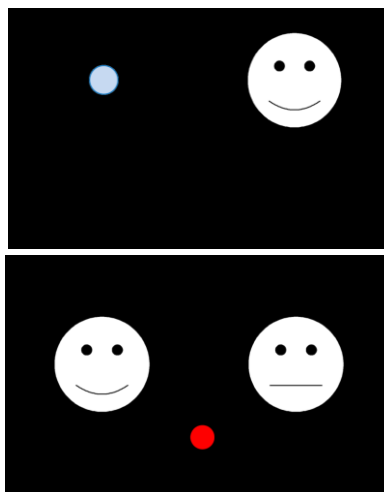


Figura 10. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas NFT de tipo 5 – Nivel 3 (Caras).

- Tareas de entrenamiento cognitivo. Este tipo de tareas hacen referencia al entrenamiento cognitivo mediante tareas de memorización (*cognitive training working memory*, CTWM). La aplicación implementa 5 niveles de dificultad en las que el usuario debe memorizar diferentes figuras. En el nivel 1 la aplicación muestra una figura blanca en el lado izquierdo de la pantalla y otra figura también blanca al lado derecho durante la fase de pre-realimentación. Estas 2 figuras se denominan “estímulo”. Posteriormente, ambas figuras desaparecen y la aplicación muestra una nueva figura denominada “respuesta”: esta figura puede ser igual que alguna de las visualizadas previamente o ser una completamente diferente. La tarea que debe realizar el usuario es la siguiente: presionar la barra espaciadora si la imagen “respuesta” es diferente o presionar cualquier otra tecla si la imagen “respuesta” ha sido mostrada previamente durante el “estímulo”. Si el usuario responde correctamente, la figura desaparece y la tarea continúa con un nuevo ejercicio. En caso contrario, la aplicación muestra la respuesta correcta en color rojo (“Sí” cuando la imagen es repetida y “No” cuando no lo es). La Figura 11 muestra varias capturas de pantalla de esta tarea en el nivel de dificultad 1. En el segundo nivel la aplicación muestra 2 figuras diferentes con diferente color en la fase de “estímulo”. En el nivel de dificultad 3 la aplicación muestra 3 figuras diferentes con diferentes colores. En el cuarto nivel, se muestran 2 figuras diferentes con diferentes colores y una cara mostrando una determinada expresión. Finalmente, en el nivel de dificultad 5, la aplicación muestra 3 caras diferentes con diferentes expresiones y colores. Las Figuras 12 – 15 muestran capturas de pantalla de ejercicios de tipo CT para los niveles de dificultad 2 a 5, respectivamente. Para asegurarnos que el usuario ha comprendido la

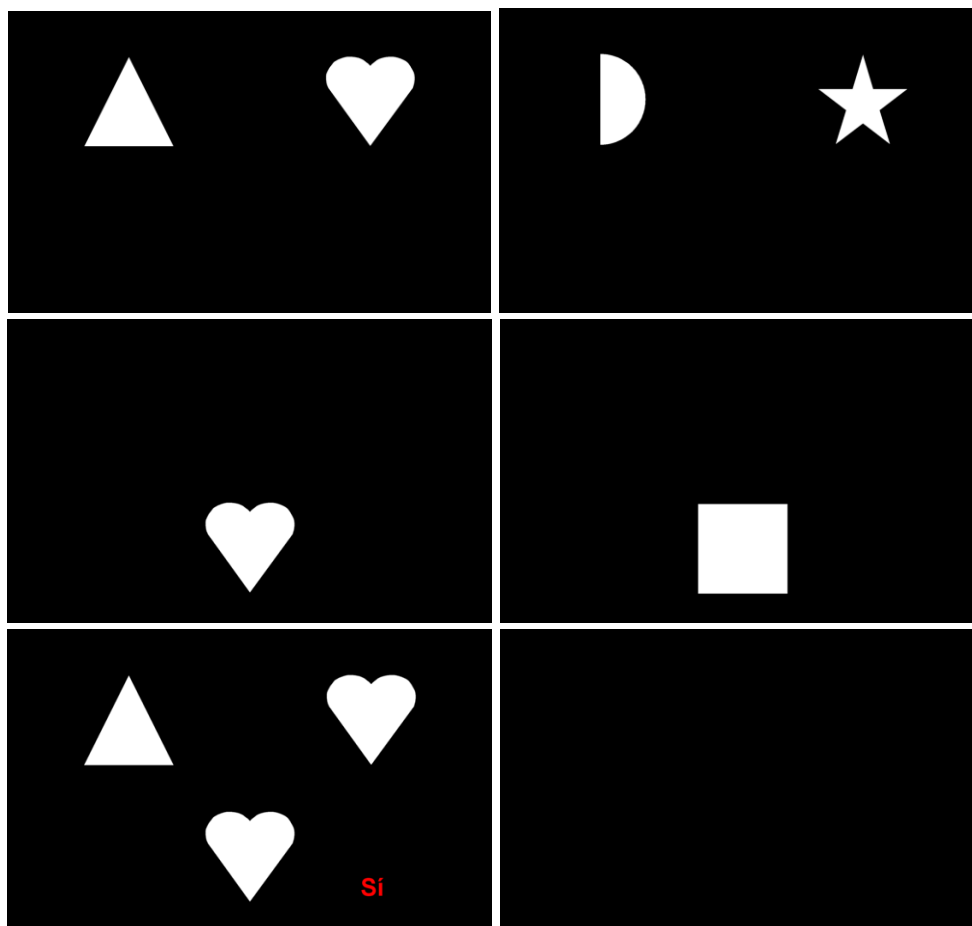


Figura 11. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas CTWM– Nivel 1 (2 figuras, color blanco).

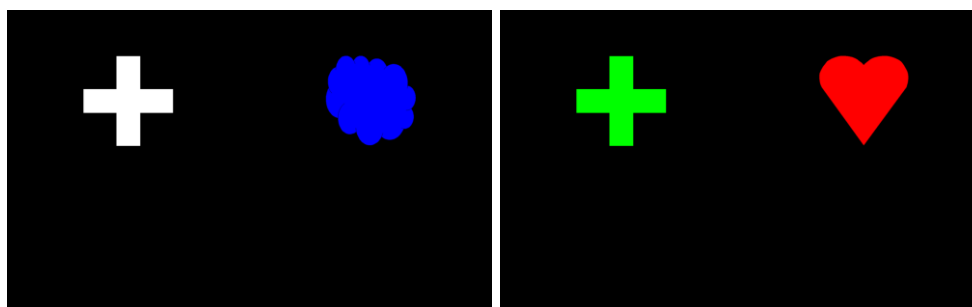


Figura 12. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas CTWM – Nivel 2 (2 figuras, colores diferentes).

tarea que debe realizar, al principio de la misma se proponen ejercicios de aprendizaje en los que se muestra al usuario tanto el “estímulo” como la “respuesta” y durante los cuales no es necesario memorizar la imagen de estímulo.

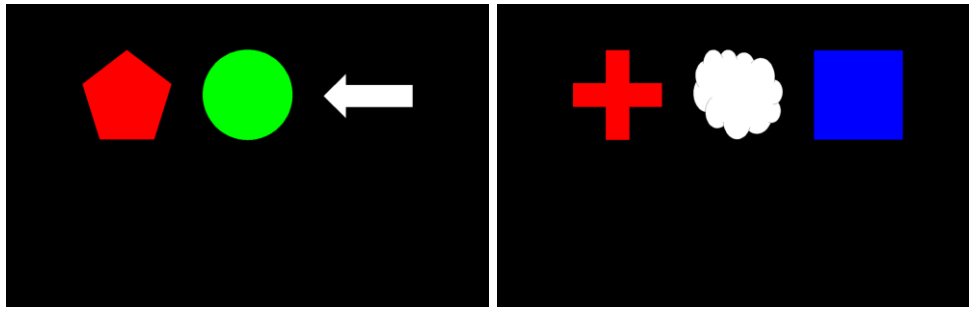


Figura 13. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas CTWM – Nivel 3 (3 figuras, colores diferentes).

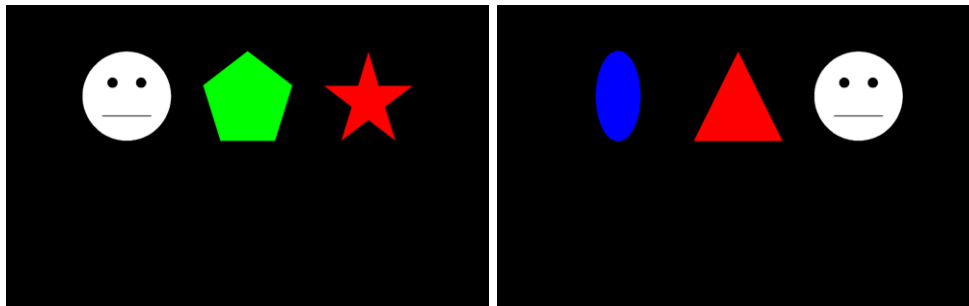


Figura 14. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas CTWM – Nivel 4 (2 figuras y una cara, colores diferentes).

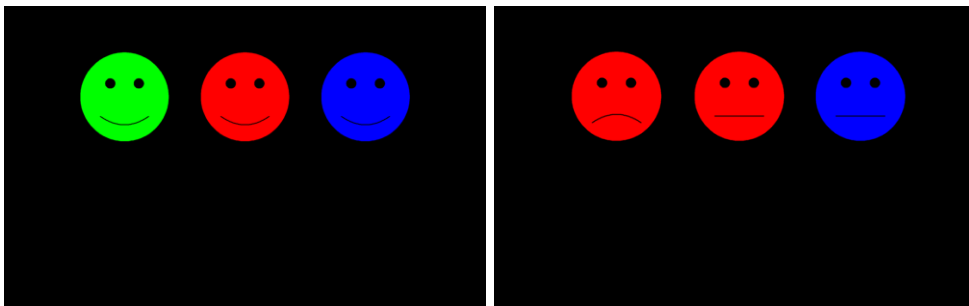


Figura 15. Capturas de pantalla de la aplicación BCI durante la realización de tareas CTWM – Nivel 5 (3 caras, colores diferentes).

2.2. Evaluación de la aplicación NFT basada en BCI

Un total de 63 personas participaron en la evaluación de la herramienta BCI, todas ellas involucradas en el estudio a través del Centro de Referencia Estatal (CRE) de Discapacidad y Dependencia (CRE-DyD) de San Andrés de Rabanedo (León, España). Todos los participantes eran mayores de 60 años, sanos y sin historial previo de trastornos neuropsicológicos. Además, ninguno de ellos tenía experiencia previa en el uso de sistemas BCI. De ellos, 31 (13 hombre, 18 mujeres, edad media = 62.26, rango = 63-81) realizaron ejercicios NFT con la aplicación BCI, formando el denominado grupo experimental,

mientras que los 32 restantes (9 hombres, 23 mujeres, edad media = 68.03, rango = 61-80) no utilizaron la herramienta BCI y formaron el grupo de control. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos ni en la edad ni en el sexo ($p > 0.05$, Mann-Whitney U-test).

El protocolo de pruebas para la evaluación de la utilidad/efectividad de la herramienta BCI de entrenamiento cognitivo se detalla a continuación. En primer lugar, los sujetos de ambos grupos (experimental y control) realizaron el test *Luria Adult Neuropsychological Diagnosis* (Luria-AND), que evalúa 5 capacidades/áreas neuropsicológicas mediante 9 sub-test: visoespacial (percepción visual y orientación espacial), lenguaje oral (lenguaje receptivo y lenguaje expresivo), memoria (memoria inmediata y memoria lógica), inteligencia (dibujos temáticos y actividad conceptual) y atención (control de atención). De esta forma, se obtiene una evaluación inicial (base) de las funciones cognitivas de todos los participantes. En segundo lugar, los participantes del grupo experimental realizaron 10 sesiones de entrenamiento con la aplicación BCI: 5 sesiones NFT alternadas con 5 sesiones CTWM. Cada sesión NFT tenía una duración aproximada de 60 minutos, mientras que las sesiones CTWM duraban unos 20 minutos. Cada participante del grupo experimental realizó una sesión NFT y una sesión CTWM cada semana durante 5 semanas. A continuación, se presenta el programa de entrenamiento cognitivo realizado:

- S1: 150 ejercicios NFT 1 (75 tipo A + 75 tipo B). Orden aleatorio.
45 ejercicios NFT 2 (15 de cada escenario). Orden aleatorio.
- S2: 60 ejercicios CTWM (40 tipo 1 + 20 tipo 2).
- S3: 60 ejercicios NFT 1 (30 tipo A + 30 tipo B). Orden aleatorio.
90 ejercicios NFT 2 (30 de cada escenario). Orden aleatorio.
60 ejercicios NFT 3 (15 de cada escenario). Orden aleatorio.
- S4: 60 ejercicios CTWM (20 tipo 1 + 40 tipo 2).
- S5: 90 ejercicios NFT 2 (30 de cada escenario). Orden aleatorio.
48 ejercicios NFT 3 (12 de cada cursor). Orden aleatorio.
2 ejercicios NFT 4, nivel fácil.
- S6: 60 ejercicios CTWM (20 tipo 2 + 40 tipo 3).
- S7: 45 ejercicios NFT 2 (15 de cada escenario). Orden aleatorio.
32 ejercicios NFT 3 (5 de cada cursor). Orden aleatorio.
2 ejercicios NFT 4, nivel fácil.

1 ejercicio NFT 4, nivel difícil (fácil, si tarea anterior no concluyó con éxito)

30 ejercicios NFT 5 (10 de cada tipo). Orden aleatorio.

S8: 60 ejercicios CTWM (40 tipo 3 + 20 tipo 4).

S9: 45 ejercicios NFT 2 (15 de cada escenario). Orden aleatorio.

3 ejercicios NFT 4, nivel difícil.

75 ejercicios NFT 5 (25 de cada tipo). Orden aleatorio.

S10: 60 ejercicios CTWM (40 tipo 4).

Finalmente, los sujetos de ambos grupos (experimental y control) realizaron de nuevo el test Luria-AND para obtener una evaluación final de sus funciones cognitivas.

Se empleó el test no paramétrico de Mann-Whitney para evaluar las diferencias estadísticas en las puntuaciones obtenidas en los test de evaluación de cada función neurocognitiva entre ambos grupos ($p < 0.05$ se consideró estadísticamente significativo). En segundo lugar, para evaluar las diferencias en las puntuaciones de los test Luria-AND inicial (pre-test) y final (post-test) para cada grupo bajo estudio, se aplicó el test estadístico no paramétrico de Wilcoxon ($p < 0.05$ se consideró estadísticamente significativo). La Tabla 1 recoge los resultados alcanzados, mientras que la Figura 16 muestra un resumen gráfico de los mismos.

El análisis de las puntuaciones pre-test muestra que ambos grupos presentaban la misma distribución de datos para cada función neuropsicológica. No se encontraron diferencias significativas entre los grupos control y experimental antes de que este último comenzara el programa de entrenamiento cognitivo mediante la aplicación BCI. Sin embargo, observando las puntuaciones post-test se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos en diferentes funciones/áreas: percepción visual, lenguaje expresivo, memoria inmediata, dibujos temáticos y actividad conceptual. Además, las puntuaciones obtenidas en los test por los sujetos del grupo experimental tras realizar el entrenamiento basado en BCI fueron significativamente mayores en comparación con las puntuaciones iniciales en todas las funciones cognitivas evaluadas salvo en el control de atención.

Observando con detenimiento los resultados correspondientes al grupo de control, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las puntuaciones pre- y post-test en 4 funciones: percepción visual, orientación espacial, memoria lógica y actividades conceptuales. Estas diferencias podrían ser debidas al sesgo introducido cuando una misma persona realiza un test neuropsicológico más de una vez, ya que durante la segunda realización se puede manifestar cierto aprendizaje asociado a la repetición. Los resultados alcanzados sugieren que se produjo una mejora real (diferencias significativas asociadas a un incremento positivo en las puntuaciones post-test) en los sujetos pertenecientes al grupo experimental en la mayoría de las funciones cognitivas evaluadas.

Finalmente, se observaron diferencias estadísticamente significativas en 5 funciones cognitivas al analizar las variaciones en las puntuaciones pre- y post-test entre el grupo experimental y el grupo control: percepción visual, lenguaje receptivo, lenguaje expresivo, memoria inmediata y dibujos temáticos. Como en estos test se comparan incrementos para ambos grupos, de esta forma se elimina el posible sesgo asociado al aprendizaje. Los resultados demuestran que los incrementos entre las puntuaciones pre- y post-test en el grupo experimental para estas funciones son significativamente mayores que los encontrados en el grupo de control. Por lo tanto, nuestros resultados sugieren que el protocolo de entrenamiento cognitivo propuesto basado en BCI podría

Área Neuropsicológica	Función Cognitiva	E vs. C Pre	E vs. C Post	E Post-Pre	C Post-Pre	E vs. C Post-Pre
Visoespacial	Percepción visual	0.346	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	Orientación espacial	0.830	0.471	<0.05	<0.05	0.129
Lenguaje hablado	Lenguaje receptivo	0.632	0.122	<0.05	0.104	<0.05
	Lenguaje expresivo	0.242	<0.05	<0.05	0.077	<0.05
Memoria	Memoria inmediata	0.187	<0.05	<0.05	0.364	<0.05
	Memoria lógica	0.745	0.254	<0.05	<0.05	0.061
Inteligencia	Dibujos temáticos	0.216	<0.05	<0.05	0.364	<0.05
	Actividad conceptual	0.056	<0.05	<0.05	<0.05	0.0173
Atención	Control de atención	0.363	0.166	0.137	0.138	0.986

Tabla 1. Estadísticas resultado de aplicar los test de Mann-Whitney y Wilcoxon signed-rank a las puntuaciones de los test Luria-AND para cada función neuropsicológica específica. Los valores significativos (p -valor < 0.05) aparecen resaltados en negrita.

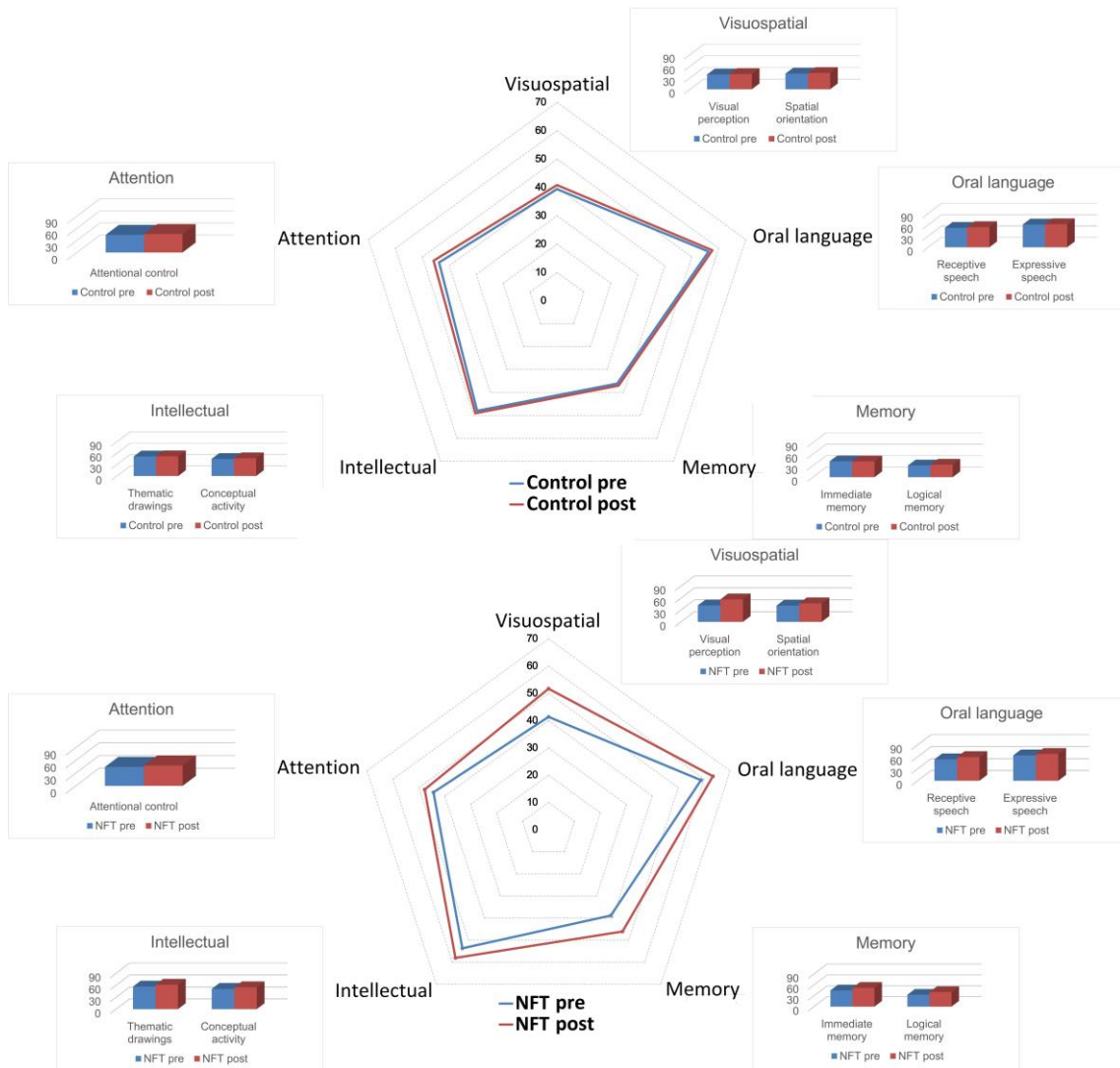


Figura 16. Puntuaciones obtenidas en los test Luria-AND para los grupos control (arriba) y experimental (abajo). Los diagramas de barras muestran todas las características cognitivas de cada área neuropsicológica. El grupo experimental NFT muestra un evidente incremento generalizado en las puntuaciones post-test, es decir, después de realizar el protocolo de entrenamiento cognitivo mediante la aplicación BCI diseñada.

ser una herramienta útil para mejorar las capacidades cognitivas en general y determinadas funciones específicas en particular, como la percepción visual, el lenguaje expresivo, la memoria inmediata y los dibujos temáticos.

3. Desarrollo de una herramienta basada en BCI para la asistencia de personas con discapacidad severa en el hogar

3.1. Herramienta BCI de asistencia a personas con discapacidad severa en el hogar

La segunda aplicación desarrollada durante el proyecto BCI-Ageing es una herramienta controlada mediante BCI basado en potenciales P300 orientada a la asistencia de personas dependientes en el hogar. La herramienta propuesta permite a los usuarios controlar las funciones de 8 dispositivos electrónicos comúnmente presentes en el hogar. De esta forma, es posible satisfacer las principales necesidades de confort, comunicación y entretenimiento. A continuación, se describen sus principales características.

Los potenciales evocados P300 son una deflexión positiva observada en el electroencefalograma (EEG) asociados temporalmente a un estímulo visual o auditivo. Cuando se entremezclan con estímulos frecuentes o rutinarios, los estímulos infrecuentes o particularmente significativos, tanto auditivos como visuales o somatosensoriales, evocan típicamente un pico positivo entorno a los 300 milisegundos en el EEG sobre el córtex parietal. Una aplicación BCI que presente estímulos aleatorios en las filas y columnas de una matriz puede permitir detectar qué celda concreta evoca la respuesta P300. De esta forma, es posible identificar las intenciones del usuario.

La aplicación asistiva basada en BCI se presenta como un instrumento de ayuda para las personas dependientes a la hora de interactuar con los dispositivos domóticos y/o electrónicos presentes de forma común en el hogar, que permiten el desarrollo de las actividades de la vida diaria. Los dispositivos controlados por la aplicación son los siguientes: Televisión, DVD, Equipo de música, Disco Duro multimedia, Luces, Calefacción, Ventilador y Teléfono. De forma resumida, el funcionamiento de la aplicación se describe a través de las siguientes etapas:

- i) La aplicación muestra al usuario imágenes de los dispositivos que puede controlar o de las opciones/comandos de un determinado dispositivo.
- ii) La aplicación determina mediante la detección de potenciales P300 en el EEG del usuario qué dispositivo/comando quiere seleccionar.
- iii) La aplicación envía un comando de infrarrojos (IR) al dispositivo para ejecutar la acción seleccionada por el usuario. El comando IR transmitido es el mismo que se enviaría si se pulsase el botón

correspondiente del mando a distancia propio del dispositivo. Esto requiere grabar previamente en el PC en el que se ejecuta la aplicación todos los comandos de control presentados al usuario de todos los mandos a distancia de los dispositivos controlados por la herramienta BCI. Para ello, se emplea un dispositivo emisor de infrarrojos y el software del fabricante RedRat (RedRat Ltd., Cambridge, UK).

A continuación, se detallan más ampliamente los pasos necesarios para utilizar la aplicación asistiva controlada mediante BCI basado en potenciales P300:

1. En primer lugar, es necesario registrar online 8 canales de EEG (Fz, Cz, P3, Pz, P4, PO7, PO8 y Oz, de acuerdo al sistema internacional modificado 10-20) mediante un amplificador de señales biomédicas g.USBamp, muestreados a una frecuencia de 256 Hz y aplicando un filtro paso-banda entre 0.1 y 60 Hz. Además, es necesario realizar un filtrado espacial *common average referente* (CAR) y aplicar un filtro *notch* a 50 Hz para eliminar la interferencia que introduce la red eléctrica en el registro de EEG. Tras realizar el montaje de electrodos y lanzar la aplicación, ésta muestra su vista “Menú principal”, que consiste en una matriz (3x4) de imágenes que representan los diferentes dispositivos domóticos y electrónicos con los que permite interactuar la aplicación, así como varios comandos de control de la aplicación: Televisión, DVD, Equipo de música, Disco Duro multimedia, Luces, Calefacción, Ventilador, Teléfono, Acceso directo a la Agenda de Teléfonos, Pausar, Reiniciar y Parar. La Figura 17 (a) muestra el menú principal de la aplicación asistiva.
2. A continuación, se inicia el protocolo de detección de potenciales P300 mediante el análisis online del EEG. Para ello, las filas y las columnas de las matrices de imágenes que se muestran al usuario en la pantalla de la aplicación se atenúan aleatoriamente en base al paradigma P300. La Figura 17 (b) muestra el menú principal de la aplicación asistiva durante el protocolo de detección de potenciales P300, en el que es posible que la tercera columna de la matriz de imágenes se muestra atenuada al usuario. El protocolo se detalla a continuación:
 - a. En cada paso de ejecución de la herramienta el usuario puede seleccionar una única opción. Para poder seleccionarla, debe concentrarse en esa opción mirando la imagen correspondiente mostrada en la pantalla de la aplicación. En base al paradigma P300, se pide al usuario que cuente mentalmente cuántas veces se atenúa la imagen correspondiente a la opción seleccionada.
 - b. El proceso de atenuación de las filas y columnas de la matriz de imágenes mostrada en la aplicación se detalla a continuación. Por cada una de las celdas de la matriz de opciones se generan 15

secuencias aleatorias de estimulación (atenuación). En cada secuencia se atenúan aleatoriamente todas las filas y columnas de la matriz de imágenes (7 filas y columnas en el caso de la matriz 3x4 del Menú Principal). Cada estímulo se produce aleatoriamente cada 187.5 ms, dentro del cual, la atenuación de cada fila/columna tiene una duración de 62.5 ms, permaneciendo la pantalla invariable durante los 125 ms restantes.

- c. Para que el usuario seleccione una opción de la pantalla deben transcurrir por tanto $15 \times N^{\circ}$ filas y columnas (7 en el Menú principal) $\times 187.5 \text{ ms} \approx 20$ segundos.
3. Una vez que se completa el protocolo de estimulación, se muestra al usuario un feedback visual y auditivo, se selecciona la opción especificada y se ejecuta el comando correspondiente: acceso a un submenú, ejecución de una opción concreta dentro de un submenú, pausar, reiniciar o parar la aplicación. Además, entre opción y opción, transcurren 6 segundos en los que el usuario puede pensar en la siguiente opción que desea activar. De esta forma, el usuario puede cambiar de dispositivo y navegar por sus opciones con gran libertad. La aplicación permite variar el número de secuencias de estímulo y la duración de los estímulos para poder reducir el tiempo de decisión de cada usuario y que la interacción con los dispositivos sea más rápida. Las Figuras 18 – 26 muestran todas las “vistas” de la aplicación asistiva (Menú principal y submenús).



Figura 17. Captura de pantalla de la aplicación BCI asistiva: (a) Menú principal: muestra una matriz 3x4 de imágenes que representa todos los dispositivos disponibles. (b) Menú principal con la tercera columna atenuada durante el proceso de detección P300.

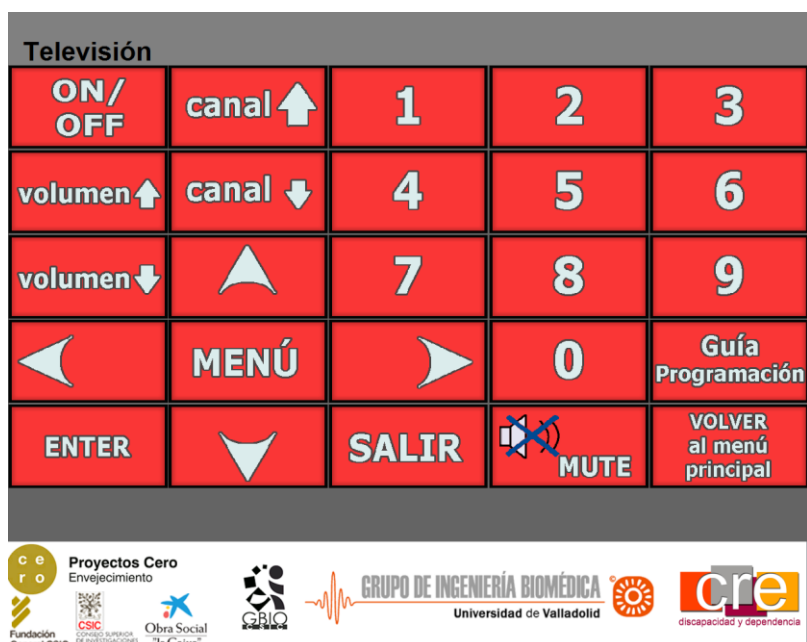


Figura 18. Submenú de control de la televisión. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes comúnmente en un mando a distancia de un aparato de TV, así como volver a la vista “Menú principal”.

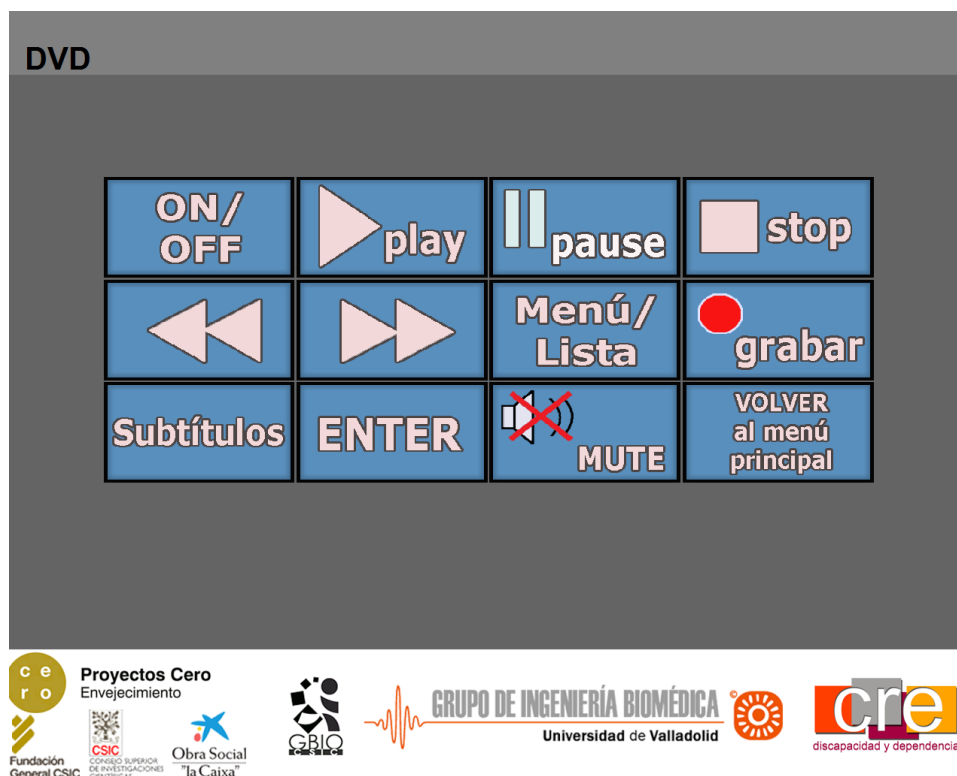


Figura 19. Submenú de control de un reproductor de DVD. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes comúnmente en un mando a distancia de un DVD, así como volver a la vista “Menú principal”.

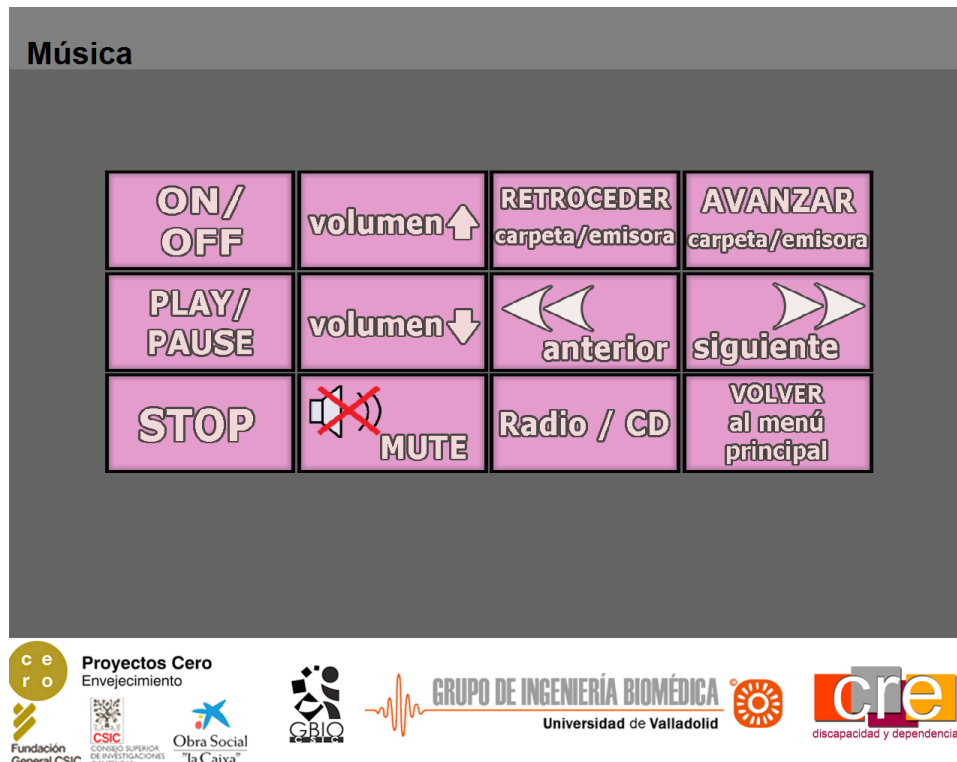


Figura 20. Submenú de control de un equipo de música. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes comúnmente en un mando a distancia de un equipo de música, así como volver al “Menú principal”.

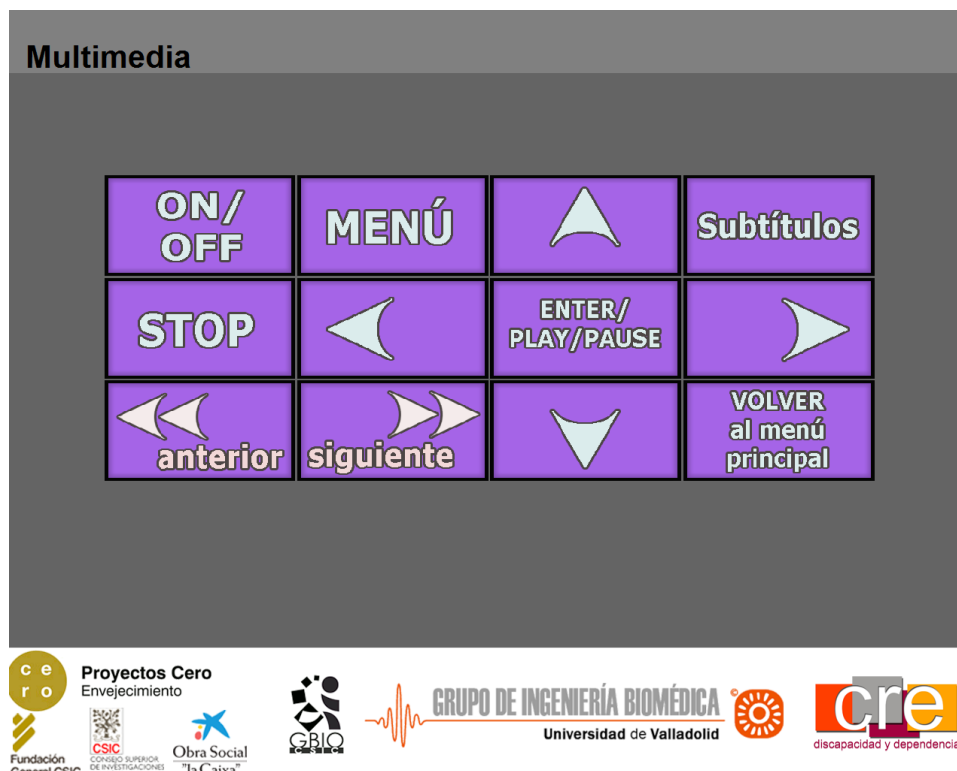


Figura 21. Submenú de control de un disco duro multimedia. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes comúnmente en un mando a distancia de un dispositivo multimedia, así como volver al “Menú principal”.



Figura 22. Submenú de control de las luces en la aplicación. El usuario puede controlar diferentes opciones de intensidad y color de una bombilla LED con control remoto, así como volver al “Menú principal”.

Figura 23. Submenú de control de un calefactor en la aplicación. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes comúnmente en un mando a distancia de un calefactor programable, así como volver al “Menú principal”.

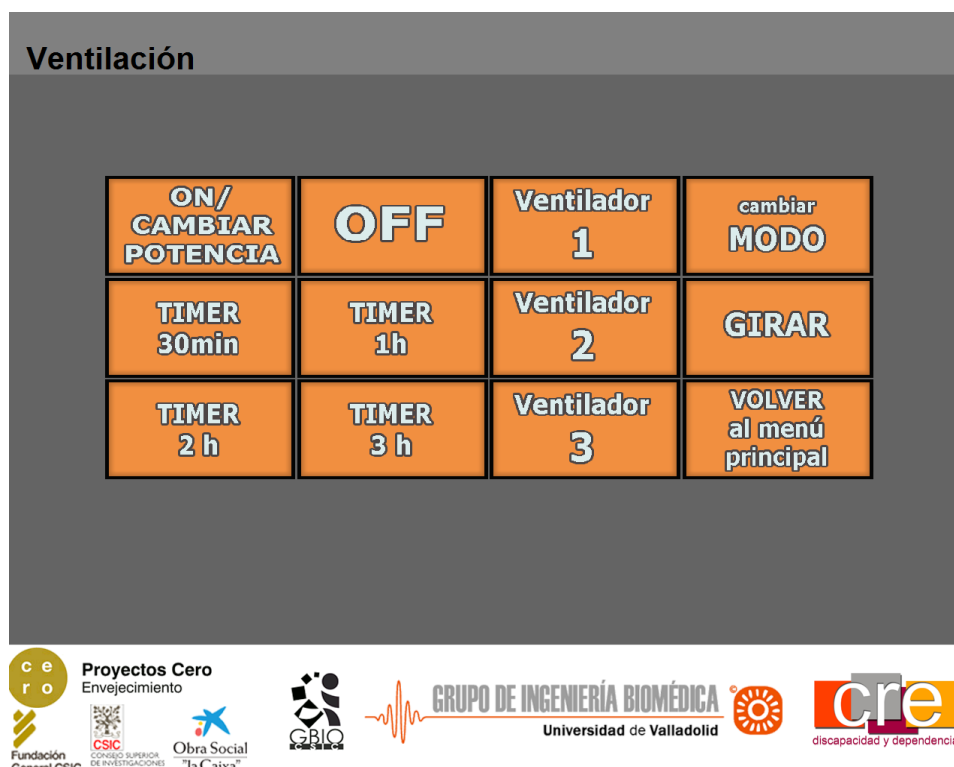


Figura 24. Submenú de control de un ventilador en la aplicación. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes comúnmente en un mando a distancia de un ventilador programable, así como volver al “Menú principal”.



Figura 25. Submenú de control de un teléfono en la aplicación. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes en un teléfono con control remoto diseñado para personas dependientes, así como volver al “Menú principal”.



Figura 26. Submenú de control de la agenda de contactos de un teléfono en la aplicación. El usuario puede controlar diferentes opciones presentes en un teléfono con control remoto diseñado para personas dependientes, así como volver al “Menú principal”.

3.2. Evaluación de la aplicación asistiva basada en BCI

Un total de 30 personas participaron en la evaluación de la aplicación asistiva controlada mediante BCI basado en potenciales P300. Todos los participantes fueron involucrados en el estudio a través del CRE-DyD de San Andrés de Rabanedo (León). Todos los sujetos (19 hombres, 11 mujeres, edad media = 48.70 ± 10.57 años, rango = 26-68) realizaron 3 sesiones con la aplicación BCI (1 de entrenamiento/calibración y 2 de evaluación del rendimiento), así como una evaluación neuropsicológica mediante el test Luria-AND. Todos los ellos eran usuarios potenciales de la aplicación por presentar discapacidad motora y ninguno tenía experiencia previa en la utilización de sistemas BCI.

La Tabla 2 resume los resultados de evaluación del rendimiento de la aplicación BCI en términos de la precisión y tasa de transferencia de información (ITR) alcanzadas por cada usuario durante cada una de las sesiones experimentales. Los resultados muestran que 23 de los 30 usuarios participantes fueron capaces de utilizar apropiadamente la herramienta asistiva propuesta, alcanzando precisiones superiores al 80%. De ellos, 19 sujetos lograron precisiones superiores al 95%. De forma paralela, se estudió la posible relación entre el rendimiento y los resultados neuropsicológicos obtenidos en el

test Luria-AND. No se encontraron diferencias significativas entre la precisión o la ITR y los resultados de los test en ninguna de las funciones cognitivas específicas evaluadas por el test, lo que sugiere su independencia. Por lo tanto, nuestros resultados muestran que las aplicaciones BCI basadas en potenciales P300 podrían ser muy apropiadas para asistir a personas dependientes en su propio hogar.

Sujeto	Calibración Precisión (%)	Evaluación 1 Precisión (%)	Evaluación 2 Precisión (%)	Max ITR (bit/min) con pausas	Max ITR (bit/min) sin pausas
U01	100,00	96,55	95,65	14,10	24,20
U02	100,00	100,00	91,04	17,85	43,42
U03	100,00	97,06	74,51	5,37	7,30
U04	100,00	95,00	96,00	20,06	48,80
U05*	35,71	55,56 / 46,15	-	2,19	2,82
U06*	68,86	46,51 / 64,71	-	2,60	3,35
U07*	78,57	46,67 / 77,78	-	3,22	4,14
U08	91,67	100,00	92,86	13,20	22,65
U09	96,67	100,00	90,48	12,48	21,43
U10	82,35	75,76	84,38	6,84	9,29
U11**	38,89 / 80,00	63,33	-	3,33	4,29
U12	87,50	100,00	84,62	15,37	37,39
U13***	27,78 / 33,33 / 37,50	-	-	-	-
U14	95,83	100,00	78,46	9,39	16,12
U15*	67,86	60,00 / 65,00	-	3,25	4,18
U16	100,00	95,24	71,83	6,14	9,07
U17	100,00	100,00	93,55	9,03	12,56
U18	90,91	89,39	96,72	16,03	29,80
U19	86,36	95,00	68,52	4,31	5,74
U20	100,00	93,55	82,61	6,99	9,72
U21	86,36	96,77	93,55	9,03	12,56
U22	100,00	96,83	94,20	15,08	28,05
U23	95,45	80,65	96,67	12,10	18,60
U24	100,00	100,00	96,72	20,42	49,67
U25	100,00	95,24	100,00	25,91	81,58
U26*	66,67	38,16 / 36,84	-	-	-
U27	100,00	82,54	94,55	11,50	17,68
U28	90,91	88,24	87,69	8,43	12,05
U29	100,00	96,77	97,14	23,91	75,29
U30	77,27	96,77	89,06	8,13	11,31

* Durante la tercera sesión, estos participantes repitieron las tareas de Evaluación 1, debido a que la precisión inicial alcanzada durante la sesión previa de Evaluación 1 fue inferior al 70%.

** Durante la segunda sesión, este participante repitieron las tareas de Calibración, debido a que la precisión inicial alcanzada durante la sesión previa de Calibración fue inferior al 70%. Durante la tercera sesión experimental, este participante realizó las tareas de Evaluación 1.

*** Durante la segunda y tercera sesión, este participante repitió las tareas de Calibración, debido a que la precisión inicial alcanzada durante la sesión previa de Calibración fue inferior al 70%.

Tabla 2. Resultados de rendimiento de los participantes en cada sesión experimental.

4. Análisis conjunto de las aplicaciones BCI desarrolladas

4.1. Población bajo estudio

Un total de 10 personas participaron en el análisis conjunto de las aplicaciones BCI desarrolladas en el proyecto BCI-Ageing. Todos los participantes fueron involucrados en el proyecto a través del CRE-DyD de San Andrés de Rabanedo (León). Por un lado, el grupo experimental estuvo compuesto por 5 personas (2 hombres, 3 mujeres, edad media = 76.2 ± 4.1 años) que realizaron un número elevado de sesiones de entrenamiento cognitivo mediante la aplicación BCI antes de comenzar a utilizar la aplicación asistiva. Por otro lado, el grupo de control estuvo formado por otras 5 personas (2 hombres, 3 mujeres, edad media = 64.2 ± 3.8 años) que no realizaron ningún tipo de entrenamiento cognitivo previo antes de utilizar la herramienta asistiva BCI.

Todos los participantes eran mayores de 60 años, sanos y sin historial previo de trastornos neuropsicológicos. Además, ninguno de ellos había tenido experiencia previa en la utilización de sistemas BCI. El protocolo del estudio fue aprobado por el Comité Ético del CRE-DyD y todos los sujetos fueron informados y entregaron su consentimiento firmado para participar en el mismo.

4.2. Protocolo del experimento

En primer lugar, cada participante del grupo experimental realizó 5 sesiones de entrenamiento cognitivo de aproximadamente 1 hora de duración mediante la herramienta BCI basada en ritmos sensoriomotores. Concretamente, realizaron una sesión por semana durante 5 semanas, siguiendo el mismo procedimiento empleado para evaluar la utilidad de la herramienta NFT controlada mediante BCI. En segundo lugar, los participantes de ambos grupos desarrollaron 3 sesiones con la aplicación asistiva BCI basada en potenciales P300. Durante estas 3 sesiones, los usuarios interactuaron con la aplicación desarrollando diferentes tareas de control de los dispositivos electrónicos que formaban parte del equipamiento del proyecto: TV, reproductor de DVD, equipo de música, disco duro multimedia, luces, calefactor, ventilador y teléfono. El protocolo y los objetivos de cada sesión se detallan a continuación:

- Sesión de calibración. La sesión de calibración se compuso de 10 realizaciones (*runs*) de aproximadamente 4 minutos cada una. En esta sesión inicial solamente se presentaba al usuario el menú de control de la TV (matriz de 5x5 imágenes). En cada ejecución de la aplicación, se pedía al usuario que se concentrara sucesivamente en una determinada celda de la matriz (ítems) dentro de una serie compuesta por entre 5 y 6

ítems. Los datos se grababan en modo *copy-spelling* (entrenamiento dirigido), de forma que la secuencia de ítems es conocida para poder construir un clasificador para cada usuario. El protocolo de detección de potenciales P300 empleaba 15 secuencias de estimulación (atenuación) para la selección de cada ítem individual. No se proporcionaba realimentación (*feedback*) a los usuarios durante esta sesión. Las diferentes ejecuciones de la aplicación estaban separadas por períodos de 60 segundos. La sesión de calibración completa tenía una duración de aproximadamente una hora. Para cada usuario, se entrenó un clasificador lineal con selección de características por pasos (*stepwise linear discriminant analysis*, SWLDA) empleando los datos de las 5 primeras ejecuciones de la aplicación. El clasificador diseñado durante estas primeras 5 secuencias fue el empleado durante las 5 últimas ejecuciones de la sesión.

- Sesión de evaluación 1. La sesión de evaluación 1 comenzaba con la selección de 12 ítems en modo *copy-spelling* empleando el submenú TV de la aplicación para asegurarnos que la precisión alcanzada por el usuario era la apropiada. A continuación, los usuarios ya estaban listos para interactuar con la aplicación asistiva BCI a través de todos sus menús. Esta primera sesión de evaluación comprendía al menos 7 ejecuciones. En cada ejecución, los usuarios debían navegar a través de diferentes menús para completar una serie propuesta (conocida) formada por al menos 6 ítems, por ejemplo: (i) acceder al menú TV, (ii) encender la televisión, (iii) cambiar al canal 8, (iv) subir el volumen, (v) volver al menú principal, (vi) acceder al menú del DVD y (vii) grabar el canal actual. Para cada ítem de cada serie de comandos, el paradigma P300 empleaba 15 secuencias de estímulos (atenuaciones) de las filas y columnas de la matriz de opciones. En la sesión de evaluación se empleó el clasificador entrenado para cada usuario durante la sesión anterior de calibración, a menos que durante la parte inicial en modo *copy-spelling* de esta sesión se observase que la precisión alcanzada no era la apropiada. En este caso, se creaba un nuevo clasificador con los datos obtenidos durante estas primeras ejecuciones.
- Sesión de evaluación 2. Esta segunda sesión de evaluación es muy similar a la anterior. Los usuarios participantes comienzan con la selección de 12 ítems en modo *copy-spelling* con el submenú TV para asegurarnos que la precisión es la apropiada. A continuación, se proponen series de ítems a través de los diferentes menús de la aplicación para realizar determinadas tareas. Durante esta segunda sesión de evaluación, el número de secuencias de estímulos (atenuaciones) del paradigma P300 se reducía para reducir el tiempo de selección y por lo tanto aumentar la velocidad de interacción con la

aplicación. Cuanto menor sea el número de estímulos necesarios por el usuario para que la aplicación detecte correctamente el potencial P300, mayor será la velocidad a la que podrá navegar por la aplicación y controlar los dispositivos electrónicos. El menor número de estímulos asignados fue 2, correspondiente al participante con mayor rendimiento online (C-3). Empleando esta metodología es posible medir la tasa de transferencia de información (ITR) alcanzada por cada usuario.

4.3. Resultados

Los resultados alcanzados por todos los participantes durante la utilización de la aplicación asistiva BCI basada en P300 se resumen en las Tablas 3 y 4. La Tabla 3 muestra los resultados para cada participante del grupo de control (que no realizó entrenamiento cognitivo previo), mientras que la Tabla 4 recoge los resultados de los participantes del grupo experimental (que realizó entrenamiento cognitivo previo con la herramienta BCI basada en ritmos sensoriomotores). La precisión online, medida como el porcentaje de aciertos (ítems seleccionados correctamente) dividido por el número total de ítem que componen la secuencia propuesta, se muestra para cada una de las sesiones de calibración, evaluación 1 y evaluación 2 descritas anteriormente. Además, se muestra el ITR máximo alcanzado por cada usuario durante la sesión de evaluación 2. La ITR es una medida de la velocidad de operación de la aplicación en relación con el tiempo necesario para ejecutar un ítem/comando individual (que depende de cada sujeto). Por lo tanto, los usuarios que presentan mayor ITR fueron capaces de completar las secuencias de comandos de control más rápidos que los sujetos con un menor ITR. Como se introducía una pausa de 5 segundos entre los ítems de cada secuencia de comandos de control con el objetivo de dejar tiempo al usuario para que comprobase si se había ejecutado el comando deseado y pensar cuál debía ser el siguiente comando, se calcularon los valores de ITR con y sin incluir este tiempo de espera.

Un total de 7 usuarios (C-1, C-3, C-4, C-5, E-2, E-3 y E-5) alcanzaron una precisión online del 100% durante la sesión inicial de calibración. Los participantes restantes también alcanzaron precisiones elevadas, superiores al 90%. Observando los resultados de la sesión de evaluación 1, un total de 4 participantes (C-2, C-4, C-5 y E-3) alcanzaron una precisión del 100%. Los sujetos restantes obtuvieron precisiones superiores al 82%. Durante la sesión de evaluación 2, la precisión varió entre el 76% y el 98%. La precisión alcanzada fue menor que la obtenida en la sesión de evaluación 1 porque durante esta segunda sesión se trató de reducir al mínimo el número de

Usuario	Calibración Ac (%)	Evaluación1 Ac (%)	Evaluación2 Ac (%)	ITR máxima (bit/min)	
				SIN pausa	CON pausa
C-1	100.00	93.33	90.74	13.91	25.87
C-2	90.91	100.00	87.18	10.54	17.01
C-3	100.00	97.67	98.00	24.44	76.96
C-4	100.00	100.00	96.00	20.06	48.80
C-5	100.00	100.00	87.23	8.97	13.25
Media	98.18	98.20	91.83	15.58	36.38

Tabla 3. Resultados de precisión online (Ac) para cada sesión y valores de ITR máxima en la sesión de evaluación 2 para cada participante del grupo de control.

Usuario	Calibración Ac (%)	Evaluación1 Ac (%)	Evaluación2 Ac (%)	ITR máxima (bit/min)	
				SIN pausa	CON pausa
E-1	95.45	95.56	76.47	6.92	10.23
E-2	100.00	95.56	91.11	12.67	21.74
E-3	100.00	100.00	82.61	11.50	21.39
E-4	90.91	82.93	85.71	7.52	10.46
E-5	100.00	82.93	82.93	9.54	15.39
Media	97.27	91.39	83.77	9.63	15.84

Tabla 4. Resultados de precisión online (Ac) para cada sesión y valores de ITR máxima en la sesión de evaluación 2 para cada participante del grupo experimental.

secuencias de estimulación para la detección de los potenciales P300, de modo que la interacción con la aplicación fue más rápida a costa de reducir ligeramente la precisión. Finalmente, los valores de ITR variaron entre 6.92 y 24.44 bits/min. Sin tener en cuenta las pausas de 5 segundos intercaladas entre la selección de cada comando, la ITR varió entre 10.23 y 76.96 bits/min.

4.4. Discusión de los resultados

El objetivo de esta parte del proyecto BCI-Ageing fue evaluar conjuntamente las 2 aplicaciones BCI desarrolladas. Concretamente, se valoró la utilidad de realizar entrenamiento cognitivo previo con la herramienta BCI de NFT antes de utilizar la aplicación BCI asistiva observando las precisiones alcanzadas por diferentes grupos de usuarios (experimental y control).

Observando los resultados globales, las precisiones medias y los valores de ITR alcanzados por ambos grupos fueron similares. Las precisiones y valores de ITR individuales para cada sujeto y los valores promedio para cada grupo se muestran en las Figuras 27 y 28, respectivamente. El grupo de control alcanzó precisiones ligeramente superiores al grupo experimental. Concretamente, el descenso en la precisión promedio al pasar de la sesión de calibración a la

innata/automática y por lo tanto no dependen de la capacidad del usuario para controlar su propia actividad cerebral, que es precisamente el objetivo de los BCIs endógenos basados en ritmos sensoriomotores.

Por otro lado, la aplicación BCI asistiva desarrollada en el proyecto BCI-Ageing fue evaluada por personas con discapacidad severa, usuarios del CRE de Discapacidad y Dependencia de León (España). Los resultados obtenidos durante la etapa de evaluación conjunta de las aplicaciones BCI implementadas, que fueron obtenidos por participantes sanos mayores de 60 años, son diferentes a los obtenidos por los usuarios con discapacidad severa. La precisión alcanzada por los usuarios con discapacidad fue generalmente menor. Más concretamente, cuando los usuarios presentaban, además de discapacidad motora, una capacidad baja de control de la atención, la precisión disminuía. Por el contrario, los sujetos participantes en la evaluación conjunta de las aplicaciones BCI no presentaban ningún historial previo de trastorno cognitivo.