

# Impacto clínico en la recuperación motora y calidad de vida de los pacientes producida por el entrenamiento en sistema de neurorrehabilitación

***DOCUMENTO ESTUDIO***

|   |    |
|---|----|
| 1. Introducción.....  | 5  |
| 2. Neurorehabilitación del miembro superior.....  | 6  |
| a. Mesa Interactiva .....   | 6  |
| 1- Impacto del modo de juego en juegos serios multiusuario para la rehabilitación de miembros superiores: un ensayo aleatorizado en persona sobre el compromiso y la participación social ..... | 7  |
| Métodos .....   | 7  |
| Configuración experimental.....   | 7  |
| Tarea .....   | 7  |
| Muestra y reclutamiento.....  | 8  |
| Instrumentos.....   | 8  |
| Resultados.....   | 8  |
| Participación social .....  | 9  |
| Efecto del perfil cognitivo.....  | 10 |
| 2- Estudio de materiales y propiedades de objetos en un sistema tangible interactivo para la rehabilitación de miembros superiores .....  | 10 |
| Métodos .....   | 11 |
| Configuración experimental.....   | 11 |
| Tareas.....   | 12 |
| Muestra, reclutamiento y clínica .....  | 12 |
| Instrumentos del estudio .....  | 12 |
| Procedimiento experimental .....  | 13 |
| Resultados.....   | 13 |
| Viabilidad.....   | 13 |
| - Tiempo.....   | 13 |
| - Facilidad. ....   | 13 |
| - Éxito .....   | 13 |
| - Disfrute. ....  | 13 |
| - Asistencia. ....  | 14 |
| Motivación .....  | 14 |
| Usabilidad .....  | 14 |
| 3. Neurorehabilitación cognitivo-motora.....  | 15 |
| a. Reh@Task .....   | 15 |
| 1- La rehabilitación cognitiva-motora combinada en realidad virtual mejora los resultados motores en el ictus crónico .....   | 16 |
| Participantes.....  | 17 |
| Protocolo.....  | 17 |

|   |    |
|---|----|
| Evaluación cognitiva, motora y funcional .....  | 18 |
| Resultados .....  | 18 |
| ¿Qué tan efectivo es el entrenamiento cognitivo con Reh@Task en comparación con la rehabilitación convencional? .....                                 | 18 |
| ¿Qué tan efectivo es el entrenamiento motor con Reh@Task en comparación con la rehabilitación convencional? .....                                     | 19 |
| 2- Neurorrehabilitación basada en el control de objetos virtuales con los ojos: un estudio con pacientes de ACV en fase crónica .....                 | 19 |
| Participantes .....   | 19 |
| Material y métodos .....  | 20 |
| Resultados .....  | 21 |
| Conclusiones .....  | 22 |
| b. Desarrollo de una herramienta de seguimiento a distancia de la terapia neurorrehabilitadora con control ocular de jugos serios .....               | 22 |
| Adaptación de los videojuegos .....   | 23 |
| Conclusiones .....  | 24 |
| c. Reh@City v2.0 .....  | 24 |
| Descripción de las intervenciones .....   | 25 |
| Intervención con papel y lápiz: el generador de tareas (TG) .....   | 25 |
| Intervención basada en realidad virtual: Reh@City v2.0 .....  | 26 |
| Instrumentos .....  | 30 |
| Resultados .....  | 31 |
| Descripción de la muestra .....   | 31 |
| MoCA: funcionamiento cognitivo general .....  | 31 |
| TMT A & B - Atención .....  | 31 |
| Asociados emparejados verbales de WMS-III - Memoria .....   | 31 |
| Codificación de dígitos y símbolos WAIS-III, búsqueda de símbolos y rango de dígitos: funciones ejecutivas .....                                      | 32 |
| Vocabulario WAIS-III - Lenguaje .....   | 32 |
| PRECiS: Evaluación del estado cognitivo informada por el paciente .....   | 32 |
| d. KAVE .....   | 32 |
| 1- KAVE: un complemento de Unity de código abierto basado en Kinect para entornos virtuales automáticos CAVE con interacción de cuerpo completo ..... | 32 |
| Métodos .....   | 33 |
| Complemento KAVE, agregando Motion Parallax y soporte para todo el cuerpo a Unity usando Kinect .....   | 33 |
| Procedimiento .....   | 34 |
| Participantes .....   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Resultados.....  | 36 |
| 2- Hacia la realidad virtual emocionalmente adaptativa para aplicaciones de salud mental ..... | 36 |
| Mecánica.....  | 37 |
| Escenario de procedimiento virtual.....  | 37 |
| Generación de laberinto procedimental .....  | 37 |
| Estímulos audiovisuales procedimentales y metáforas afectivas .....                            | 38 |
| Medidas.....   | 38 |
| Resultados.....  | 39 |
| Escalas analógicas visuales .....  | 39 |
| Self Assessment Manikin.....   | 40 |

## 1. Introducción

Durante el proyecto, se ha trabajado en el desarrollo de una infraestructura (Reh@Panel) para el uso de realidad virtual que pueda usar múltiples sensores (entre ellos, eye tracking, BCI) así como diferentes métodos de proyección que sean de bajo costo y compartidos en el consorcio. Esta tecnología integra 4 sensores de movimiento, 6 sensores de electrofisiología, 3 eye trackers y distintos dispositivos como pantallas, visores de realidad virtual (Head mounted display, HMD) y una CAVE. En M-ITI y ULL se desarrollaron varios prototipos funcionales/productos con el objetivo de mejorar las terapias de rehabilitación tanto motoras como cognitivas, utilizando la realidad virtual, juegos serios y tecnologías interactivas. Esta tecnología se está aplicando a varios sistemas de rehabilitación motora después de un ictus. Por lo tanto, los resultados del proyecto se extienden más allá de los trabajos inicialmente pensados con *Brain Computer Interfaces* y *Eye Tracking*, dada a potencialidad de las tecnologías creadas. Principalmente, se decidió encarar el problema de neurorrehabilitación de una manera integrativa, usando varias tecnologías complementares y abordando tanto los aspectos motores como cognitivos y emocionales, ya que son tres pilares fundamentales para crear terapias con impacto. La división de la presentación del trabajo en “impacto clínico” (este informe) y el informe en neuroimagen no es lineal ya que muchos de los trabajos contienen tanto un componente clínico como de neuroimagen. Para simplificar, el trabajo con *Brain Computer Interfaces* y los estudios con resonancia funcional se presentan en la parte de neuroimagen y en este informe los estudios que contienen sólo intervenciones clínicas sin imagen médica.

En este informe se presentan varios trabajos relacionados con los siguientes sistemas desarrollados durante el proyecto:

- 1- **Mesa interactiva (VR):** Durante el último año se ha trabajado intensamente en la creación de una mesa interactiva para ofrecer un entrenamiento del miembro superior, y sobre todo de la mano, trabajando en grupo para abordar no sólo la problemática motora, sino también la componente social y emocional a través de actividades en grupo.
- 2- **Reh@Task (VR + fMRI + Eye tracking):** Un sistema de realidad virtual que integra el entrenamiento cognitivo (memoria y atención) juntamente con el motor (miembro superior). En colaboración M-ITI y ULL, este paradigma se ha integrado con la infraestructura de resonancia magnética funcional existente en Tenerife para estudiar la activación cerebral.
- 3- **Herramienta de seguimiento a distancia de la terapia neurorrehabilitadora con control ocular de juegos serios (VR + Eye tracking):** Una herramienta que se basa en la adaptación y utilización de juegos de computador como herramienta de rehabilitación, cuando estos son combinados con la tecnología Eye Tracker.
- 4- **Reh@City v2.0 (VR):** Un sistema de realidad virtual de bajo costo que simula el día a día de un paciente de ictus, que visita lugares relevantes para las actividades de vida diaria, que contiene tanto una componente de rehabilitación motora como cognitiva.
- 5- **KAVE (VR):** Sistema de realidad mixto del tipo “CAVE” desarrollado con tecnología de bajo costo que pretende recrear de manera fiel ambientes reales con una gran fidelidad y permitiendo el movimiento libre y uso de brazos y piernas para interactuar con el contenido virtual.

Varios de los productos que fueron desarrollados, y que están siendo usados en el proyecto, están disponibles aquí: <https://neurorehabilitation.m-iti.org/tools/>. NeuRow está disponible para PC, Android OS y también con soporte

de navegador web a través del uso de Reh@Panel, un middleware entre interfaces y VR. Este sistema está siendo usado en este momento en SESARAM, miembro asociado del consorcio. Reh@Panel, es la herramienta que permite conectar sensores y otros dispositivos a aplicaciones de realidad virtual. Desarrollado en Unity, permite el desarrollo de aplicaciones interactivas para el entretenimiento, educación y rehabilitación con sensores low-cost y en poco tiempo.

## 2. Neurorehabilitación del miembro superior

### a. Mesa Interactiva

Durante el proyecto se ha trabajado intensamente en la creación de una mesa interactiva para ofrecer un entrenamiento del miembro superior, y sobre todo de la mano, trabajando en grupo para abordar no sólo la problemática motora, sino también la componente social y emocional a través de actividades en grupo. Esta mesa interactiva funciona con una capa de infra-rojos multitoque, está equipada con una cámara de video cenital y el software para la detección de objetos y sus formas. Varios estudios se han hecho con diversos prototipos de la mesa.

Un primer proyecto estudió el tipo de interacción (cooperativa, colaborativa, competitiva) entre usuarios y los niveles de esfuerzo, entretenimiento y rendimiento en las tareas de rehabilitación. Se han implementado nuevos juegos de entrenamiento motor, realizando dos estudios, uno con personas sanas (N=39) y otro con pacientes de ictus (N=21) que demuestran que un abordaje multiusuario en modo colaborativo es más eficaz, motiva más y genera más respuestas afectivas positivas. El modo de juego colaborativo provocó una participación social significativamente mayor en términos de empatía, afecto positivo y conducta de participación. Por lo tanto, este modo de juego parece ser la opción más adecuada para ser utilizada en entornos de rehabilitación multijugador, donde se pretende la interacción social.

**Publicación: Pereira, F., Bermúdez i Badia, S., Ornelas, R., & S. Cameirão, M. (2019). Impact of game mode in multi-user serious games for upper limb rehabilitation: a within-person randomized trial on engagement and social involvement. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 16(1).**

<https://doi.org/10.1186/s12984-019-0578-9>

Replicamos el estudio anterior con pacientes de ictus, para verificar la generalización de los resultados obtenidos en personas saludables. El estudio confirmó los resultados e indicó que el modo colaborativo es el más adecuado para promover la interacción social y respuestas afectivas positivas.

**Publicación: Fábio Pereira, Sergi Bermúdez i Badia, Carolina Jorge and Mónica da Silva Cameirão. (2019). Impact of Game Mode on Engagement and Social Involvement in Multi-User Serious Games with Stroke Patients. Presented at the International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR), Tel Aviv: IEEE.**

Un tercer estudio evaluó la viabilidad del uso de tangibles en un contexto de mesa interactiva para la rehabilitación de la mano con 5 juegos diferentes. Datos preliminares de este estudio fueron publicados en la conferencia ICDVRAT en Nottingham, y el trabajo fue elegido como el Best Student Paper Award.

**Publicación: Pereira, F., Ornelas, R., Bermúdez i Badia, S., & Cameirão, M. S. (2018). Exploring Materials and Object Properties in an Interactive Tangible System for Upper Limb Rehabilitation. Presented at the 12th International Conference on Disability Virtual Reality and Associated Technologies, Nottingham.**

## 1- Impacto del modo de juego en juegos serios multiusuario para la rehabilitación de miembros superiores: un ensayo aleatorizado en persona sobre el compromiso y la participación social

### Métodos

#### Configuración experimental

La configuración de la mesa interactiva consistió en una PC (SO: Windows 10, CPU: Intel Coffee Lake Core I7-8700K 3.7Ghz 12 MB, RAM: 2x 8GB DDR4 2400Mhz, Gráficos: Gigabyte Nvidia GTX 1070 Ti Gaming 8G GDDR5), 55 " Pantalla de TV LED y capa sensible multitáctil de infrarrojos de 55 "(latencia: paneo <15ms, touchdown <25ms, tasa de actualización: 100Hz), más una pantalla auxiliar para el investigador Ilustración 1. Los usuarios estaban sentados uno frente al otro, con los brazos apoyados en la mesa y las manos en la pantalla táctil. Para interactuar con el juego, los usuarios utilizaron un cono de plástico (5 cm de diámetro de base, 17,5 cm de altura y 3,8 cm de diámetro superior), más tarde denominado mango, montado sobre una base conductora blanda. Esta base redujo la fricción y facilitó la detección sobre la pantalla táctil. Usamos sillas con altura regulable y una estructura debajo de la mesa para descansar los pies a fin de garantizar una postura adecuada al estar sentado.

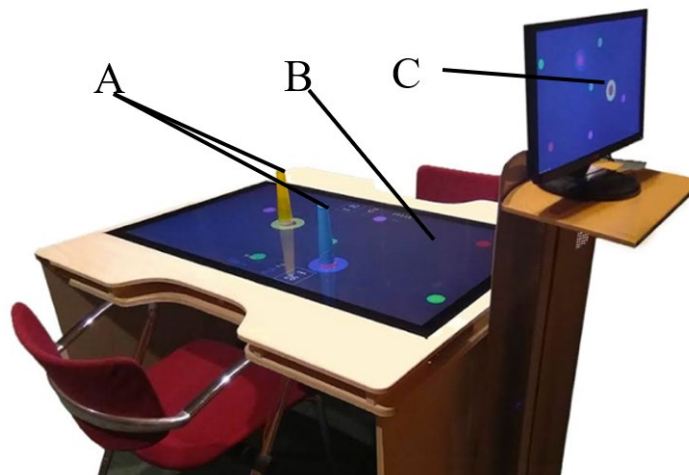
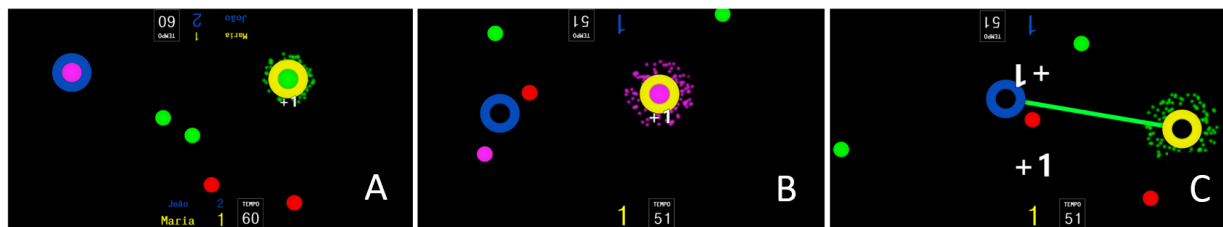


Ilustración 1: Figura 1 - Configuración experimental: asas (A), capa sensible al tacto infrarrojo (B) y pantalla auxiliar para el investigador (C).

#### Tarea

La tarea era un juego de dos jugadores con el objetivo principal de atrapar pelotas que aparecían en posiciones aleatorias para promover una amplia gama de movimientos de alcance. Optamos por que las bolas se muevan en línea recta para que su movimiento sea predecible y, por lo tanto, permita una planificación más sencilla. Cada usuario controlaba un anillo virtual en la pantalla moviendo el mango sobre la superficie. Implementamos tres versiones diferentes de la tarea, cada una correspondiente a un modo de juego diferente: Competitivo, Co-activo y Colaborativo (Ilustración 2). Los diferentes modos de juego se basaron en la misma mecánica básica. En el modo Competitivo (Ilustración 2 - A), cada participante tenía que atrapar el número máximo de bolas, que acumulaba a su puntuación personal. El participante que anotara más puntos (bolas atrapadas) ganaría la ronda. En el modo de juego Co-activo (Ilustración 2 - B), los participantes tenían que jugar en equipo y atrapar balones, pero los puntos se acumularían en una sola puntuación combinada del equipo. Finalmente, en el modo de juego Colaborativo (Ilustración 2 - C), los participantes también jugaron en equipo, pero solo anotaron si ambos jugadores atrapaban consecutivamente dos bolas del mismo color.



*Ilustración 2: Modos de juego Competitivo (A), Co-activo (B) y Colaborativo (C), de arriba a abajo, respectivamente. Los anillos (amarillo y azul) se utilizan para atrapar las bolas (en el interior tienen el color de la última bola atrapada) y representan el color del jugador. Cada modo muestra una puntuación y el tiempo que queda para finalizar la ronda.*

### Muestra y reclutamiento

Se reclutó una muestra de conveniencia de sobrevivientes de ictus en las unidades de salud del servicio regional de salud (SESARAM) en la isla de Madeira, Portugal. Los criterios de inclusión fueron haber sufrido un ictus y mantener déficits motores en las extremidades superiores. Los criterios de exclusión fueron no poder sostener el asa utilizada para la interacción con la mesa y no tener alfabetización.

Se contactó con doscientos diecisiete posibles participantes. Trece se negaron a participar y 181 fueron excluidos por criterios de exclusión. Un participante fue excluido después de la recopilación de datos porque no pudo responder correctamente a los cuestionarios debido a que tenía afasia no informada. 21 participantes (13 hombres) con una edad media de  $61,3 \pm 9,1$  años (rango: 31-80 años) y  $5,19 \pm 3,7$  (rango: 2-17) años de escolaridad concluyeron el estudio y fueron incluidos en el análisis de datos. Cinco participantes informaron tener experiencia previa con videojuegos. Para obtener un perfil de los participantes, utilizamos: 1) Un breve cuestionario de información demográfica; 2) La Evaluación Cognitiva de Montreal (MoCA) para el cribado cognitivo; 3) Evaluación Fugl-Meyer de la extremidad superior (FMA-UE); La escala de Ashworth modificada; y el Mini-IPIP (versión abreviada del conjunto internacional de elementos de personalidad) validado para la población portuguesa. El estudio fue aprobado por la Comisión de Ética de SESARAM (número 24/2018) y todos los participantes dieron su consentimiento informado por escrito.

### Instrumentos

El Cuestionario de experiencia de juego (GEQ) - Módulo principal y el GEQ - Módulo de presencia social fueron elegidos para medir el compromiso y la participación social, respectivamente. El módulo principal mide los pensamientos y sentimientos de los jugadores a través de 7 componentes (competencia, inmersión sensorial e imaginativa, flujo, tensión / molestia, desafío, afecto negativo y afecto positivo) en un total de 33 ítems. El Módulo de Presencia Social tiene tres componentes (Implicación Psicológica - Empatía, Implicación Psicológica - Sentimientos Negativos e Implicación Conductual) y un total de 17 ítems. En ambos cuestionarios, los elementos se clasifican como "0" (nada), "1" (levemente), "2" (moderadamente), "3" (bastante) o "4" (extremadamente). Estos cuestionarios suelen ser completados por el usuario, pero debido a las características de la muestra, la escala de respuestas se proporcionó en una hoja A4, siempre visible para los participantes, y las preguntas se hicieron verbalmente. La escala fue traducida del inglés al portugués por dos expertos en traducción del inglés al portugués.

### Resultados

En todas las condiciones (Competitivo, Co-activo, Colaborativo), Flujo (Mdn = 3.00, 2.60, 3.00), Afecto Positivo (Mdn = 3.00, 3.00, 3.00) y Competencia (Mdn = 2.80, 2.40, 2.60) fueron reportados como altos. El nivel de desafío (Mdn = 1,20, 0,60, 1,20) se consideró bajo. En cuanto a Tensión / Molestia (Mdn = 0.00, 0.00, 0.00) y Afecto Negativo (Mdn = 0.25, 0.00, 0.00), estos se calificaron como muy bajos.

Encontramos diferencias significativas entre las condiciones en Flujo ( $F(2) = 10.941$ ,  $p = 0.004$ ) y Desafío ( $F(2) = 12.571$ ,  $p = 0.002$ ) (Ilustración 3). Las comparaciones por pares revelaron que el flujo fue significativamente



mayor en el modo Competitivo (Mdn = 3.00 (1.10)) en comparación con el modo Coactivo (Mdn = 2.60 (0.90)) ( $Z = -2.777$ ,  $p = 0.016$ ). Con respecto al Desafío, el modo Competitivo (Mdn = 1,20 (0,90)) fue significativamente más desafiante que el modo Coactivo (Mdn = 0,60 (1,20)) ( $Z = 3,395$ ,  $p = 0,002$ ).

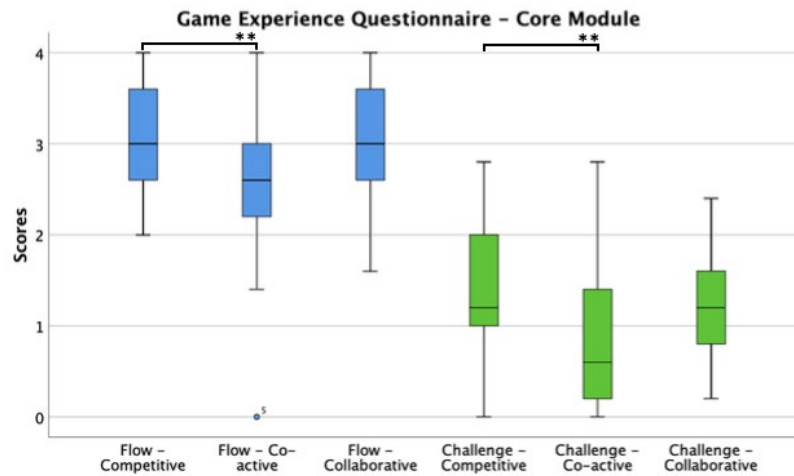


Ilustración 3: Diagramas de caja de los componentes Flujo y Desafío del GEQ - Módulo principal por modo de juego. \*\*  $p < 0,01$ .

#### Participación social

Con respecto a la participación social, encontramos diferencias significativas entre las condiciones en la participación conductual (Fr (2) = 28.500,  $p < 0.001$ ) (Ilustración 4). Las comparaciones por pares revelaron que este efecto surge de que el modo Colaborativo (Mdn = 2.50 (1.80)) es significativamente mayor en comparación con el Competitivo (Mdn = 0.70 (0.85)) ( $Z = -4.861$ ,  $p < 0.001$ ) y Modo coactivo (Mdn = 0,80 (1,00)) ( $Z = -3,703$ ,  $p = 0,001$ ).

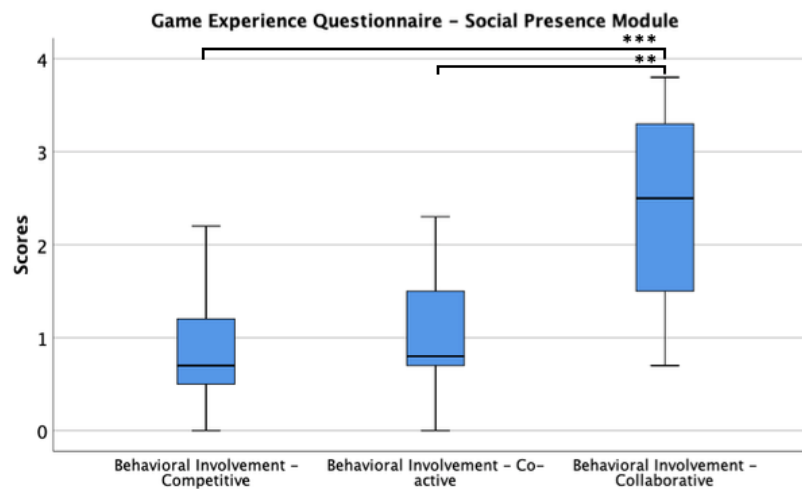


Ilustración 4: Diagramas de caja del componente Implicación conductual del GEQ - Módulo de presencia social por modo de juego, con todas las muestras. \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ .

La empatía (Mdn = 2.20, 2.50, 2.50) fue similar y positiva en las tres condiciones, en contraste con los sentimientos negativos (Mdn = 0.40, 0.60, 0.60) que fueron bajos en todas las condiciones.

### Efecto del perfil cognitivo

Al dividir la muestra en grupos de puntuación más alta y más baja de acuerdo con su puntuación MoCA, encontramos que había diferencias significativas entre las condiciones para ambos grupos en la participación conductual (puntuaciones MoCA más bajas:  $Fr(2) = 15,722$ ,  $p < 0,001$ ; puntuaciones MoCA más altas:  $Fr(2) = 12,950$ ,  $p = 0,002$ ) (Tabla 5). Las comparaciones por pares muestran que los grupos con puntuaciones MoCA más bajas sintieron significativamente más participación conductual con el modo Colaborativo ( $Mdn = 2,75 (1,20)$ ) en comparación con el modo Competitivo ( $Mdn = 1,00 (1,10)$ ) ( $Z = -3,578$ ,  $p = 0,001$ ) y el modo Coactivo ( $Mdn = 1,15 (1,08)$ ) ( $Z = -2,795$ ,  $p = 0,016$ ). Se encontraron resultados similares para el grupo con puntuaciones MoCA más altas, y los participantes se sintieron significativamente más involucrados conductualmente con el modo Colaborativo ( $Mdn = 2,30 (2,00)$ ) en comparación con el modo Competitivo ( $Mdn = 0,70 (0,70)$ ) ( $Z = -3,305$ ,  $p = 0,003$ ) y el modo Coactivo ( $Mdn = 0,70 (1,20)$ ) ( $Z = -2,452$ ,  $p = 0,043$ ).

También encontramos diferencias significativas para aquellos con puntuaciones MoCA más altas en Flujo ( $Fr(2) = 9,722$ ,  $p = 0,008$ ) y Desafío ( $Fr(2) = 8,537$ ,  $p = 0,014$ ). Consideraron haber sentido un flujo significativamente menor en el modo Co-activo ( $Mdn = 2,60 (0,80)$ ), en comparación con el modo Competitivo ( $Mdn = 3,00 (0,80)$ ) ( $Z = 2,665$ ,  $p = 0,023$ ). Además, sintieron significativamente menos Desafío en el modo Co-activo ( $Mdn = 0,60 (1,00)$ ) en comparación con el modo Competitivo ( $Mdn = 1,20 (1,40)$ ) ( $Z = 2,665$ ,  $p = 0,023$ ). Con respecto a los participantes con los puntajes más bajos, encontramos diferencias significativas entre las condiciones en Desafío ( $Fr(2) = 6,506$ ,  $p = 0,048$ ); sin embargo, las comparaciones por pares no fueron significativas.

Al hacer una comparación entre grupos, los resultados revelaron que aquellos oponentes con puntajes más bajos de MoCA mostraron un sentido de competencia significativamente mayor en el modo Co-activo ( $Mdn = 3,10 (1,25)$ ) que aquellos con puntajes más altos ( $Mdn = 2,40 (0,60)$ ), ( $U = 25,000$ ,  $p = 0,033$ ) (Tabla 5). El modo colaborativo fue significativamente más desafiante para los MoCA más bajos ( $Mdn = 1,50 (0,85)$ ) que para los MoCA más altos ( $Mdn = 0,80 (0,80)$ ), ( $U = 25,000$ ,  $p = 0,034$ ). Finalmente, el modo Competitivo promovió significativamente más Afecto Negativo en los participantes con una puntuación más baja ( $Mdn = 0,38 (0,56)$ ) en comparación con aquellos con una puntuación más alta ( $Mdn = 0,00 (0,30)$ ), ( $U = 25,000$ ,  $p = 0,025$ ).

Un análisis entre grupos no arrojó diferencias significativas al comparar los grupos en cada modo de juego individual. Para entender la relación entre espasticidad y calificaciones en los componentes del GEQ para cada modo de juego, calculamos correlaciones y encontramos una correlación negativa con Competencia ( $r(19) = -0,537$ ,  $p = 0,012$ ) y Flujo ( $r(19) = -0,495$ ,  $p = 0,023$ ) en el modo Coactivo. En el modo Colaborativo, encontramos una correlación negativa con el Flujo ( $r(19) = -0,483$ ,  $p = 0,026$ ).

### *2- Estudio de materiales y propiedades de objetos en un sistema tangible interactivo para la rehabilitación de miembros superiores*

Aquí presentamos un estudio exploratorio para evaluar la viabilidad, motivación y usabilidad de un novedoso sistema que utiliza objetos tangibles de diferentes formas y materiales para interactuar con tareas virtuales diseñadas para la rehabilitación de miembros superiores después de un accidente cerebrovascular. Se desarrollaron y probaron 5 tareas diferentes con 5 tipos de interacción tangible (3 modalidades de agarre y 2 de fuerza). Los datos sobre 5 sobrevivientes de accidentes cerebrovasculares muestran que el paradigma interactivo propuesto es factible y atractivo, y que su usabilidad está modulada por las habilidades funcionales del usuario. Por lo tanto, la dinámica de las tareas y las características deben mejorarse para aumentar la usabilidad para los pacientes con más dificultades funcionales y cognitivas.

## Métodos

### Configuración experimental

La configuración consta de una PC (SO: Windows 8.1, CPU: i7-4790 a 3.60GHz, RAM: 8Gb, Gráficos: GeForce GTX 1060 6GB), una cámara PlayStation Eye (Sony Computer Entertainment Inc., Tokio, Japón), una Televisor de 32" colocado horizontalmente y un conjunto de objetos tangibles (Ilustración 5). Se utilizó una silla con altura regulable y un banco de reposapiés para garantizar una postura correcta durante la sesión.

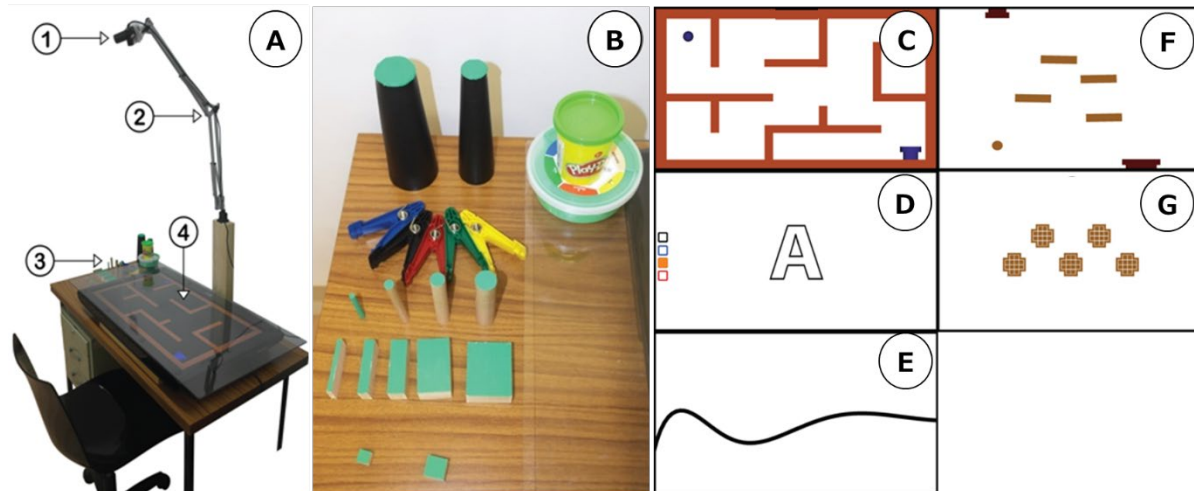


Ilustración 5: (A) Configuración experimental (1 cámara; 2 brazos de soporte 3 juegos de objetos tangibles; 4 pantallas de TV), (B) objetos tangibles utilizados para interactuar con las tareas y capturas de pantalla de (C) laberinto, (D) Pinte, (E) Sigue la línea, (F) Deslice y (G) Rellene la figura.

Para el seguimiento de objetos, creamos un software personalizado utilizando la biblioteca OpenCV Source Computer Vision, capaz de detectar una cantidad arbitraria de objetos de una lista de colores previamente definida, proporcionando su color (valores de tono, saturación y valor), posición central relativa a la cámara, área, perímetro y, lo que es más importante, una lista de coordenadas que definen el perímetro de cada objeto. Toda esta información se transmite al juego, implementado en Unity3D, a través de una conexión de socket UDP. El software de seguimiento requiere un proceso de calibración para tener en cuenta las condiciones de luz, ya que las propiedades del color pueden cambiar desde el punto de vista de la cámara. El software toma los valores de la calibración y luego los aplica a las operaciones de umbralización de cada cuadro para extraer objetos grandes binarios (blobs), que se refiere a un grupo de píxeles conectados en una imagen binaria. El término "grande" indica que sólo los objetos de cierto tamaño son de interés, ya que los objetos binarios "pequeños" suelen ser ruido. La cámara no siempre estaría perpendicular a la pantalla, por lo que creamos un procedimiento de calibración de perspectiva que corrige la perspectiva de la imagen y la recorta seleccionando las cuatro esquinas de la pantalla.

Para la interacción se utilizaron objetos con diferentes características. Estos se eligieron en función de los materiales utilizados para la rehabilitación de miembros superiores en la terapia ocupacional estándar. Se utilizaron objetos de diferentes tamaños y resistencias según el nivel de habilidad de cada participante. Los objetos se eligieron para permitir los tres tipos de agarre más utilizados (agarre de fuerza o global, agarre lateral y agarre de trípode) y entrenamiento de fuerza de manos / dedos. La selección del objeto a utilizar en cada entrenamiento de competencia (agarres y fuerza) para cada tarea fue realizada por un terapeuta en base a la evaluación inicial y la capacidad del usuario para manipular el objeto. Se aseguró que la manipulación de objetos fuera cómoda pero también desafiante, ya que se pretende simular una tarea de rehabilitación. Optamos por utilizar un solo objeto por competencia y tarea debido a la gran cantidad de objetos posibles y para evitar exponer al usuario a actuaciones muy fáciles o difíciles, evitando así el aburrimiento o la frustración, respectivamente.

### Tareas

Se desarrollaron 5 tareas (Laberinto, Pintar, Seguir la línea, Deslizar, Rellenar la figura) para explotar diferentes propiedades de los objetos y entrenar competencias específicas de la extremidad superior (Ilustración 5). Todas las tareas se desarrollaron como aplicaciones independientes utilizando Unity y recibiendo información del software de seguimiento a través de una conexión UDP. Las tareas son las siguientes:

- **Laberinto:** el participante debe empujar una pelota a través de un laberinto e introducirla en un tubo de salida en el otro extremo del laberinto;
- **Pintar** - el participante elige un color (azul, amarillo o rojo) y el objetivo es pintar la letra "C" de forma libre. El participante puede borrar y reescribir la carta hasta que esté satisfecho con el resultado;
- **Seguir la línea:** el participante debe seguir una línea con un objeto, tratando de ser lo más preciso posible. Al realizar la tarea, se dibuja un trazo con el objeto. Para evitar la oclusión de la retroalimentación con la mano, cuando se usa la mano izquierda, la línea debe seguirse de derecha a izquierda y viceversa para evitar que el objeto ocluya la retroalimentación de la línea que se está trazando;
- **Deslizamiento:** el participante debe crear un camino con objetos para una pelota que cae y rebota sobre ellos para guiarla hacia el tubo de salida en la parte inferior del escenario;
- **Rellenar la figura:** el participante debe rellenar una forma determinada utilizando objetos.

### Muestra, reclutamiento y clínica

Los participantes del estudio fueron una muestra de conveniencia reclutada de dos hospitales públicos en Funchal, Portugal. Los criterios de inclusión fueron haber sufrido un ictus y tener deterioro de las extremidades superiores. Los criterios de exclusión incluyeron: funcionalidad nula o completa de la extremidad superior medida con la prueba del brazo de investigación en acción (ARAT); déficit cognitivo severo que compromete la comprensión de la tarea, con una puntuación inferior a 17 en el Token Test; negligencia hemiespacial, evaluada a través de una prueba de cancelación; y no alfabetización. El estudio siguió las pautas establecidas con respecto a la investigación con participantes humanos, y todos los participantes dieron su consentimiento informado.

Quince supervivientes de accidente cerebrovascular se consideraron participantes potenciales para este estudio y cinco cumplieron los criterios de inclusión. Nuestra muestra está compuesta por cuatro hombres y una mujer, con una edad media de  $67,4 \pm 13,7$  años (rango: 51-80), y  $27,8 \pm 31,3$  semanas post ictus. Todos tenían 4 años de escolaridad, sabían leer y escribir, y ninguno tenía experiencia previa con computadoras. Los participantes se sometieron a evaluaciones motoras y cognitivas a través de escalas clínicas estándar para identificar su nivel de habilidad. La evaluación motora se realizó a través de la Evaluación Fugl-Meyer (FMA) - Extremidad superior y la ARAT para el funcionamiento motor; la prueba de caja y bloques (BBT) para la destreza manual gruesa; un dinamómetro para medir la fuerza de agarre de potencia; y la escala de Ashworth modificada (MAS) para la espasticidad. La caracterización cognitiva se realizó a través del Montréal Cognitive Assessment (MoCA). El perfil motor y cognitivo de los participantes fue diverso. Los participantes tenían déficits leves o nulos a nivel de hombros y codos, pero déficits más amplios a nivel de manos. P1 y P3 presentaron déficits leves, P2 y P5 déficits moderados y P4 tuvieron déficits severos. Todos los participantes presentaron algún nivel de espasticidad, pero P1 y P5 fueron los que presentaron mayor tono y resistencia al movimiento. Además, P5 mostró dificultades para extender los dedos activamente (abrir la mano) debido a la espasticidad, necesitando ayuda en la mayoría de las tareas y P4 presentó dificultades significativas con la destreza manual.

### Instrumentos del estudio

Las medidas que se utilizaron tuvieron como objetivo cuantificar la viabilidad del sistema prototipo como herramienta de rehabilitación, su usabilidad y la motivación experimentada.

- Las medidas de viabilidad incluyeron el porcentaje de éxito en cada tarea, el tiempo para completar la tarea, la necesidad de ayuda para completar una tarea y la facilidad de la tarea medida a través de una escala Likert de 7 puntos que van de 1 (Muy difícil) a 7. (Muy fácil), justo después de cada tarea.

- La motivación se midió a través de una versión portuguesa del Intrinsic Motivation Inventory (IMI). Esta es una versión más corta de 18 ítems de la cual usamos los dominios de Interés / Disfrute, Competencia Percibida y Esfuerzo / Importancia. Además, el nivel de participación en cada tarea individual se midió a través de una escala Likert de 7 puntos que van desde 1 (No me gustó mucho) a 7 (Me gustó mucho), justo después de cada tarea.
- La usabilidad se midió a través de la versión portuguesa de la Escala de usabilidad del sistema (SUS). Adicionalmente, registramos las dificultades experimentadas por los usuarios durante la interacción.

#### Procedimiento experimental

La recogida de datos se realizó en 2 sesiones diferentes, la primera para la evaluación motora y cognitiva (~ 60 minutos), y la segunda para las tareas y cuestionarios de autoinforme (60-90 minutos). En la primera sesión, los participantes firmaron el consentimiento informado, seguido de las evaluaciones motoras y cognitivas realizadas en orden aleatorio. En la segunda sesión, los participantes comenzaron recibiendo una breve introducción sobre cómo funcionaba el sistema. Se informó a los participantes de la importancia de no ocluir los objetos de la cámara durante la interacción. Posteriormente, los participantes realizaron cada tarea en un orden aleatorio. Para cada tarea, se realizaron múltiples iteraciones para probar su viabilidad utilizando diferentes objetos para entrenar el agarre de potencia, agarre lateral, agarre del trípode y fuerza. Antes de cada tarea, el terapeuta lo demostró para asegurarse de que el participante lo entendiera. Después de cada tarea, los participantes informaron sobre el disfrute y la facilidad de la tarea utilizando las escalas Likert de 7 puntos. La plastilina y la masilla solo se utilizaron con las tareas Deslizar y Rellenar la figura. Al final de la sesión se administró el SUS y el IMI.

#### Resultados

##### Viabilidad

Evaluamos la viabilidad a través del tiempo total de la tarea, la facilidad, el éxito como el porcentaje de participantes que completaron la tarea, el disfrute y la asistencia requerida.

- *Tiempo.* En cuanto al tiempo necesario para completar las tareas, Pintar y Seguir la línea no se vieron muy afectados por el tipo de agarre. En cambio, Laberinto tomó más tiempo con el agarre del trípode, Llena la figura con el agarre lateral y Desliza con el agarre eléctrico. Sin embargo, en general, todas las actividades de agarre tuvieron tiempos promedios similares, que oscilaron entre 66 y 82 segundos. Para el entrenamiento de fuerza, la masilla / plastilina terapéutica y los pellizcos tuvieron efectos opuestos en Rellenar la figura y Deslizar, siendo masilla / plastilina más rápida de usar en la primera tarea y pellizcar en la última. Las actividades de fuerza revelaron tomar más tiempo que las actividades de agarre, principalmente pellizcar pinzas, que tomaron un promedio de 167.5 segundos.

- *Facilidad.* En términos de facilidad, en general, las tareas que utilizan el agarre se consideraron de dificultad similar (5 puntos) y más difíciles cuando se utiliza la fuerza (2,5-4,0 puntos). Sin embargo, el agarre lateral fue el más fácil en todas las tareas con la excepción de Seguir la línea. Curiosamente, los datos de Deslizar y Rellenar la figura muestran un rango de dificultad variable, 2-6 y 3-6 respectivamente, dependiendo de la habilidad entrenada, lo que permite una amplia gradación de dificultad.

- *Éxito.* La tasa de éxito no estuvo fuertemente modulada por el tipo de habilidad entrenada (84-100), pero sí por la actividad. Pintar y Seguir la línea logró una tasa de éxito del 100% con todos los agarres, mientras que Laberinto logró la tasa más baja, siendo el peor caso para el agarre de fuerza (60%). Las tasas de éxito de la fuerza fueron del 60% para Desliza y del 80% para Rellenar la figura, independientemente del uso de pinzas o masilla / plastilina. El resto de las actividades oscilaron entre el 80-100%.

- *Disfrute.* Al analizar el disfrute de cada actividad interactiva y par de habilidades entrenadas, los puntajes son mayoritariamente positivos, siendo el uso de paralelepípedos con agarre lateral (5.5) y conos y cilindros con agarre

de fuerza (5.0) los preferidos. Para el entrenamiento de fuerza, siempre se prefirió masilla / plastilina al uso de pinzas (4,5 frente a 2,75). Al observar cada tarea individualmente, la combinación más atractiva para Pintar, Laberinto y Rellenar la figura fue usar el agarre lateral, para Seguir la línea y Deslizar el agarre eléctrico. En general, todas las actividades interactivas se informaron como atractivas (5.5 / 7 o superior) para al menos una de las combinaciones probadas.

- *Asistencia.* La asistencia durante la ejecución de la tarea se proporcionó cuando fue necesario con tres propósitos diferentes: facilitación del movimiento, dificultades para manipular un objeto (debido a las características del objeto) y problemas de interacción. La asistencia más frecuente fue la facilitación del movimiento, con todos los pacientes excepto P1. Se brindó asistencia principalmente en la extensión del hombro, el codo y la extensión / posicionamiento de los dedos, así como señales verbales / táctiles para facilitar el movimiento y evitar compensaciones corporales y posturas no deseadas. P1 y P5 necesitaban ayuda para usar objetos cilíndricos en la tarea Laberinto.

#### Motivación

Para medir la motivación utilizamos la versión portuguesa del IMI y la escala Likert. Utilizamos solo tres subdominios de IMI, calificados en un rango de 1 a 5 (Interés / Disfrute, Competencia Percibida y Esfuerzo / Importancia) que indican disfrute del sistema ( $3,5 \pm 1,2$ ), con un sentido de competencia ligeramente más bajo pero positivo ( $3,3 \pm 1,0$ ) y mayores niveles de esfuerzo ( $3,8 \pm 0,4$ ). En general, la puntuación total del cuestionario fue de  $3,5 \pm 0,8$  en 5.

#### Usabilidad

Para medir la usabilidad, usamos el SUS y nuestras observaciones. El SUS informado osciló entre 25 (inferior a deficiente) y 72,5 (bueno), con una media de  $46,1 \pm 18,2$ , correspondiente a la mala usabilidad. Los datos del SUS no parecen relacionarse con la escolaridad, MoCA, ARAT o MAS, pero P1 y P5, quienes reportaron los puntajes de usabilidad más altos (55.0 y 72.5 respectivamente) también tuvieron los puntajes más altos de FMA y reportaron la competencia percibida más alta en IMI (4.0 y 4.8 respectivamente) y fueron los participantes más jóvenes.

Nuestras observaciones durante el desempeño con las tareas interactivas se pueden agrupar en tres dominios:

- *Interacción.* Algunos objetos tienen tendencia a caer, volcarse o inclinarse, como cilindros de pequeño tamaño, paralelepípedos y cubos más pequeños, volviéndose más difíciles de detectar por el sistema. Además, existe una tendencia a utilizar movimientos asociados a las posibilidades de los objetos en algunas tareas, como en Pintar o Laberinto, donde los participantes intentaron arrastrar en lugar de tirar. Algunas tareas requerían un alcance mínimo para realizarlas, por lo tanto, agregar la capacidad de cambiar la posición y los límites del área interactiva mejoraría la accesibilidad.
- *Software.* La implementación técnica actual del sistema se basa en una cámara con una vista despejada de la superficie interactiva. Se debe instruir a los participantes para que eviten la oclusión de los objetos interactivos, lo que repercute negativamente en el seguimiento y las actividades interactivas. Algunas tareas necesitan comentarios y orientación adicionales sobre el próximo paso de la tarea, el conocimiento del rendimiento y los resultados al usar objetos. Esta tarea también fue extremadamente exigente cognitiva para P1 y P2, los pacientes con MoCA más bajo (11 y 13, respectivamente).
- *Comprensión.* La complejidad del sistema y de algunas tareas, en particular para los participantes con un MoCA más bajo, requirió múltiples explicaciones hasta lograr un nivel aceptable de desempeño.



### 3. Neurorehabilitación cognitivo-motora

#### a. Reh@Task

Reh@Task es un sistema de realidad virtual que integra el entrenamiento cognitivo (memoria y atención) juntamente con el motor (miembro superior). Este trabajo combina también la tecnología de *Eye tracking* para el estudio del comportamiento y respuestas oculomotoras a estímulos visuales. Este sistema fue presentado en la siguiente publicación.

**Cameirão, M. S., Pereira, F., & i Badia, S. B. (2017, June). Virtual reality with customized positive stimuli in a cognitive-motor rehabilitation task. In Virtual Rehabilitation (ICVR), 2017 International Conference on (pp. 1-7). IEEE.**

Durante el proyecto también se realizó un estudio controlado de un mes con 24 pacientes de ictus, que usaron el sistema de rehabilitación cognitivo-motor basado en realidad virtual. El estudio concluye que este abordaje es factible y tan eficaz como rehabilitación convencional.

**Faria, A. L., Cameirão, M. S., Couras, J. F., Aguiar, J. R. O., Costa, D., Martins, G., & Bermúdez i Badia, S. (2018). Combined cognitive-motor rehabilitation in virtual reality improves motor outcomes in chronic stroke – a pilot study. Frontiers in Psychology, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00854>**

También se han realizado trabajos en la universidad de la Laguna usando esta herramienta conectada a dos interfaces, eye-tracking y joystick. La versión con joystick está siendo evaluada en un estudio con resonancia magnética funcional, y un trabajo con 14 sujetos fue publicado en la conferencia internacional ICDVRAT en Nottingham, y ganó el Best Short Paper Award.

**Modroño, C., Bermúdez i Badia, S., Cameirão, M. S., Pereira, F., Paulino, T., Marcano-Serrano, F., ... González-Mora, J. L. (2018). Is it necessary to show virtual limbs in action observation neurorehabilitation systems? Presented at the 12th International Conference on Disability Virtual Reality and Associated Technologies, Nottingham.**

Además, se ha publicado posteriormente en la revista *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*.

**Modroño, C., Bermúdez, S., Cameirão, M., Pereira, F., Paulino, T., Marcano, F., ... González-Mora, J. L. (2019). Is it necessary to show virtual limbs in action observation neurorehabilitation systems? Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering, 6, 205566831985914. <https://doi.org/10.1177/2055668319859140>**

Finalmente, se realizó un trabajo de fin de grado en fisioterapia en La Universidad de la Laguna usando una versión con eye-tracking fue usada en 4 casos clínicos de ictus con secuelas motoras en Tenerife, en un protocolo de un mes de entrenamiento, con altos niveles de aceptación y usabilidad.

**Neurorrehabilitación basada en el control de objetos virtuales con los ojos: un estudio de viabilidad con pacientes de ACV en fase crónica. Gabriel Martín Moreno y José Manuel Cañadas Sarabia. Curso 2017-2018- Convocatoria de Junio**

## 1- La rehabilitación cognitiva-motora combinada en realidad virtual mejora los resultados motores en el ictus crónico

El Reh@Task fue diseñado como una adaptación en VR de la tarea Toulouse Piéron (TP) (TP-VR), ampliada para incorporar números, letras y símbolos. Reh@Task es una variación de las pruebas de cancelación utilizadas por las metodologías de rehabilitación convencionales con el objetivo de entrenar la atención. Reh@Task también agrega una variante de memoria mostrando los objetivos durante una cantidad de segundos al principio y luego ocultándolos en el paso de selección de objetivos. La Ilustración 6a muestra una imagen de Reh@Task para entrenamiento de atención, donde los objetivos siempre están visibles. La Ilustración 6b ilustra la variante de memoria, donde los objetivos se muestran durante varios segundos y luego desaparecen para la tarea de selección. La Ilustración 6c muestra los diferentes elementos de destino utilizados en Reh@Task ordenados por complejidad creciente.

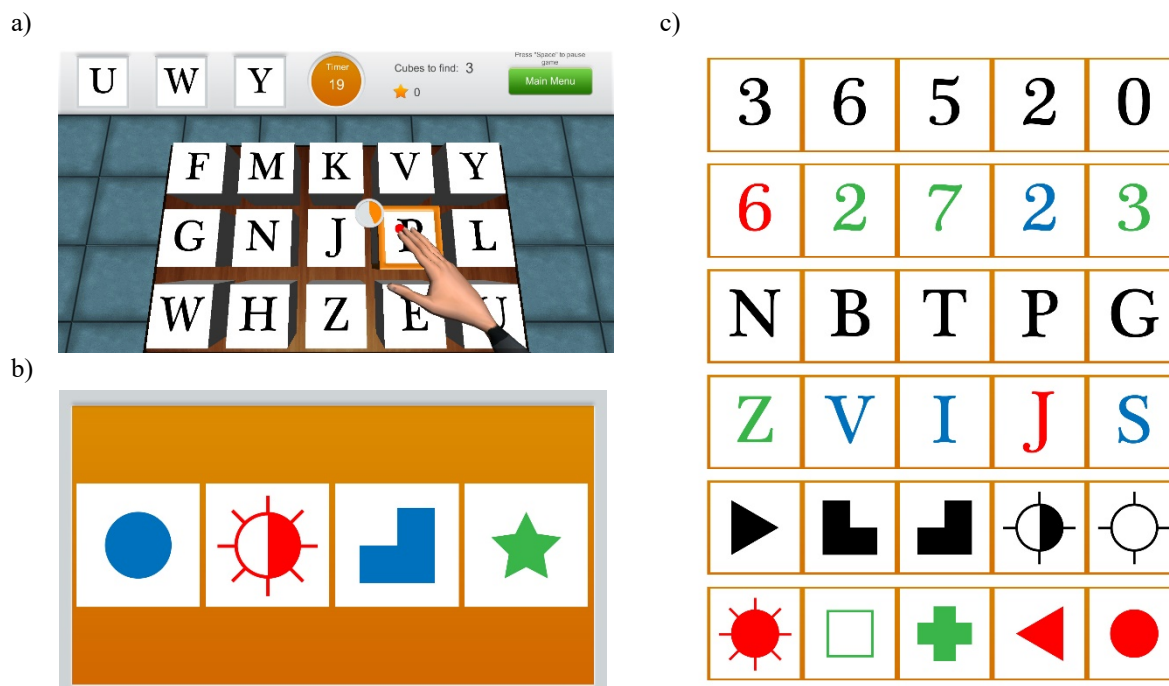


Ilustración 6: Subconjuntos de estímulo Reh@Task. a) Entrenamiento de atención: tarea de cancelación con letras en blanco y negro. b) Entrenamiento de la memoria: Los estímulos objetivo (símbolos) se presentan en el centro de la pantalla y luego desaparecen; el participante debe seleccionarlos de memoria. c) Estímulos diana ordenados por complejidad creciente.

Reh@Task está diseñado para realizarse mediante movimientos repetitivos de alcance del brazo sobre una superficie de mesa, y se implementa mediante el uso de la representación del brazo parético para navegar y apuntar símbolos dispuestos en un entorno tridimensional. La selección del objetivo se realiza mediante un temporizador. La interacción con la computadora se realiza a través de movimientos de brazos en 2D con un software de seguimiento de patrones (AnTS) de realidad aumentada (AR) basado en cámara (Ilustración 15). El entorno de RV tiene una función de calibración incorporada que es capaz de calcular el rango activo de movimiento del paciente, normalizando el esfuerzo motor requerido para el conjunto de habilidades del paciente.





*Ilustración 7: Interacción con Reh @ Task a través del software de seguimiento AnTS*

### *Participantes*

Los participantes fueron reclutados tanto en el Centro Médico da Murtosa como en el Centro Médico de Aveiro (Aveiro, Portugal), según los siguientes criterios de inclusión: al menos seis meses después del primer accidente cerebrovascular isquémico; someterse a rehabilitación de terapia ocupacional; sin problemas de visión; sin antecedentes de déficits premórbidos; sin negligencia; capacidad para leer y escribir; sin sintomatología depresiva grave según la evaluación de la escala de depresión geriátrica; no afásicos y con suficiente capacidad cognitiva para comprender las instrucciones de la tarea evaluada por los médicos. Se excluyeron los pacientes que puntuaron menos de 28 en las pruebas de flexión de codo y abducción de hombro del índice de motricidad. La muestra estuvo formada por veinticuatro pacientes con ictus distribuidos aleatoriamente en dos grupos. El grupo experimental estuvo compuesto por trece (8 hombres, 5 mujeres) pacientes mayores ( $M = 58,9$  años,  $DE = 69,3$ ) con accidente cerebrovascular (4 hemisferio derecho, 9 hemisferio izquierdo), con un promedio de  $23,2 \pm 20,5$  meses después del accidente cerebrovascular, una media de  $6,1 \pm 2,7$  años de escolaridad y 5 de 13 con conocimientos informáticos. El grupo de control estaba compuesto por once (7 hombres, 4 mujeres) ancianos ( $M = 69,3$  años,  $DE = 10,2$ ) pacientes con accidente cerebrovascular (5 hemisferio derecho, 4 hemisferio izquierdo), con un promedio de  $40,4 \pm 43,7$  meses después del accidente cerebrovascular, una media de  $3,7 \pm 0,5$  años de escolaridad y 2 de 11 tenían conocimientos informáticos. La junta directiva de la clínica aprobó el estudio y todos los participantes dieron su consentimiento informado previo.

### *Protocolo*

Después del reclutamiento, los doce participantes fueron evaluados por un terapeuta ocupacional para obtener medidas de referencia para los dominios motor y cognitivo. Después de la evaluación, los participantes fueron asignados aleatoriamente a uno de los grupos por un investigador que no participó en la recopilación de datos, utilizando Research Randomizer, un servicio gratuito basado en la web que ofrece muestreo aleatorio instantáneo y asignación aleatoria. El evaluador no estaba cegado al tipo de intervención. Además de la terapia ocupacional convencional, el grupo experimental pasó por doce sesiones de 45 minutos con el Reh@Task, tres veces por semana, durante un mes. La intervención del grupo de control fue emparejada en el tiempo, incluida la terapia ocupacional convencional, las actividades de orientación espacial y temporal y el entrenamiento en escritura. En el grupo experimental, antes de comenzar la intervención de doce sesiones, los participantes pasaron por un promedio de tres sesiones de entrenamiento con estímulos abstractos TP. La progresión de los niveles en las tareas de atención y memoria es independiente y un participante puede, por ejemplo, alcanzar el nivel 30 en atención y permanecer en el nivel 25 en memoria. Al final de la intervención y durante el seguimiento, todos los participantes

fueron evaluados con las mismas medidas de evaluación. La tasa de adhesión a la terapia fue del 100% para todos los pacientes.

### *Evaluación cognitiva, motora y funcional*

Se utilizaron varias escalas cognitivas y motoras que se aplican ampliamente en la clínica y en la investigación para determinar la gravedad del deterioro y medir la recuperación cognitiva y motora. El perfil cognitivo se realizó a través de la Evaluación Cognitiva de Montreal (MoCA), que proporciona subpuntuaciones para los siguientes dominios: funciones ejecutivas, denominación, atención, lenguaje, razonamiento, memoria y orientación. Las capacidades relacionadas con las tareas de atención se evaluaron con la cancelación de una sola letra, la cancelación de dígitos y la prueba de Bells. Los déficits de las extremidades superiores se midieron a través del Fugl-Meyer y el Inventario de actividad de brazos y manos de Chedoke. La espasticidad se evaluó mediante la escala de Ashworth modificada. Finalmente, para evaluar la independencia en las actividades de la vida diaria (AVD), usamos el Índice de Barthel.

### *Resultados*

#### *¿Qué tan efectivo es el entrenamiento cognitivo con Reh@Task en comparación con la rehabilitación convencional?*

Observamos que tanto el grupo experimental como el de control tuvieron mejoras, desde el inicio hasta la postintervención y el seguimiento, en la puntuación de la evaluación del cribado cognitivo y en la realización de dos de las tres pruebas de cancelación.

Los cambios a lo largo del tiempo en los puntajes del MoCA, evaluados con la prueba de Friedman, son significativos tanto en el grupo experimental ( $\chi^2(2) = 9.957$ ,  $p = .007$ ) como en el de control ( $\chi^2(2) = 8.000$ ,  $p = .018$ ). Una comparación mostró mejoras promedio más altas en el grupo que usó Reh@Task, aunque no estadísticamente diferente del control. La prueba de Wilcoxon reveló diferencias significativas entre el inicio y el posintervención (Experimental:  $W(13) = 64.000$ ,  $Z = -1.970$ ,  $p = .049$ ; Control:  $W(11) = 52.000$ ,  $Z = -2.504$ ,  $p = .012$ ), basal y seguimiento (Experimental:  $W(13) = 64.000$ ,  $Z = -2.769$ ,  $p = .006$ ; Control:  $W(11) = 53.000$ ,  $Z = -2.609$ ,  $p = .009$ ).

A través del análisis de los subdominios de MoCA, encontramos mejoras significativas en el tiempo para la memoria solo en el grupo experimental ( $\chi^2(2) = 9.522$ ,  $p = .009$ ), siendo que estos cambios son significativos desde el inicio hasta posintervención ( $W(13) = 74.500$ ,  $Z = -2.825$ ,  $p = .005$ ) y seguimiento ( $W(13) = 80.500$ ,  $Z = -2.475$ ,  $p = .013$ ). El grupo de control también mejoró en este dominio, pero solo desde el inicio hasta la postintervención ( $W(11) = 26.000$ ,  $Z = -2.047$ ,  $p = .041$ ). Solo el grupo experimental mejoró con el tiempo en el dominio de funciones ejecutivas ( $\chi^2(2) = 9.235$ ,  $p = .010$ ), que fueron significativos solo desde el inicio hasta el seguimiento ( $W(13) = 36.000$ ,  $Z = -2.598$ ,  $p = .009$ ). Tanto el grupo experimental ( $\chi^2(2) = 6.437$ ,  $p = .040$ ) como control ( $\chi^2(2) = 7.000$ ,  $p = .030$ ) mejoraron con el tiempo en el dominio del lenguaje. Tanto el grupo experimental como el de control obtuvieron mejoras significativas a lo largo del tiempo en el dominio de la atención, evaluado con una reducción de omisiones en la prueba de Bells (Experimental:  $\chi^2(2) = 6.826$ ,  $p = .033$ ; Control:  $\chi^2(2) = 10.550$ ,  $p = .005$ ) y la prueba de Cancelación de Dígitos (Control:  $\chi^2(2) = 9.407$ ,  $p = .009$ ). Con respecto a las omisiones de la prueba de Bell del grupo experimental y, según la prueba de Wilcoxon, estas diferencias solo son significativas desde el inicio hasta el seguimiento ( $W(13) = 2.500$ ,  $Z = -2.582$ ,  $p = .010$ ). El grupo de control mejoró significativamente desde el inicio hasta la postintervención y durante el seguimiento en ambas Cancelaciones de dígitos ( $W(11) = .000$ ,  $Z = -2.271$ ,  $p = .023$ ;  $W(11) = .000$ ,  $Z = -2.428$ ,  $p = .015$ ) y prueba de Bells ( $W(11) = .000$ ,  $Z = -2.820$ ,  $p = .005$ ;  $W(11) = 4.000$ ,  $Z = -2.203$ ,  $p = .028$ ).

### ¿Qué tan efectivo es el entrenamiento motor con Reh@Task en comparación con la rehabilitación convencional?

Ambos grupos mejoraron cuantitativamente desde el inicio hasta el posintervención y seguimiento en todos los instrumentos de evaluación motora y funcional.

Considerando la evaluación funcional CAHAI de la recuperación del brazo y la mano después del ictus, observamos mejoras significativas a lo largo del tiempo tanto en el experimental (experimental2 (2) = 9.500,  $p = .009$ ) como en el control ( $\chi^2$  (2) = 11.273,  $p = .004$ ) grupos. La comparación por pares de Wilcoxon revela que estas diferencias son significativas para ambos grupos desde el inicio hasta la postintervención (Experimental:  $W$  (13) = 15.000,  $Z = -2.041$ ,  $p = .041$ ; Control:  $W$  (11) = 21.000,  $Z = -2.226$ ,  $p = .026$ ) y de seguimiento (Experimental:  $W$  (13) = 15.000,  $Z = -2.060$ ,  $p = .049$ ; Control:  $W$  (11) = 21.000,  $Z = -2.207$ ,  $p = .027$ ). Solo el grupo de control tuvo cambios significativos a lo largo del tiempo en las deficiencias de las extremidades superiores, según lo evaluado con el Fugl-Meyer ( $\chi^2$  (2) = 8.375,  $p = .015$ ), el Índice de motricidad ( $\chi^2$  (2) = 8.000,  $p = .018$ ) y la Escala de Ashworth Modificada ( $\chi^2$  (2) = 7.600,  $p = .022$ ). Las comparaciones por pares solo fueron significativas desde el inicio hasta el seguimiento (FM:  $W$  (6) = 15.000,  $Z = -2.060$ ,  $p = .039$ ; MI:  $W$  (6) = 15.000,  $Z = -2.032$ ,  $p = .042$ ; AS:  $W$  (6) = 21.000,  $Z = -2.207$ ,  $p = .027$ ). En el caso de la independencia en las AVD, no hubo cambios significativos en la puntuación de Barthel para ninguno de los grupos.

## 2- Neurorrehabilitación basada en el control de objetos virtuales con los ojos: un estudio con pacientes de ACV en fase crónica

Estudios previos hechos con participantes sanos indican que el control de objetos virtuales con el movimiento de los ojos puede favorecer la activación de las áreas sensitivomotoras afectas tras un accidente cerebrovascular y ayudar a recuperar la funcionalidad perdida. En este trabajo presentamos una intervención con el fin de estudiar la viabilidad de esta nueva aproximación a la neurorrehabilitación en pacientes con ictus crónico. El objetivo es comprobar la viabilidad de este tipo de terapia a través del estudio de cambios funcionales o cognitivos tras un periodo de entrenamiento, así como estimar la usabilidad y satisfacción de los participantes acerca de este método.

### Participantes

Contactamos con una asociación de discapacitados en el municipio de Los Realejos (Tenerife) y en una primera visita explicamos nuestro proyecto. Cuatro de sus socios se mostraron motivados y cumplían los criterios de inclusión:

- Más de 6 meses tras el ACV
- Hemiparesia de miembro superior por ACV
- Edad entre 30 y 75 años
- Motivación para participar en el estudio
- Saber leer y escribir.

Como criterios de exclusión se tuvo en cuenta:

- Afasia severa, déficits sensoriales o cognitivos que puedan intervenir con la ejecución de la tarea o la comunicación con el paciente
- Negligencia hemiespacial (Test de Bell)
- Sintomatología depresiva grave (Escala de Yesavage).

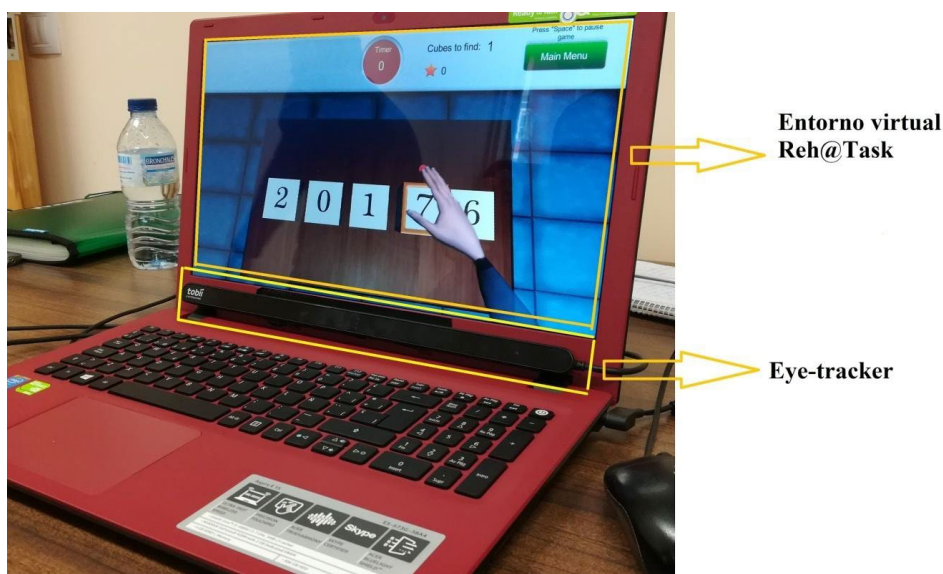
La muestra final consistió en tres varones con una edad media de 55,33 años (desviación estándar  $\pm 5,50$  años) en fase crónica tras haber sufrido un accidente cerebrovascular de tipo isquémico, dos de ellos afectos del hemisferio derecho y uno del izquierdo. Además, ninguno de ellos tenía experiencia previa en rehabilitación con realidad

virtual. La intervención se realizó de acuerdo con la Declaración de Helsinki y los participantes dieron su consentimiento informado por escrito

#### *Material y métodos*

Los participantes entrenaron durante dos meses con un sistema de neurorrehabilitación basado en técnicas de realidad virtual (Reh@Task) adaptado para que se pudiera utilizar un eye-tracker para controlar objetos virtuales. Los voluntarios realizaron 12 sesiones de entrenamiento de 30 minutos cada una.

El sistema consiste en un ordenador portátil con una pantalla de 15'6 pulgadas (34'53 cm x 19'42 cm) de alta definición, resolución de 1366 x 768 píxeles y con sistema operativo Windows 10, junto con el eye-tracker (Tobii Eyetracking) como dispositivo para controlar el brazo virtual con la mirada, y que fue colocado en la base de la pantalla del ordenador con una inclinación de 45° respecto a la horizontal para dirigirse a los ojos del participante (Ilustración 8).



*Ilustración 8: Instalación para las sesiones de entrenamiento. Un ordenador portátil muestra el escenario virtual y debajo está el eye-tracker a través del cual el paciente interactúa.*

Este sistema se montó sobre una mesa en la sala de fisioterapia de la asociación y, siguiendo las instrucciones del fabricante del eye-tracker, los participantes se sentaban frente al ordenador a una distancia aproximada de 55 cm y los brazos en reposo sobre la mesa o su regazo.

Los voluntarios entrenaron con Reh@Task. Este software, desarrollado por el M-ITI, se basa en una tarea de atención y memoria a corto plazo, en la que en una pantalla inicial se le presenta al jugador una ficha o cubo con una letra, número o figura y a continuación, una segunda pantalla muestra sobre una mesa varias fichas diferentes, de entre las cuales una es la que se le mostró en el paso anterior. El usuario debe elegir, posicionando el brazo virtual sobre el ítem durante un tiempo determinado (movimiento de alcance), la respuesta que considere correcta. A medida que el jugador progresa, va subiendo de nivel y el juego propone memorizar un mayor número de ítems a la vez que aumenta la variedad de color de éstas para incrementar la dificultad (Ilustración 9).



*Ilustración 9: En estas imágenes vemos a dos participantes utilizando el Reh@Task con control ocular durante una de las sesiones de la intervención en la sala de fisioterapia*

Se realizaron varias pruebas para evaluar las capacidades cognitivas y funcionales antes y después del entrenamiento y se compararon los resultados. Además, los participantes respondieron unos cuestionarios sobre usabilidad y satisfacción al final de este periodo. A continuación, se enumeran las pruebas:

- Test de Bell: Esta prueba es empleado para comprobar la atención sostenida o capacidad para mantener concentrada la atención sobre los estímulos a pesar del aburrimiento y el cansancio, así como verificar la existencia de negligencia hemiespacial
- Test de MoCA (Montreal Cognitive Assessment) Se trata de una prueba de valoración del estado cognitivo del paciente. Dicha prueba consiste en evaluar una serie de aptitudes, en total 8, diferenciadas en distintos ejercicios, con el objetivo de detectar anomalías cognitivas.
- Test de depresión de Yesavage: Se trata de una escala utilizada en el ámbito geriátrico para determinar el grado de depresión del sujeto<sup>54</sup>. Consiste en una serie de preguntas relacionadas con: dudas existenciales, estados anímicos, mentales y físicos, papel en el ámbito familiar y social, etc.
- Test de Fugl-Meyer: Es un sistema para la evaluación de la función motora, equilibrio, cualidades de la sensación y función de las articulaciones en pacientes hemipléjicos. Se trata de una prueba que se divide en dos partes: miembro superior y miembro inferior, pero en nuestro caso concreto solo interesó la primera parte.
- Encuestas de usabilidad y satisfacción: Estas encuestas se realizaron al acabar el entrenamiento con este sistema, con la finalidad de valorar de la manera más objetiva posible las sensaciones y las dificultades a la hora de realizar el entrenamiento de cada individuo. Se trata de preguntas a fin de obtener la opinión personal de cada individuo con respecto al sistema de entrenamiento.

### Resultados

Los resultados descriptivos muestran mejores puntuaciones en las pruebas tras el periodo de entrenamiento; además se observó una tendencia a la significación en la mejora de la función del miembro superior afecto y estado emocional. Además, los cuestionarios de usabilidad y satisfacción refieren una valoración positiva de la actividad.

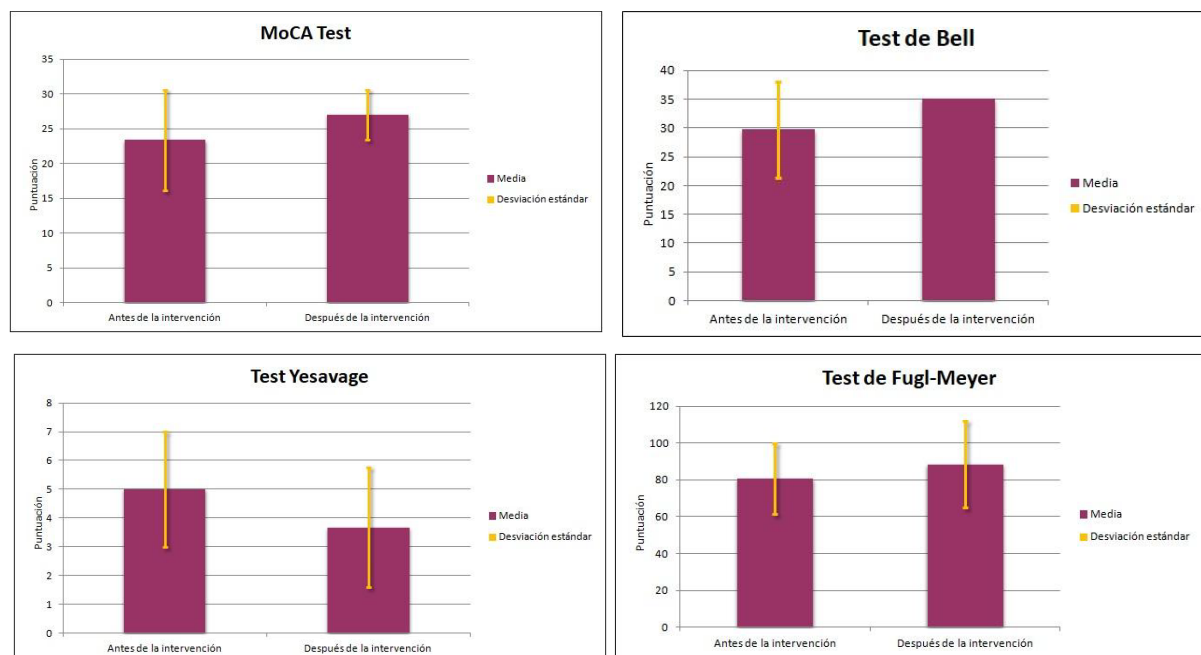


Ilustración 10: Puntuaciones obtenidas por los participantes en las distintas pruebas antes y después de la intervención.

### Conclusiones

Nuestra intervención apoya la viabilidad del control ocular de objetos virtuales como sistema de neurorrehabilitación y muestra que es deseable seguir investigando en esta línea con muestras de pacientes mayor tamaño y añadiendo un grupo de control.

NOTA: Este trabajo será próximamente remitido como comunicación a un congreso del área de la rehabilitación.

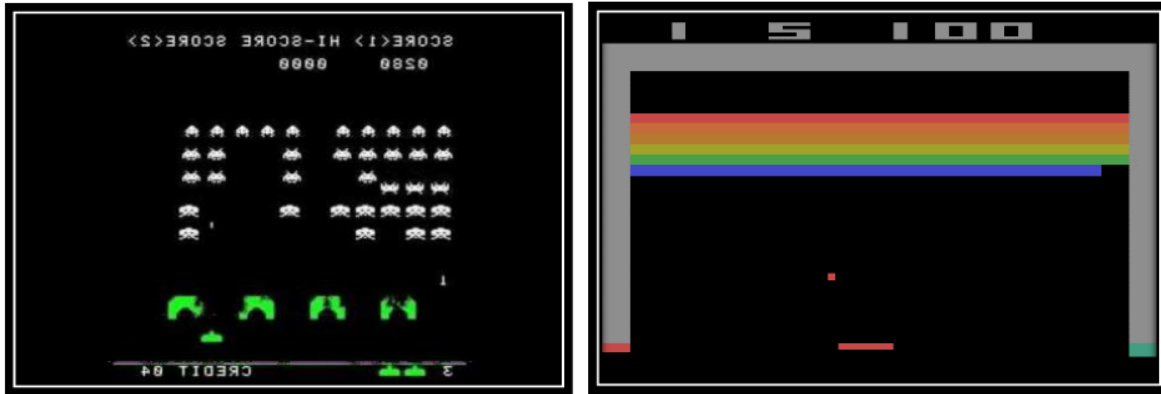
### b. Desarrollo de una herramienta de seguimiento a distancia de la terapia neurorrehabilitadora con control ocular de juegos serios

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una herramienta o método que permita a los pacientes el uso de videojuegos serios para neurorrehabilitación en sus casas, y el control remoto de sus resultados por parte de los especialistas médicos del Hospital Universitario de Canarias. Este trabajo corresponde a un trabajo de grado en Ingeniería Informática:

**Desarrollo de una herramienta de seguimiento a distancia de la terapia neurorrehabilitadora con juegos serios. Joel Pérez Ramos. Universidad de la Laguna. Julio de 2017.**

Se parte de un trabajo previo, fruto de trabajos anteriores, en los que se desarrollaron unos videojuegos serios controlados por Eye-Tracking. Estos juegos serios son versiones de los juegos clásicos *Space Invaders* y *Breakout* de Atari (implementados en Unity):





*Ilustración 11: Versiones de los clásicos videojuegos Space Invaders (izquierda) y Breakout (derecha) de Atari controladas por eye tracking que se utilizaron.*

El objetivo es el desarrollo de una herramienta o método que permita a los especialistas médicos controlar de forma remota a los distintos pacientes si están realizando adecuadamente la terapia neurorrehabilitadora en sus domicilios. Para ello, los videojuegos mencionados anteriormente fueron adaptados para extraer algunos parámetros de interés, representarlos gráficamente y así poder saber si se está cumpliendo la terapia de forma adecuada.

### Adaptación de los videojuegos

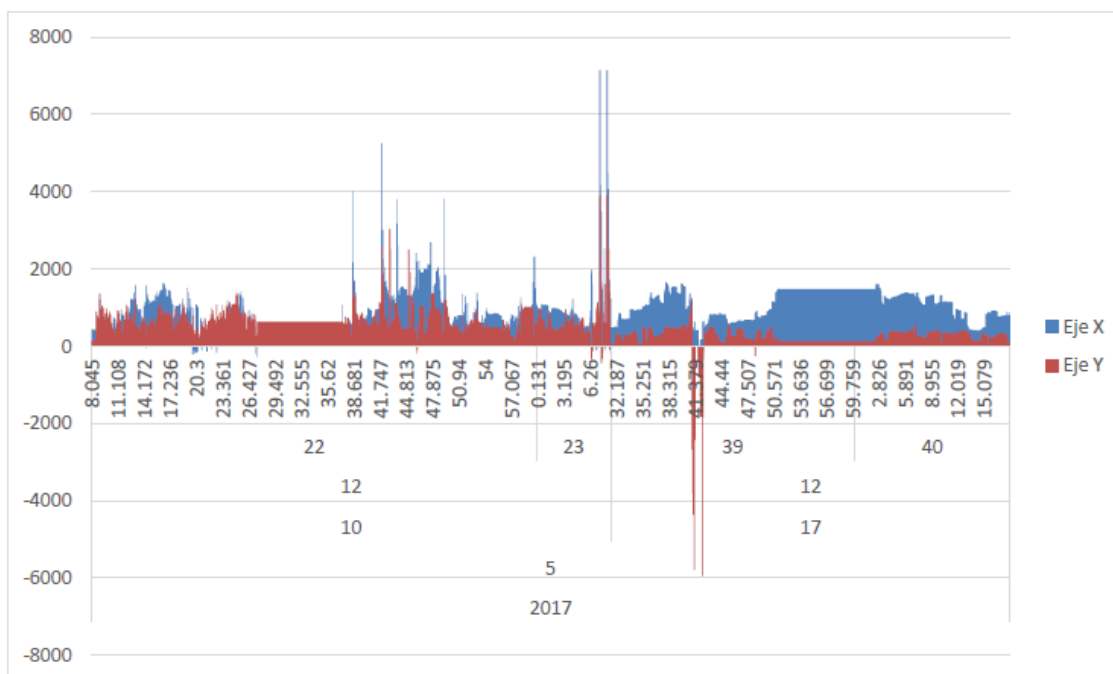
El usuario tiene la capacidad de elegir si quiere guardar o no el fichero donde se registran las coordenadas donde apunta la mirada mientras juega, antes de la calibración con el Eye-Tracker. Este fichero es esencial, porque con él, los especialistas médicos podrían ver dichas coordenadas una vez jugada su partida, si el fichero estuviera accesible. Por otro lado, utilizar únicamente las coordenadas de fijación de la mirada guardadas en este fichero, no basta para saber si la terapia se está realizando adecuadamente. Si el usuario se desconcentra, se distrae o se retira del juego sin apagarlo, el Eye-Tracker seguirá guardando muestras de la última posición detectada. Esta circunstancia puede dar lugar a error en la interpretación de los datos por parte del médico, ya que puede pensar que el usuario sigue jugando. Detectar esto es importante, puesto que la terapia puede ser útil para el paciente si la lleva a cabo durante los periodos de tiempo mínimos establecidos por el médico.

Una vez localizado en el código fuente de ambos videojuegos, la ubicación y la estructura de cómo se escribe el fichero de las coordenadas, se ha optado por lo siguiente para enriquecer su eficiencia y así tratar el problema abordado:

- **Para la Ubicación:** Previamente se guardaba en una ruta oculta en el ordenador de quién ejecutaba el videojuego, siendo ésta de difícil acceso. Por lo tanto, se ha modificado para que, una vez el paciente haya ejecutado el videojuego, se genere el archivo en la misma ruta donde se haya inicializado.
- **Para la Estructura:** El fichero se ha enriquecido con nuevos campos con la fecha y hora de cada registro de detección de la mirada. De esta forma, el especialista médico puede comprobar si el paciente ha estado jugando activamente el tiempo mínimo establecido.

Una vez modificado el fichero, tanto su ubicación como su contenido, tenemos que sincronizarlo de alguna manera para que lo reciba el especialista médico a tiempo real y permitirle su análisis. Para ello, se han considerado los distintos servicios de almacenamiento en la nube más conocidos. El servicio de almacenamiento que se ha elegido para este proyecto ha sido Dropbox. Se ha elegido Dropbox ya que consta de una interfaz sencilla.

Una vez obtenidos los datos de interés a través del fichero sincronizado mediante Dropbox, se explotarán dichos datos para que el especialista médico pueda controlar de forma remota la neurorrehabilitación. Para ello se usa Excel, donde se importan los datos de interés y se utiliza su funcionalidad de gráficos dinámicos. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo del resultado.



*Ilustración 12: Gráfico resultante de una muestra (un paciente). Se observan las coordenadas posiciones oculares X e Y (representadas en azul y rojo respectivamente, sobre el eje vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal). Por ejemplo, este paciente el día 10 de Mayo de 2017, a las 12:22 horas y en un intervalo entre el segundo 27 y el 38, dejó de mirar a la pantalla, lo que se representa con unas coordenadas constantes respecto al eje vertical.*

## Conclusiones

Se ha conseguido diseñar un método eficaz para permitir a los especialistas de neurorrehabilitación del Hospital Universitario de Canarias (HUC) hacer un seguimiento fiable de la terapia de juegos serios de los pacientes, a distancia y a tiempo real. Las versiones anteriores de los juegos guardaban, en un fichero oculto y de difícil acceso para el especialista médico, los datos del movimiento ocular de los pacientes, concretamente las coordenadas X e Y hacia donde se miraba para controlar el juego. La solución propuesta ha conseguido modificar la ubicación del archivo y su contenido. De este modo el archivo puede ser sincronizado a tiempo real desde Dropbox, y el especialista médico puede analizar si el paciente está ejecutando la terapia neurorrehabilitadora adecuadamente en su domicilio desde su ordenador.

### c. Reh@City v2.0

Durante MACBIOIDI se creó la v2.0 de esta herramienta de rehabilitación cognitiva (Reh@City v2.0), y se ha realizado un estudio con pacientes, comparando la herramienta de realidad virtual con entrenamiento cognitivo tradicional basado en papel y lápiz.



Reh@City v2.0 mejora la v1.0 de este producto. Reh@City (RC) es una simulación de realidad virtual de una ciudad donde los pacientes pueden entrenar una variedad de habilidades cognitivas mientras se realiza simulando actividades de la vida diaria. Un prototipo inicial de esta ciudad con cuatro entornos fue clínicamente validado con una muestra de participantes con ictus, y los resultados alentadores motivaron mejoras en el RC, en términos de sus tareas, interacción con el contenido y adaptación de tareas. RC v2.0 es el resultado de las mejoras, un software basado en realidad virtual para rehabilitación cognitiva que presenta diferentes tareas de entrenamiento cognitivo que tienen lugar en 8 entornos realistas Modelados en 3D, y personalizados para el paciente. También implementa adaptación de dificultad automática.

***Teresa Paulino, Ana Faria and Sergi Bermudez i Badia. (2019). Reh@City v2.0: a comprehensive virtual reality cognitive training system based on personalized and adaptive simulations of activities of daily living. Presented at the The Experiment@ International Conference 2019 (exp.at'19), Funchal, Portugal: IEEE.***

Con RC v2.0 se realizó un trabajo en que comparamos el desempeño de pacientes de ictus en dos sistemas de rehabilitación cognitiva, uno tradicional basado en tareas de papel y lápiz, y otro interactivo, que fue presentado en las siguientes publicaciones.

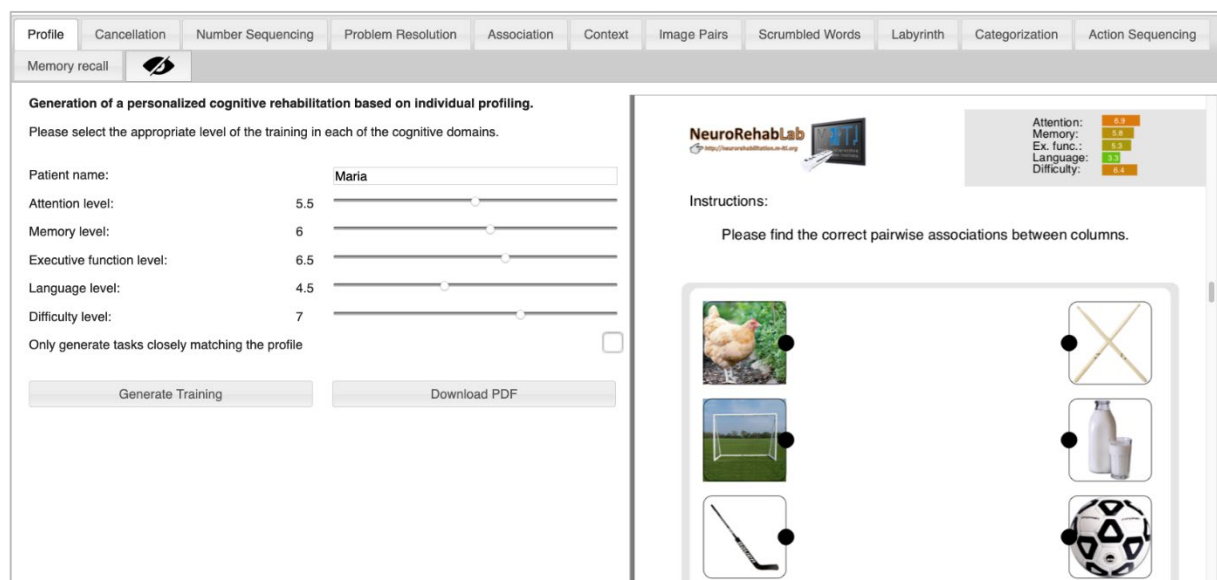
***Faria, A. L., Pinho, M. S., & Bermúdez i Badia, S. (2020). A comparison of two personalization and adaptive cognitive rehabilitation approaches: a randomized controlled trial with chronic stroke patients. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 17(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00691-5>***

***Ana Lúcia Faria, Teresa Paulino and Sergi Bermúdez i Badia. (2019). Comparing adaptive cognitive training in virtual reality and paper-and-pencil in a sample of stroke patients. Presented at the International Conference of Virtual Rehabilitation (ICVR), Tel Aviv: IEEE.***

## Descripción de las intervenciones

### *Intervención con papel y lápiz: el generador de tareas (TG)*

El TG es una herramienta gratuita y accesible en todo el mundo que es capaz de generar programas personalizados de rehabilitación cognitiva en papel y lápiz en formato PDF, compuesto por un conjunto de 11 tareas recopiladas en entornos clínicos y parametrizadas mediante un proceso participativo con expertos en rehabilitación: Cancelación; Secuencias numéricas; Resolución del problema; Asociación; Comprensión de contextos; Pares de imágenes; Búsqueda de palabras; Laberintos; Categorización; Secuenciación de acciones; y Memoria de historias (véase el anexo 1 para ver un ejemplo). Después de la caracterización de cada participante, los datos de la evaluación MoCA se normalizaron en una escala de 1 a 10 y se generó un programa de entrenamiento completo (Ilustración 13). En la intervención de TG, se indicó a los participantes que usaran el brazo con el que se sentirían más cómodos.



The screenshot displays the NeuroRehabLab software interface. At the top, there is a navigation bar with tabs: Profile, Cancellation, Number Sequencing, Problem Resolution, Association, Context, Image Pairs, Scrambled Words, Labyrinth, Categorization, and Action Sequencing. The 'Association' tab is currently selected.

Below the navigation bar, the 'Memory recall' section is active. It contains a sub-header 'Generation of a personalized cognitive rehabilitation based on individual profiling.' and a prompt 'Please select the appropriate level of the training in each of the cognitive domains.'

The 'Patient name' field is filled with 'Maria'. Below this, there are five sliders for setting training levels:

- Attention level: 5.5
- Memory level: 6
- Executive function level: 6.5
- Language level: 4.5
- Difficulty level: 7

There is a checkbox labeled 'Only generate tasks closely matching the profile' which is currently unchecked. Below the sliders are two buttons: 'Generate Training' and 'Download PDF'.

On the right side of the interface, there is a 'NeuroRehabLab' logo and a URL. Below the logo, the 'Instructions' section reads: 'Please find the correct pairwise associations between columns.'

The task area shows two columns of images. The left column contains three images: a chicken, a soccer goal, and a hockey stick. The right column contains three images: a crossed hammer and sickle, a milk carton, and a soccer ball. Each image has a black dot next to it, indicating it is a selectable item.

In the top right corner, there is a status box with the following values:

- Attention: 6.3
- Memory: 5.6
- Ex. func.: 5.5
- Language: 4.5
- Difficulty: 6.8

Ilustración 13: Parámetros de personalización de entrenamiento de TG (a la izquierda) y ejemplo de generación de tareas de Asociación (a la derecha).

#### Intervención basada en realidad virtual: Reh@City v2.0

Nuestra intervención basada en la realidad virtual consistió en las mismas tareas de papel y lápiz de TG contextualizadas en diferentes ubicaciones de una ciudad virtual con calles, aceras, edificios, tiendas y parques: el Reh@City v2.0.

Reh@City v2.0 proporciona una experiencia de rehabilitación más ecológica, ya que los pacientes deben resolver tareas cognitivas a través de AVD familiares en una variedad de lugares comunes: por ejemplo, comprar alimentos en un supermercado (Ilustración 14a); recoger un paquete en la oficina de correos; pagar la electricidad en el cajero automático del banco (Ilustración 14b); comprar analgésicos en la farmacia; recoger camisetas en la tienda de ropa; jugar un juego en el parque (Ilustración 14c); lea el periódico en el quiosco y ponga la mesa en casa (Ilustración 14d). Estos lugares exhiben vallas publicitarias y productos reales de espacios reales y marcas comerciales que se encuentran comúnmente en Portugal para ayudar al paciente a relacionar las tareas de realidad virtual con el mundo real. Además, de acuerdo con las AVD simuladas reales y para aumentar la validez ecológica del entrenamiento, los pacientes también debían usar su brazo parético para resolver las tareas.

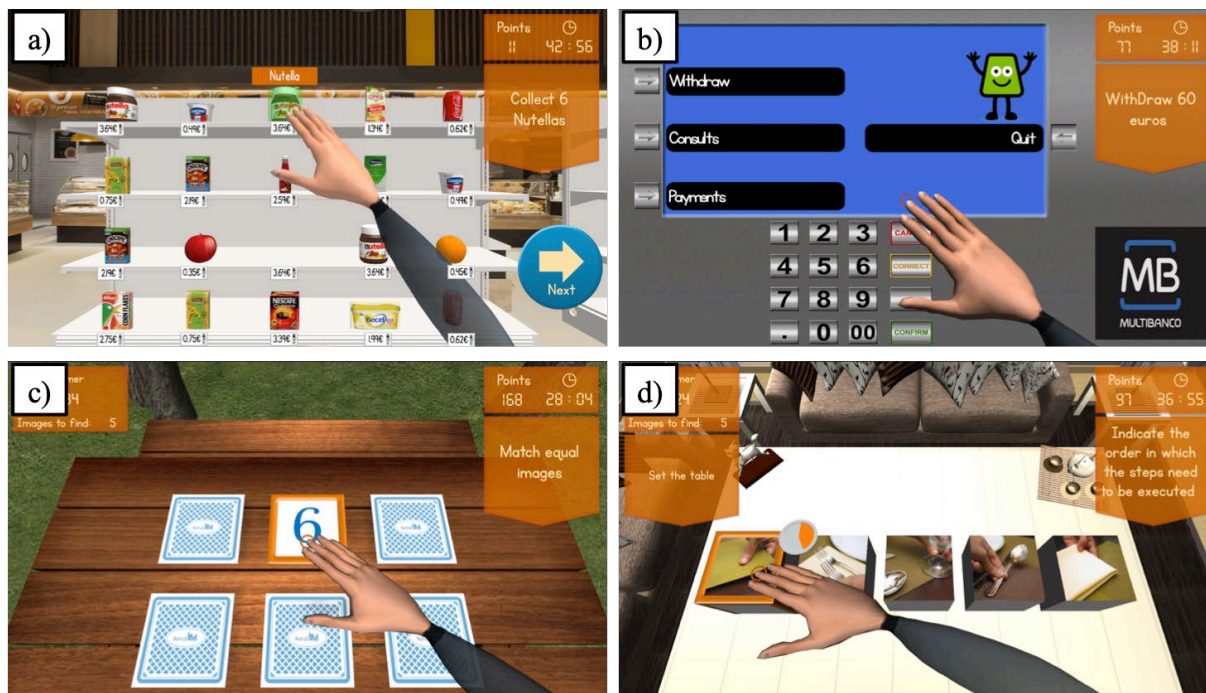


Ilustración 14: Ejemplos de tareas de Reh@City v2.0: a) comprar comida en el supermercado; b) realizar pagos en el cajero automático del banco; c) jugar un juego de cartas en el parque y; d) poner la mesa en casa.

Debido a que generalmente se trataba de personas de edad avanzada y con pocos conocimientos informáticos, la interacción con el entorno virtual se simplificó y la ciudad se diseñó para tener solo bloques de construcción cuadrados o rectangulares e intersecciones de calles perpendiculares, así como entornos simulados simplificados. Esta disposición simplificada también permitió un control más preciso de la parametrización de la dificultad (Ilustración 15).

Las simulaciones de realidad virtual exigen una compensación de menos realismo para permitir más interactividad en tiempo real y parametrización de la dificultad. No obstante, esta simplificación, Reh@City tiene muchos elementos que dan fe de su validez ecológica. En términos de verosimilitud, las tareas simulan actividades de la vida cotidiana, aunque se facilita la realización de la tarea virtual; el entorno y los objetos reales están mínimamente simulados y corresponden a ubicaciones familiares y marcas registradas existentes en Portugal; la extremidad superior del usuario está parcialmente representada; las situaciones específicas en las que se llevan a cabo las acciones se modelan mínimamente (por ejemplo, la secuencia de acciones de hornear un pastel ocurre en un ambiente de cocina y la lectura de un artículo de periódico ocurre en un quiosco); combina estímulos 2D y 3D y; la navegación en la ciudad es acorde con el punto de vista del usuario. Con respecto a la veridicidad, en un estudio anterior con Reh@City v1.0, hemos encontrado una transferencia del entrenamiento virtual al funcionamiento del mundo real a través de mejoras significativas a escala funcional.



*Ilustración 15: Vista de calle tridimensional de Reh @ city v2.0. Los usuarios reciben instrucciones de objetivos con un mini mapa que indica la ruta óptima y una flecha de calle. Los contadores de tiempo y puntos se utilizan para proporcionar información sobre el rendimiento.*

Reh@City v2.0 se instaló en una PC (SO: Windows 7, CPU: Intel core 2 duo E8235 a 2.80 GHz, RAM: 4 Gb, Gráficos: ATI Mobility Radeon HD 2600 XT). Reh@City es una herramienta de rehabilitación cognitiva, que permite a los médicos personalizar parámetros de entrenamiento de memoria, atención, funciones ejecutivas, lenguaje y dificultad de acuerdo con el puntaje total y de subdominios del MoCA (Ilustración 16) y lo habilita a través de los movimientos de las extremidades superiores.





Ilustración 16: Parámetros de personalización de entrenamiento de Reh@City v2.0 de acuerdo con la puntuación total y de subdominios del MoCA.

Dados los beneficios potenciales reportados en la literatura de combinar la rehabilitación cognitiva y motora a través de la VR, Reh@City v2.0 implica el uso del brazo parético para resolver sus tareas de entrenamiento cognitivo. El usuario trabajó sobre una mesa, frente a un monitor LCD (24") y movió un mango personalizado con un patrón de seguimiento en la superficie de la mesa con su brazo parético (Ilustración 17). Los movimientos 2D de alcance de la extremidad superior se capturaron a través de un software de seguimiento de patrones de realidad aumentada (AR) basado en cámara (AnTS) conectado a una cámara PlayStation Eye (Sony Computer Entertainment Inc., Tokio, Japón). Para adaptar la interacción a los usuarios individuales, el Reh@City v2.0 implementó una función de calibración incorporada que normaliza el esfuerzo motor requerido en la tarea al rango activo de movimiento del usuario. Los movimientos del usuario luego se mapean en los movimientos de un brazo virtual (en tareas de interior) o como direcciones de movimiento (durante la navegación al aire libre) en el entorno Reh@City v2.0.



*Ilustración 17: Configuración experimental de Reh@City v2.0. El usuario se enfrenta a un monitor LCD y mueve un asa en la superficie de la mesa con su brazo parético para interactuar con el contenido virtual.*

## Instrumentos

Como instrumentos utilizamos el MoCA como una medida de funcionamiento cognitivo general, que se ha demostrado que tiene una buena sensibilidad y especificidad en la detección de deterioro cognitivo después de un accidente cerebrovascular. Además, seleccionamos atención específica, memoria, funciones ejecutivas y evaluaciones del lenguaje, que son los dominios a los que se dirigen tanto TG como Reh@City v2.0. Para evaluar la atención utilizamos el Trail Making Test A y B (TMT A y B), una prueba neuropsicológica muy popular que proporciona información sobre búsqueda visual, escaneo visual, atención selectiva y dividida, velocidad de procesamiento, flexibilidad mental, y también funcionamiento ejecutivo. En la parte A, los círculos numerados del 1 al 25 deben conectarse en orden numérico. En la parte B, los números del 1 al 13 y las letras de la A a la L deben conectarse alternando números y letras en orden ascendente. La evaluación de la memoria se realizó con Verbal Paired Associates de la Wechsler Memory Scale-III (WMS-III). Para evaluar las funciones ejecutivas, es decir, la memoria de trabajo y la velocidad de procesamiento, usamos el intervalo de dígitos (condiciones de recuperación hacia adelante y hacia atrás) también del WMS-III, y la búsqueda de símbolo y la codificación de símbolo de dígito (codificación y condiciones de emparejamiento de aprendizaje incidental) del Escala de inteligencia adulta de Wechsler III (WAIS). Finalmente, evaluamos el lenguaje a través del Vocabulario de WAIS-III, que brinda información sobre la comprensión verbal.

Como instrumentos secundarios usamos el impacto percibido de los problemas persistentes con la cognición, según lo evaluado por la Evaluación del estado cognitivo informado por el paciente (PRECiS), que incluye 27 ítems básicos que preguntan a los encuestados sobre el impacto de la cognición en cuatro dimensiones conceptuales: habilidades para la vida cotidiana, familia y vida, estado de ánimo y sentido de sí mismo.

## Resultados

### *Descripción de la muestra*

La muestra estuvo formada por treinta y dos pacientes con ictus distribuidos aleatoriamente en dos grupos. El grupo Reh@City v2.0 estaba compuesto por catorce (5 hombres, 9 mujeres) pacientes adultos ( $M = 59,1$  años,  $DE = 11,8$ ) con accidente cerebrovascular (11 hemisferio derecho, 3 hemisferio izquierdo; 12 isquémicos, 2 hemorrágicos), con un promedio de  $45,9 \pm 43,6$  meses después del ictus y una media de  $8 \pm 5,3$  años de escolaridad. El grupo de TG estaba compuesto por dieciocho (11 hombres, 7 mujeres) pacientes adultos ( $M = 65$  años,  $DE = 6,2$ ) con accidente cerebrovascular (9 hemisferio derecho, 6 hemisferio izquierdo, 3 no especificado; 14 isquémico, 3 hemorrágico, 1 no especificado), con una media de  $21,3 \pm 12,9$  meses después del ictus y una media de  $5,5 \pm 3,2$  años de escolaridad. La prueba de Mann-Whitney no reveló diferencias entre los grupos en las características demográficas y en todas las medidas de resultado iniciales.

Según la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS), los datos se distribuyeron normalmente en ambos grupos por edad ( $KS_{Reh@City} = .189$ ,  $p = .190$ ;  $KSTG = .182$ ,  $p = .118$ ) y tiempo después del ictus ( $KS_{Reh@City} = .211$ ,  $p = .091$ ;  $KSTG = .187$ ,  $p = .095$ ). Los datos no se distribuyeron normalmente por género ( $KS_{Reh@City} = .407$ ,  $p < .001$ ;  $KSTG = .392$ ,  $p < .001$ ), tipo de accidente cerebrovascular ( $KS_{Reh@City} = .510$ ,  $p < .001$ ;  $KSTG = .463$ ,  $p < .001$ ), el lado de la lesión ( $KS_{Reh@City} = .510$ ,  $p < .001$ ;  $KSTG = .463$ ,  $p < .001$ ) y el número de años de escolaridad ( $KS_{Reh@City} = .345$ ,  $p < .001$ ;  $KSTG = .405$ ,  $p < .001$ ).

### *MoCA: funcionamiento cognitivo general*

Analizamos el funcionamiento cognitivo global, evaluado por el MoCA, de los dos grupos en las evaluaciones pre y post intervención, y el seguimiento para los grupos Reh@City v2.0 y TG. Una prueba de Wilcoxon para las diferencias dentro de los grupos reveló que solo el grupo Reh@City v2.0 presentó mejoras estadísticas significativas entre los tiempos de evaluación previa y posterior en MoCA [Pre:  $Mdn = 23$ ,  $IQR = 19,8-26$ ; Mensaje:  $Mdn = 25$ ,  $IQR = 23-27,3$  ( $W(14) = 64,00$ ,  $Z = -2,777$ ,  $p = 0,005$ ,  $r = 0,74$ )]. En el análisis de subdominios, encontramos mejoras significativas en la capacidad visuoespacial y el funcionamiento ejecutivo [Pre:  $Mdn = 3,5$ ,  $IQR = 2,8-4$ ; Publicación:  $Mdn = 4$ ,  $IQR = 3-5$  ( $W(14) = 41,00$ ,  $Z = -2,310$ ,  $p = .021$ ,  $r = .62$ )] y atención [Pre:  $Mdn = 4$ ,  $IQR = 2,8-5,3$ ; Publicación:  $Mdn = 5,5$ ,  $IQR = 3-6$  ( $W(14) = 28,00$ ,  $Z = -2,460$ ,  $p = .014$ ,  $r = .66$ )]. Con respecto al grupo TG, el único cambio significativo fue en el subdominio de orientación MoCA [Pre:  $Mdn = 6$ ,  $IQR = 5-6$ ; Mensaje:  $Mdn = 6$ ,  $IQR = 6-6$  ( $W(18) = 15,00$ ,  $Z = -2,121$ ,  $p = 0,034$ ,  $r = 0,57$ )].

La prueba de Mann-Whitney indicó que el grupo Reh@City v2.0 mejoró significativamente más que el grupo TG, en términos de funcionamiento cognitivo general, según lo evaluado por el MoCA, desde el inicio hasta la postintervención [Reh@City v2.0:  $Mdn = 2$ ,  $IQR = 0-3$ ; TG:  $Mdn = -1,5$ ,  $IQR = -3,25-2$  ( $U = 65,00$ ,  $Z = -2,334$ ,  $p = .020$ ,  $r = .41$ )].

### *TMT A & B - Atención*

Calculamos el rendimiento de TMT A y TMT B para los dos grupos, en términos de errores y tiempo de finalización, antes, después de la intervención y el seguimiento (Tabla 4). Sólo el grupo TG mostró una mejora significativa en la reducción del tiempo hasta la finalización de la prueba TMT A antes y después de la intervención [Pre:  $Mdn = 84$ ,  $IQR = 59,5-114,3$ ; Puesto:  $Mdn = 72$ ,  $IQR = 58,8-99,5$  ( $W(18) = 18,00$ ,  $Z = -2,588$ ,  $p = .010$ ,  $r = .61$ )].

### *Asociados emparejados verbales de WMS-III - Memoria*

En esta prueba de aprendizaje y memoria, encontramos mejoras significativas dentro del grupo Reh@City v2.0 para la retención [Pre:  $Mdn = 75$ ,  $IQR = 0-100$ ; Publicación:  $Mdn = 100$ ,  $IQR = 74,1-100$  ( $W(14) = 36,00$ ,  $Z = -2,524$ ,  $p = .012$ ,  $r = .67$ )] y reconocimiento [Pre:  $Mdn = 24$ ,  $IQR = 21,8-24$ ; Publicación:  $Mdn = 24$ ,  $IQR = 24-24$  ( $W(14) = 21,00$ ,  $Z = -2,214$ ,  $p = .027$ ,  $r = .59$ )] puntuaciones posintervención. En el grupo de TG, las mejoras solo

fueron significativas para la puntuación de retención en ambos posintervención [Pre: Mdn = 0, IQR = 0–56,3; Publicación: Mdn = 82,9, IQR = 26,5–100 (W (18) = 118,00, Z = -2,602, p = .009, r = .61)] y seguimiento [Pre: Mdn = 0, IQR = 0–56,3; FU: Mdn = 82,9, IQR = 37,5–100 (W (18) = 95,00, Z = -2,776, p = 0,006, r = 0,65)].

#### *Codificación de dígitos y símbolos WAIS-III, búsqueda de símbolos y rango de dígitos: funciones ejecutivas*

El grupo Reh@City v2.0 mostró mejoras en la tarea de codificación de dígitos y símbolos después de la intervención [Pre: Mdn = 28,5, IQR = 23,5–36,8; Puesto: Mdn = 33, IQR = 26,8–47 (W (14) = 87,00, Z = -2,171, p = .030, r = .58)]. El grupo de TG tuvo mejoras significativas en la búsqueda de símbolos en el seguimiento [Pre: Mdn = 12, IQR = 7,8–13,5; FU: Mdn = 15, IQR = 9–20,3 (W (18) = 101,00, Z = -2,340, p = 0,019, r = 0,55)].

#### *Vocabulario WAIS-III - Lenguaje*

El análisis de la medida de resultado del lenguaje para los dos grupos antes, después de la intervención y el seguimiento reveló que solo el grupo de TG mostró mejoras en la evaluación de vocabulario en el seguimiento [Pre: Mdn = 19,5, IQR = 13–28,5; FU: Mdn = 24,5, IQR = 16,5–30,3 (W (18) = 166,00, Z = -3,514, p < .001, r = .83)]. Esta diferencia también fue significativa con la corrección de Bonferroni (p = .002).

#### *PRECiS: Evaluación del estado cognitivo informada por el paciente*

Al analizar las respuestas de los dos grupos antes, después de la intervención y el seguimiento del cuestionario PRECiS, solo el grupo Reh@City v2.0 reveló una disminución significativa autopercebida en el impacto de los déficits cognitivos después de la intervención del [Pre: Mdn = 13,5, IQR = 7–23,8; Publicación: Mdn = 12, IQR = 3,8–21,3 (W (14) = 13,00, Z = -2,041, p = .041, r = .55)].

#### **d. KAVE**

La infraestructura tecnológica desarrollada en el proyecto fue extendida con un espacio inmersivo CAVE de 3x3m con proyección envolvente y en el suelo. Este espacio es de bajo costo (~5000 €), lo que representa un orden de magnitud inferior a los sistemas CAVE anteriores. Este trabajo está disponible en código abierto para Unity en (<https://neurorehabilitation.m-iti.org/tools/>).

**Afonso Gonçalves, Sergi Bermúdez i Badia. (2018). KAVE: Building Kinect Based CAVE Automatic Virtual Environments, Methods for Surround- Screen Projection Management, Motion Parallax and Full-Body Interaction Support. In PACM on Human-Computer Interaction (Vol. 2, p. EICS). ACM.**

<https://doi.org/10.1145/3229092>

En el ámbito de la salud mental y biofeedback, se realizó un trabajo en que estudiamos como los elementos de un ambiente virtual pueden afectar el estado afectivo del usuario, y como se puede promover un mejor control en la autorregulación del estado anímico.

**Badia, S. B. i, Quintero, L. V., Cameirao, M. S., Chirico, A., Triberti, S., Cipresso, P., & Gaggioli, A. (2018). Towards Emotionally Adaptive Virtual Reality for Mental Health Applications. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2878846>**

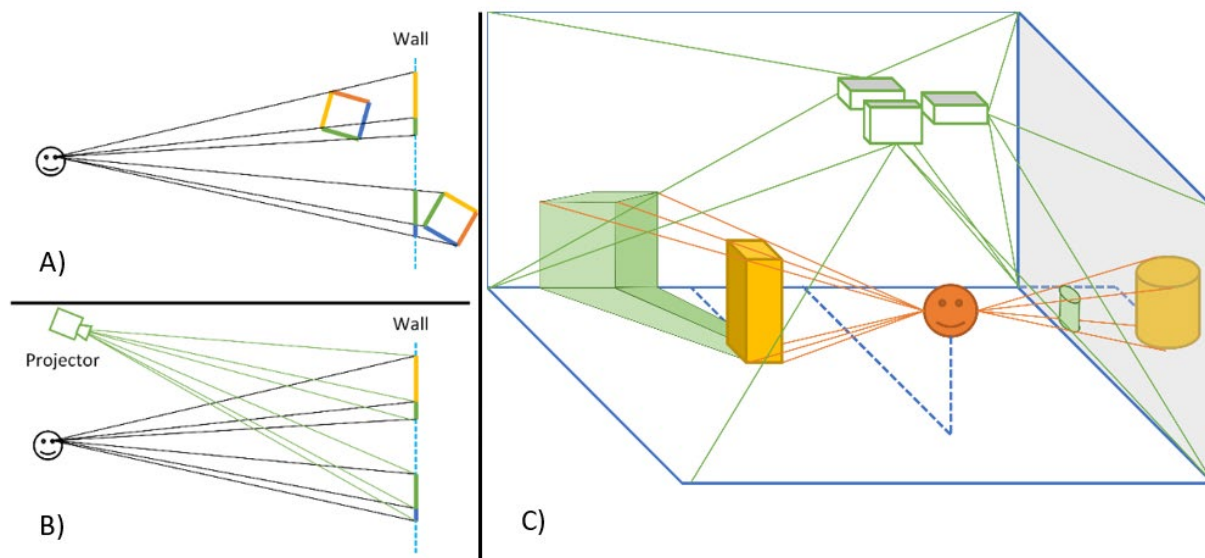
1- KAVE: un complemento de Unity de código abierto basado en Kinect para entornos virtuales automáticos CAVE con interacción de cuerpo completo



## Métodos

### Complemento KAVE, agregando Motion Parallax y soporte para todo el cuerpo a Unity usando Kinect

Una característica importante de una CAVE es el efecto de paralaje de movimiento producido. Esto se logra manteniendo un seguimiento continuo del punto de vista del usuario y el ajuste automático de la proyección de imágenes consistente con esa perspectiva. Ilustración 18 A) y B) ilustra el fenómeno en un diagrama monocular 2D. Al conocer las posiciones del punto de vista del usuario, el plano de proyección y los elementos virtuales a representar (Ilustración 18A), podemos proyectar imágenes en ese plano coherentes con lo que el usuario vería si los elementos virtuales estuvieran en el mundo real (Ilustración 18). Al generalizar este efecto a 3D y al uso de múltiples superficies de proyección, obtenemos el funcionamiento básico de una CAVE, como se muestra en la Ilustración 18C) donde las líneas azules representan las paredes y el piso de una CAVE (superficies de proyección), el icono naranja la posición de la cabeza del usuario y los elementos amarillos representan los objetos virtuales en sus posiciones virtuales en relación con el usuario. Como resultado, la CAVE debe mostrar las imágenes verdes (imágenes planas en las superficies de proyección) para emular el efecto visual que tendrían los objetos virtuales si fueran reales.



*Ilustración 18: A) Cómo el usuario debería ver los objetos físicos (cuadrados de colores); B) Proyectar en la pared de lo que debe ver el usuario. C) Proyecciones (verde sólido) de elementos virtuales (amarillo) en superficies reales (azul) ajustadas a la perspectiva del punto de vista del usuario (naranja) por los proyectores CAVE.*

La creación del efecto de paralaje depende, por tanto, del conocimiento preciso sobre el tamaño, la posición y la orientación de las superficies de proyección, el sistema de coordenadas de seguimiento del cuerpo y el mapeo correcto de las imágenes de los proyectores CAVE en las superficies. Un proceso de calibración debe proporcionar esta información ya que es necesario modelar matemáticamente la CAVE en Unity. Por lo tanto, el proceso de calibración permite el mapeo correcto de las proyecciones en las paredes físicas de la CAVE y obtener una ubicación precisa del punto de vista del usuario en relación con ellas.

Nuestro proceso de calibración crea un archivo con el que los siguientes elementos son creados en tiempo de ejecución por una aplicación de Unity usando nuestro complemento.

**1. CAVE Kinect V2:** Un objeto de juego de Unity con la posición y orientación que coinciden con el sensor real, lee hasta 25 articulaciones de los usuarios del Kinect SDK en su propio sistema de coordenadas. Crea una instancia

de un avatar transparente (por defecto) para cada usuario, estos avatares pueden tener sus *colliders* activados, permitiendo así a los usuarios interactuar con elementos virtuales a través del simulador de física de Unity;

**2. Pantallas o superficies CAVE:** Son planos invisibles de Unity que representan pantallas planas (como televisores o pantallas de computadora) o la posición, orientación y tamaño de las superficies de proyección de la CAVE, y sirven como objetivos rectangulares de referencia para las cámaras de visualización del usuario;

**3. Cámaras de visualización de usuario:** cámaras Unity posicionadas en la cabeza del usuario, la posición de la cabeza la proporciona el objeto CAVE Kinect V2. En el caso de múltiples usuarios, se elige la persona más cercana al sensor. Se crea una cámara por superficie / pantalla CAVE, cada una de ellas con su eje principal perpendicular a esa superficie / pantalla. Los valores de la matriz de proyección de la cámara se calculan en tiempo real para garantizar la coincidencia del tronco de la cámara con los bordes de la superficie / pantalla del objetivo, lo que significa que cada imagen de la cámara está enmarcada exactamente por el rectángulo de la superficie / pantalla. Dependiendo del objetivo de la cámara (pantalla o proyector), las vistas de cada cámara se envían directamente a la pantalla o se giran para renderizar texturas y se envían al proyector CAVE correspondiente para una mayor deformación;

**4. Proyectores CAVE:** cámaras Unity que reciben las imágenes de las cámaras de vista de usuario y las deforman para lograr un mapeo correcto en las superficies de proyección deseadas del mundo real. Esta deformación se realiza mapeando cada una de las 4 esquinas de la imagen a nuevas ubicaciones de ventana gráfica que corresponderán a la esquina de la pared de proyección real. Esto posibilita configuraciones donde los proyectores están mal alineados con las paredes, como cuando están inclinados o cuando se proyectan en más de una pared (habitual cuando las relaciones de aspecto del proyector y la pared son diferentes). La proyección fuera de los nuevos límites de la imagen es negra, lo que elimina cualquier proyección superpuesta entre superficies adyacentes. Un proyector puede recibir múltiples cámaras de visualización de usuario al mismo tiempo y aplicar una máscara de deformación diferente a cada una, esto permite que un proyector se muestre en varias superficies a la vez. Este proceso de deformación elimina la carga de la calibración física del proyector y se convierte en una calibración de software más sencilla.

Se realizó una implementación práctica del software KAVE en un CAVE de bajo costo de configuración estándar, tres paredes y piso. Dos paredes a los lados y una al frente, que con ángulos de 90 grados entre ellas y con el piso. Las paredes tienen 2,8 m de ancho por 2,2 m de alto y el piso tiene 2,8 m de ancho por 2 m de largo, cubriendo el área hasta 2 metros desde la pared frontal. Cuatro proyectores Optoma GT1080 (Optoma, New Taipei, Taiwán), con una resolución de imagen de 1080p y una relación de proyección de 0,5: 1, ofrecen una proyección frontal monoscópica sobre las cuatro superficies. El sistema proporciona un FOV horizontal de 270° y un FOV vertical de 128° en su punto central y tiene una resolución de 1120 x 880 píxeles por pared con una densidad de píxeles de 4 píxeles por cm. Un Kinect v2 colocado sobre la pared frontal e inclinado con un ángulo hacia abajo de 30° proporciona seguimiento de la cabeza y estimación de la postura del usuario, que consta de 25 articulaciones. Una sola computadora con un procesador Quad-Core 3.4GHZ, 8GB de RAM y tarjeta gráfica Radeon RX 580 de 8GB, ejecuta el sistema. Para mejorar la legibilidad del documento, la “CAVE de bajo costo impulsada por el software KAVE” se denomina simplemente KAVE en las siguientes secciones.

#### *Procedimiento*

Para determinar la sensación de presencia que podría obtenerse utilizando el software KAVE, comparamos las experiencias de una muestra de adultos sanos después de interactuar con una implementación de bajo costo de nuestra KAVE con las obtenidas después de interactuar con un *Head Mounted Display* (HMD) de última generación, el HTC Vive.

Se utilizó un entorno virtual que consiste en un pasillo de supermercado con dos estantes de 4m de largo por 2m de alto (6 estantes) llenos de 72 tipos diferentes de refrescos y sus correspondientes etiquetas de precio. La distancia entre estantes fue de 2,5 m para que los usuarios puedan deambular lateralmente. Se agregó un área azul semitransparente de 1,5 m por 1 m con dos huellas para representar el área donde el usuario podía moverse libremente sin perder el seguimiento de Kinect v2, como se puede ver en la Ilustración 19. Se utilizó un joystick analógico para navegar por el pasillo del supermercado.



*Ilustración 19: El entorno virtual utilizado en el estudio.*

El estudio fue diseñado como un experimento de medidas repetidas de dos condiciones en el que cada participante hizo el experimento una vez en cada condición, el orden en el que los participantes hicieron las condiciones fue compensado.

Al inicio de la primera sesión, los participantes fueron informados sobre el procedimiento, otorgaron consentimiento informado para participar en el estudio y respondieron un breve cuestionario sobre su edad, sexo, nivel educativo y experiencia en videojuegos, este último en una escala de 10 puntos. Escala Likert. Antes del experimento, los participantes tenían 5 minutos de interacción libre con una versión simple del entorno virtual, donde los refrescos y las etiquetas de precio se eliminaron de los estantes. Después de este tiempo de adaptación, comenzó el experimento y se pidió a los participantes que encontraran el precio de diferentes artículos en el entorno completo, que tenía los estantes llenos de bebidas y las etiquetas de precios. Específicamente, a los participantes se les dio un nombre del artículo, una breve descripción y se les preguntó sobre su precio. Una vez que se respondió al precio correcto, se nombró un nuevo artículo, hasta un máximo de 5 artículos o cuando habían transcurrido 5 minutos.

Después de cada condición experimental, los participantes respondieron su sensación de presencia en el cuestionario Slater-Usch-Steed original (SUS), un breve cuestionario con tres preguntas calificadas en una escala Likert de 7 puntos y una versión modificada del Cuestionario de presencia (MPQ), un cuestionario de 21 ítems, también calificado en una escala Likert de 7 puntos, como se describió anteriormente. Por último, se pidió a los participantes que calificaran el ambiente virtual en una escala Likert de 7 puntos.

### Participantes

Participantes sanos mayores de 18 años sin deterioro motor o cognitivo fueron reclutados para este estudio entre cuerpo docente y estudiantil de la Universidad de Madeira. Se reclutó a 31 participantes, de los cuales 30 completaron el estudio. Todos dieron su consentimiento informado antes de participar en el estudio.

### Resultados

Al informar los niveles de mareo, los usuarios se sintieron significativamente menos mareados en el KAVE (mediana = 1) que en el Vive (mediana = 2),  $z = -2.614$ ,  $p < 0.05$ ,  $r = -.48$ . Los niveles de presencia de SUS fueron 2 puntos más bajos en el KAVE (mediana = 14) que en el Vive (mediana = 16). Se encontró que esta diferencia era significativa,  $z = -3.221$ ,  $p < 0.05$ ,  $r = -.59$ . Los niveles del cuestionario de presencia en el KAVE (mediana = 100) no difirieron significativamente de los del Vive (mediana = 103),  $z = -.325$ , ns. Lo mismo ocurrió con todos sus componentes.

## 2- Hacia la realidad virtual emocionalmente adaptativa para aplicaciones de salud mental

El marco propuesto para un entorno de “realidad virtual afectivo” consta de tres módulos (*estimación del estado afectivo en tiempo real, cálculo del desencadenante de eventos y escenario de procedimiento virtual*) en un ciclo cerrado (Ilustración 20). El módulo de *Estimación del estado afectivo en tiempo real* abarca la adquisición de señales fisiológicas (por ejemplo, frecuencia cardíaca) de los sensores y su procesamiento para la clasificación del estado afectivo. El módulo *cálculo del desencadenante de eventos* utiliza la estimación del estado afectivo para definir un conjunto de reglas (triggers) que establecen los tiempos y parámetros de cuándo y cómo se debe modificar el contenido de VR. El módulo de *escenario de procedimiento virtual* responde a los desencadenantes y modifica el entorno virtual con una amplia variedad de contenido generado de manera procedimental. Por tanto, el contenido es diferente para cada usuario y cada ejecución de la aplicación. Finalmente, el bucle de biorretroalimentación se habilita presentando el contenido de realidad virtual resultante del estado afectivo del usuario. Así, el ciclo de biorretroalimentación puede a su vez influir en el estado del usuario, afectando las variables fisiológicas que se están monitoreando, dando como resultado un nuevo ciclo con nuevos cambios en el entorno virtual. A través de este abordaje, la experiencia se desarrolla dinámicamente por la interacción del usuario con el entorno a través de la interpretación de señales fisiológicas, y no por escenarios y condiciones predefinidas.

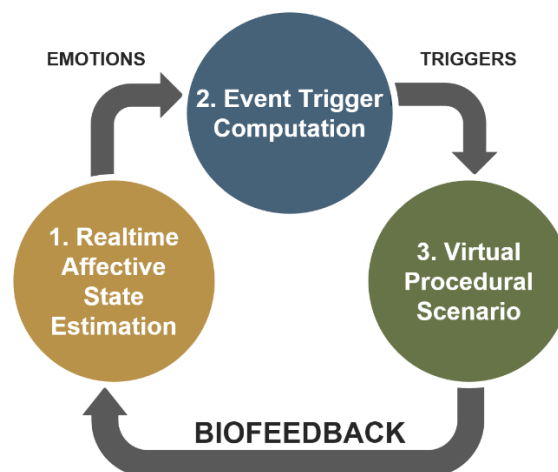


Ilustración 20: Nuestro marco conceptual para la arquitectura de realidad virtual emocionalmente adaptativa.

The *Emotional Labyrinth* es la primera aplicación que desarrollamos para demostrar el potencial de la arquitectura descrita anteriormente. Consiste en un laberinto 3D generado en tiempo real cuya forma y características se adaptan dinámicamente a los estados emocionales del usuario. El usuario explora el laberinto mientras los elementos visuales y auditivos se generan procedimentalmente de acuerdo con cuatro estados emocionales (Ira, Miedo, Alegría, Tristeza) y se registran los cambios en las señales cardiorrespiratorias, electrodérmicas y electromiográficas. Estas cuatro emociones se seleccionaron porque han sido ampliamente operacionalizadas y estudiadas en numerosos experimentos psicológicos, y se consideran necesarias para la regulación de mecanismos mentales básicos. El objetivo de la aplicación es exponer al participante a contenido de realidad virtual audiovisual para inducir estados emocionales específicos, que a su vez desencadenan la generación de nuevos estímulos emocionales, en un circuito cerrado. La hipótesis subyacente es que, al visualizar sus estados afectivos, los usuarios pueden desarrollar nuevas estrategias para reconocer y regular sus estados emocionales.

### *Mecánica*

Al comienzo de la experiencia, el usuario se coloca en el punto de partida de un laberinto. El objetivo es moverse por el laberinto hasta llegar a un punto de salida. Durante la exploración, el laberinto genera estímulos audiovisuales específicamente diseñados para afectar el estado emocional del usuario. Estos estímulos incluyen imágenes, música y cambios en el entorno, como fuego (ira), flores en flor (alegría), lluvia (tristeza) y oscuridad (miedo). La experiencia termina cuando el usuario llega al punto de salida del laberinto. El concepto principal detrás de los estímulos es que, para entrenar la autorregulación, estos deben ser capaces de desencadenar cambios controlados en el estado afectivo de sus usuarios. La aplicación se puede ejecutar en el modo "adaptativo" o en el modo "no adaptativo". En la modalidad no adaptativa, la complejidad del laberinto la determina el experimentador, así como la presencia y tipo de estímulos audiovisuales afectivos. En la modalidad adaptativa, los estímulos generados están directamente determinados por el estado afectivo medido del usuario y se utilizan también para representar este estado. Por tanto, la versión adaptativa del Laberinto requiere que el usuario impulse cambios en el entorno virtual mediante un esfuerzo de autorregulación de su propio estado afectivo.

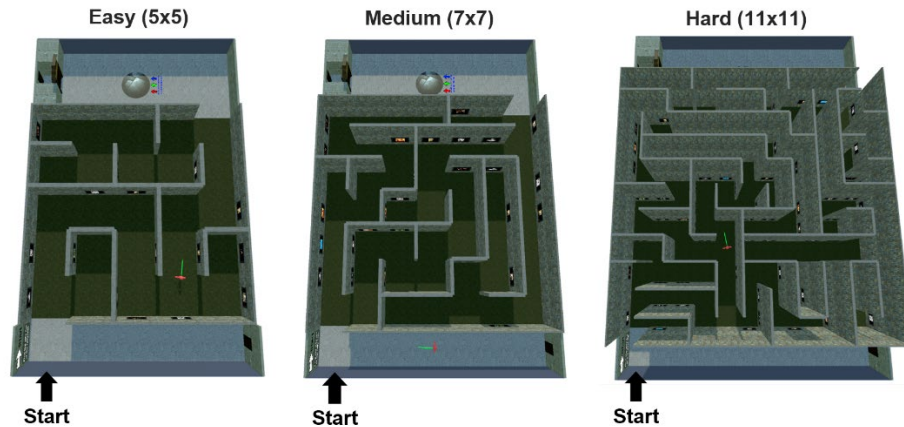
### *Escenario de procedimiento virtual*

En el Laberinto Emocional, tanto el laberinto como los estímulos visuales y auditivos se construyen y modifican procedimentalmente.

### *Generación de laberinto procedimental*

El laberinto es el elemento más grande del entorno virtual. Es la estructura por la que navega el usuario y aloja todos los objetos del escenario. Decidimos implementar un algoritmo llamado búsqueda en profundidad que se basa en el método de retroceso recursivo. Este algoritmo proporciona una alta variabilidad de construcción y un tiempo de generación rápido, características esenciales para sistemas en tiempo real como el Laberinto Emocional. El algoritmo original usa el número de columnas y filas como parámetros de entrada para generar el laberinto 2D; ampliamos el algoritmo para incluir características adicionales como la altura de las paredes y el ancho de los pasajes. Estos parámetros definen la forma y la dificultad del laberinto. Debido a la pseudoaleatoriedad aplicada a cada paso del procedimiento de construcción, incluso cuando se utilizan los mismos parámetros, el laberinto resultante siempre será diferente. Esto evita un efecto de aprendizaje y asegura altos niveles de rejugabilidad, un requisito para un sistema como este diseñado para ser utilizado repetidamente por el mismo usuario. El laberinto se construye con objetos prefabricados: una pared y una loseta, que se combinan algorítmicamente para generar laberintos largos, cortos, estrechos, anchos, altos o pequeños, conservando siempre la apariencia de continuidad entre los objetos del edificio (Ilustración 21).





*Ilustración 21: Vista superior de los laberintos creados en tiempo de ejecución utilizando el algoritmo de búsqueda en profundidad para diferentes complejidades.*

#### Estímulos audiovisuales procedimentales y metáforas afectivas

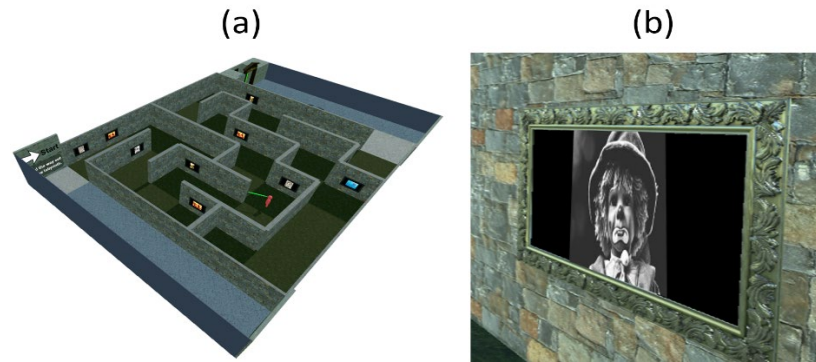
Los elementos audiovisuales del Laberinto Emocional fueron diseñados con estímulos cuidadosamente elegidos para representar e inducir estados emocionales. Se utilizan tres tipos de estímulos: imágenes, música de fondo y metáforas visuales de las emociones:

a) **Imágenes:** Las imágenes se muestran como cuadros enmarcados que cuelgan de las paredes del laberinto. Estos cambian dinámicamente según la emoción pretendida. Las imágenes fueron seleccionadas de la base de datos del Sistema Internacional de Imágenes Afectivas (IAPS), que consiste en un vasto repositorio de imágenes que han sido calificadas por valencia y excitación; estas imágenes se han evaluado como capaces de provocar las emociones objetivo. Estos estímulos han sido ampliamente estudiados y validados utilizando un protocolo similar al utilizado en este experimento, y también se han utilizado con poblaciones clínicas como el trastorno bipolar, la anorexia o el trastorno límite de la personalidad. Se seleccionaron un total de 54 imágenes por su capacidad para provocar ira (10), miedo (15), alegría (15) y tristeza (14). Las pinturas se colocan en las paredes de manera procedimental después de crear el laberinto (Ilustración 22). Por tanto, la ubicación de los fotogramas en cada ejecución es diferente.

(b) **Música de fondo:** Las bandas sonoras se seleccionaron de la base de datos de Sonidos Digitales Afectivos Internacionales (IADS), que incluye estímulos sonoros evocadores emocionales etiquetados validados. Seleccionamos 51 estímulos sonoros relacionados con la ira (11), el miedo (10), la alegría (20) y la tristeza (10). Cada vez que se activa un disparador, se elige al azar una pista de la lista de la emoción correspondiente.

#### Medidas

Se recopiló información demográfica de los participantes, incluido el sexo y la edad. Las medidas incluyeron escalas visuales analógicas (EVA) para cuantificar la intensidad de emociones específicas en escalas Likert de 9 puntos (miedo, alegría, tristeza, ira); Se utilizó el Self Assessment Manikin (SAM) para cuantificar las propiedades del estado de ánimo general sentido (excitación, agrado, dominancia). Específicamente, los ítems de EVA se redactaron de la siguiente manera: "Por favor, seleccione un número para indicar cuánto siente la emoción correspondiente en este momento" (con las cuatro emociones), mientras que el ítem de SAM se expresó como tal: "Por favor, usando las siguientes imágenes como referencia, seleccione los números para calificar su emoción actual", con las imágenes SAM Likert a continuación.



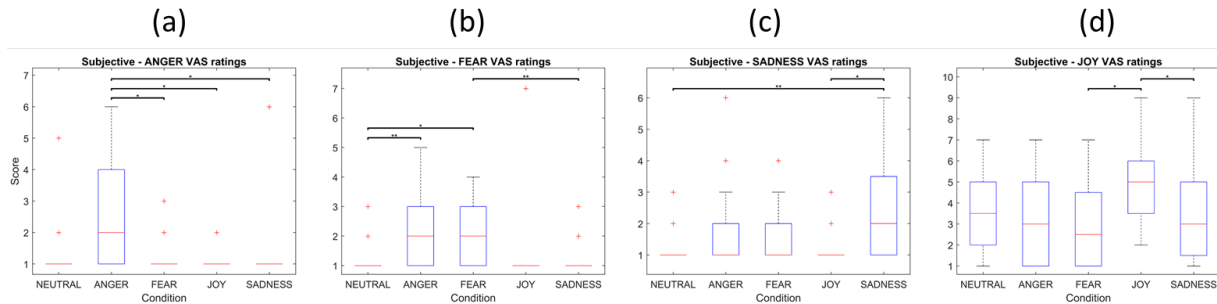
*Ilustración 22: Imágenes emocionalmente evocadoras en las paredes del laberinto (a) presentadas como pinturas enmarcadas (b). Con fines ilustrativos, las imágenes de IAPS han sido sustituidas por otras visualmente similares con una licencia Creative Commons.*

## Resultados

### Escalas analógicas visuales (EVA)

Las cuatro metáforas audiovisuales procedimentales Ira, Miedo, Alegría y Tristeza más una versión Neutral del laberinto emocional se contrastaron con las respuestas subjetivas de los participantes a esas emociones (Ilustración 23). La prueba de Friedman reveló un efecto de condición significativo para las calificaciones subjetivas de ira ( $\chi^2(4) = 25.53$ ,  $p < 0.001$ ), miedo ( $\chi^2(4) = 32.12$ ,  $p < 0.001$ ), tristeza ( $\chi^2(4) = 25.84$ ,  $p < 0.001$ ) y alegría ( $\chi^2(4) = 17.39$ ,  $p = 0.002$ ), y todas las metáforas procedimentales siempre provocaron las respuestas más altas de la emoción pretendida. La especificidad más robusta en las respuestas subjetivas fue inducida por la metáfora de la ira, con la calificación de Ira (Mdn = 2, IQR = 3) siendo significativamente más alta para esta condición que para el Miedo ( $Z = 2.83$ , rango = 55,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.46$ ), Alegría ( $Z = -2.83$ , rango = 0,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.45$ ) y Tristeza ( $Z = 2.34$ , rango = 59,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.37$ ).

La calificación subjetiva del miedo reveló que las metáforas de la ira y el miedo inducían respuestas de miedo más altas (Mdn = 2, IQR = 2) que las otras condiciones (Mdn = 1, IQR = 0). Sin embargo, la condición de Miedo reveló diferencias estadísticamente significativas tanto con Neutral ( $Z = -2.85$ , rango = 0,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.45$ ) como con Tristeza ( $Z = -2.99$ , rango = 0,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.47$ ), mientras que la condición de Ira solo con Neutral ( $Z = -3.13$ , rango = 0,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.51$ ). La condición de Tristeza obtuvo calificaciones más altas de tristeza (Mdn = 2, IQR = 2.5) que Alegría (Mdn = 1, IQR = 0;  $Z = -2.99$ , rango = 3,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.47$ ) y Neutral (Mdn = 1, IQR = 0;  $Z = -3.21$ , rango = 0,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.51$ ). Finalmente, todas las condiciones provocaron algún grado de alegría (Neutral Mdn = 3.5, IQR = 3; Ira Mdn = 3, IQR = 4; Miedo Mdn = 2.5, IQR = 3.5; Alegría Mdn = 5, IQR = 2.5; Tristeza Mdn = 3, IQR = 3.5), siendo la metáfora Alegría la que más suscitó. Las calificaciones de alegría fueron más altas en la condición de alegría en comparación con el miedo ( $Z = -2.87$ , rango = 13,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.45$ ) y tristeza ( $Z = -3.18$ , rango = 11,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.50$ ).



*Ilustración 23: Diagramas de caja que representan las calificaciones subjetivas de los cuatro estados emocionales (a = ira, b = miedo, c = tristeza, d = alegría), es decir, valores medianos de cuánto sintieron los participantes la emoción correspondiente. Dentro de cada diagrama de caja, en el eje x indica las cinco condiciones del estudio, es decir, las cuatro metáforas emocionales a las que los participantes han estado expuestos y la condición neutral. \* indica  $p < 0.05$  y \*\*  $p < 0.01$*

### Self Assessment Manikin (SAM)

SAM se utilizó para evaluar las respuestas de placer, dominio y excitación de los participantes a las diferentes metáforas emocionales procedimentales. Las calificaciones SAM-Placer indicaron que el laberinto emocional, en general, fue una experiencia placentera, logrando las calificaciones subjetivas más altas reportadas (Neutral Mdn = 6, IQR = 2.5; Ira Mdn = 4, IQR = 3.3; Miedo Mdn = 4.5, IQR = 4.5; Alegría Mdn = 6.5, IQR = 2; Tristeza Mdn = 3, IQR = 3.5). En esta dimensión hubo un claro efecto de condición ( $\chi^2(4) = 53.13$ ,  $p < 0.001$ ), siendo todas las condiciones más bajas que la neutral [Ira ( $Z = 3.39$ , rango = 133,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.55$ ), Miedo ( $Z = 3.14$ , rango = 127,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.50$ ) y Tristeza ( $Z = 3.67$ , rango = 185,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.59$ )] y Alegría significativamente más alta que Tristeza ( $Z = 3.28$ , rango = 145,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.58$ ) e Ira ( $Z = 2.82$ , rango = 150,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.46$ ). Las calificaciones de SAM-Arousal revelaron un fuerte efecto de condición ( $\chi^2(4) = 48.15$ ,  $p < 0.001$ ), con una sola diferencia en pares en la Ira (Mdn = 4.5, IQR = 2) siendo mayor que para Neutral (Mdn = 3, IQR = 1;  $Z = -3.27$ , rango = 3,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.53$ ). Finalmente, las calificaciones de SAM-Dominancia revelaron un efecto de condición ( $\chi^2(4) = 66.59$ ,  $p < 0.001$ ), pero no se encontraron diferencias por pares, siendo las respuestas a todas las condiciones entre 2-3 puntos (Neutral Mdn = 2.5, IQR = 2.5; Ira Mdn = 3, IQR = 3; Miedo Mdn = 3, IQR = 3; Alegría Mdn = 3, IQR = 3.5; Tristeza Mdn = 2, IQR = 2.5).

Estos resultados indican que este sistema tiene la capacidad de inducir estados emocionales a través de entornos virtuales autogenerados, con el consecuente potencial como herramienta de entrenamiento de la autorregulación emocional, componente esencial para una buena salud mental.