

Desarrollo de un sistema inmersivo con retroalimentación háptica para rehabilitación

Villanueva, A. C.^a, Angulo-Sherman, I. N.^a, Ubeda, A.^{b,*}, García, G. J.^b

^aDepartamento de Ingeniería Biomédica, Vicerrectoría de Ciencias de la Salud, Universidad de Monterrey, Av. Ignacio Morones Prieto 4500, 66238 San Pedro Garza García, Nuevo León, México.

^bGrupo Human Robotics, Universidad de Alicante, Ctra. de San Vicente del Raspeig S/N, 03690, San Vicente del Raspeig, España.

Resumen

La rehabilitación del miembro superior enfrenta desafíos como la baja adherencia terapéutica y una limitada retroalimentación sensorial, debido a esto, se desarrolló un sistema inmersivo basado en realidad aumentada con retroalimentación háptica para apoyar procesos de neurorrehabilitación. El sistema integra el visor *Meta Quest 3* con los dispositivos hápticos *TactGlove* y *Tactosy for Hands* de *bHaptics*, proporcionando retroalimentación multimodal visual, auditiva y háptica sincronizada con eventos del entorno virtual. La mecánica del *serious game* se basa en el seguimiento de trayectorias tridimensionales personalizables implementadas mediante *Splines* en Unity, con parámetros ajustables de tolerancia y progresión automática de dificultad. Las métricas de desempeño y los parámetros terapéuticos se almacenan en la nube mediante *Cloud Firestore* de *Firebase*, habilitando la conectividad con una aplicación en Python utilizando el *framework* *KivyMD* para su gestión, visualización y administración de sesiones. Finalmente, se realizaron pruebas en usuarios sanos para comprobar el funcionamiento del sistema, evaluando su usabilidad y motivación, obteniendo resultados satisfactorios.

Palabras clave: Realidad aumentada, Realidad virtual, Interfaces hápticas, Interacción multimodal, Sistemas biomédicos.

Development of an immersive system with haptic feedback for rehabilitation

Abstract

Upper limb rehabilitation faces challenges such as low therapeutic adherence and limited sensory feedback; therefore, an immersive system based on augmented reality with haptic feedback was developed to support neurorehabilitation processes. The system integrates the *Meta Quest 3* headset with the *TactGlove* and *Tactosy for Hands* devices of *bHaptics*, providing multi-modal synchronized visual, auditory and haptic feedback with events in the virtual environment. The *serious game* mechanics are based on tracking customizable three-dimensional trajectories implemented using *Splines* in Unity, with adjustable tolerance parameters and automatic difficulty progression. Performance metrics and therapeutic parameters are stored in the cloud using *Firebase Cloud Firestore*, allowing connectivity with a Python-based application developed with the *KivyMD* framework for management, visualization and session administration. Finally, tests were conducted with healthy users to verify the system's functionality, evaluating its usability and motivational impact with satisfactory results.

Keywords: Augmented reality, Virtual Reality, Haptic interfaces, Multimodal interaction, Biomedical systems

1. Introducción

En la actualidad los programas tradicionales de rehabilitación enfrentan desafíos significativos para brindar terapias efectivas, personalizadas y motivadoras para sus usuarios. Entre los principales problemas identificados se encuentra una baja adherencia a los programas de rehabilitación, una larga duración de los mismos, así como una limitada retroalimentación sensorial durante los ejercicios (Islam, 2024). Esto se traduce en proce-

sos de recuperación más largos, menos eficientes y, en muchos casos, abandonos prematuros del tratamiento.

La neurorrehabilitación es un enfoque terapéutico orientado a restablecer funciones cerebrales mediante la estimulación de la neuroplasticidad. Se trata de un proceso multidisciplinario que busca optimizar la recuperación neurológica, funcional y motriz a través de intervenciones planificadas, desafiantes y repetitivas. Sin embargo, al ser un proceso prolongado que in-

*Autor para correspondencia: andres.ubeda@ua.es

volucra movimientos repetitivos, puede generar fatiga y desmotivación en los pacientes (Perez and Diaz Leon, 2025).

Debido a esto, se requieren estrategias terapéuticas que mejoren la experiencia del usuario, incrementen su compromiso con las terapias y les proporcionen retroalimentación en tiempo real sobre la calidad y precisión de sus movimientos, optimizando la eficacia del proceso de rehabilitación (Islam, 2024). La realidad mixta y la retroalimentación háptica ofrecen una oportunidad única para abordar esta problemática desde una perspectiva innovadora. Estos sistemas permiten generar entornos inmersivos y dinámicos donde el usuario puede interactuar de manera natural con estímulos virtuales, mientras experimenta sensaciones táctiles realistas que refuerzan la implicación en la tarea.

El presente proyecto propone el desarrollo de un Sistema Inmersivo de Rehabilitación con Retroalimentación Háptica SIR-HAPT compuesto por un *serious game* (SG) de realidad aumentada en *Meta Quest 3* utilizando los dispositivos hápticos *Tactosy for Hands* y *TactGlove* de *bHaptics* como herramienta terapéutica en rehabilitación del miembro superior. Este sistema permitirá adaptar la experiencia del usuario según su nivel de avance, y requerimientos específicos de tratamiento.

2. Tecnologías inmersivas y retroalimentación háptica en rehabilitación

Las extremidades superiores son esenciales para realizar actividades cotidianas; por ello, en pacientes que presentan disfunción motriz en ellas, la rehabilitación es fundamental para lograr independencia funcional y mejorar su calidad de vida (Bae and Park, 2023). Los métodos tradicionales constituyen las bases para la rehabilitación, sin embargo, en la actualidad los avances tecnológicos han introducido nuevas innovaciones dentro de esta área. Entre ellas se encuentra la realidad virtual y la realidad aumentada con diferentes niveles de inmersión, las cuales se han ido integrando en programas de rehabilitación para ofrecer experiencias atractivas e inmersivas a través de *serious games* (Ong et al., 2021).

2.1. Realidad aumentada en rehabilitación

La realidad aumentada (RA) se deriva de la realidad virtual y ha surgido como una tecnología que permite generar elementos de información digital en el entorno físico de una persona, fusionando elementos virtuales con el entorno real (Luciani et al., 2025).

En el contexto de la rehabilitación, la RA es una herramienta prometedora debido a que permite intervenciones más atractivas y efectivas mediante experiencias interactivas y estimulantes, mejorando la motivación del paciente y su adherencia al programa (Islam, 2024). Así mismo, posee ventajas sobre la realidad virtual ya que permite generar entornos seguros que imitan situaciones de la vida real, complementando la realidad sin reemplazarla, lo que le permite al paciente una percepción de realidad del entorno y una alta sensación de encarnación. De esta manera, la RA facilita el entrenamiento de habilidades funcionales y su transferencia a entornos reales, ofreciendo retroalimentación visual y asistencia a los pacientes en la rehabilitación del miembro superior (Luciani et al., 2025).

2.2. Retroalimentación háptica en rehabilitación

La retroalimentación háptica es una interfaz que permite una comunicación bilateral en la interacción humano computadora, mejorando la presencia y la interacción de los sistemas inmersivos. El mecanismo más comúnmente utilizado es la vibración mecánica, la cual estimula receptores generando la sensación háptica en la piel (Shi and Shen, 2024). La retroalimentación háptica ha sido utilizada para facilitar tareas de movimiento de manos, mejorando la atención a la tarea y ofreciendo orientación en tiempo real sobre su desempeño en los ejercicios, mejorando y haciendo más eficiente los procesos de rehabilitación (Bae and Park, 2023; Islam, 2024). Asimismo, se ha utilizado para optimizar la transferencia de habilidades al simular sensaciones físicas al interactuar con objetos virtuales, lo que facilita el desarrollo de habilidades motoras y cognitivas (Islam, 2024).

En conjunto con la RA, es una herramienta que permite simular escenarios de la vida real ofreciendo una experiencia de rehabilitación más dinámica y atractiva, promoviendo el aprendizaje motor y la recuperación funcional.

2.3. Gamificación y *serious games* en rehabilitación

La gamificación se define como el uso de elementos de diseño de juegos en contextos no lúdicos y es una técnica que se ha utilizado para impulsar la motivación, de esta técnica surgen los *serious games*, una tecnología que proporciona experiencias de aprendizaje por medio de juegos. En rehabilitación, tienen como objetivo generar un aprendizaje significativo para el usuario mientras participa en actividades lúdicas, manteniendo la motivación y compromiso del paciente durante su proceso de rehabilitación (Perez and Diaz Leon, 2025).

El uso de *serious games* en rehabilitación ofrece una alternativa para abordar limitaciones de los métodos tradicionales, especialmente la baja motivación y adherencia del paciente. Se ha demostrado que aumentan la motivación y el compromiso gracias a características inherentes como elementos de diversión y competitividad (Ong et al., 2021). Además, permiten cuantificar el proceso de rehabilitación a través de métricas que facilitan el seguimiento del progreso terapéutico (Perez and Diaz Leon, 2025).

2.3.1. Interfaz de usuario y experiencia de usuario

El diseño de la interfaz debe estar centrado en el usuario, adaptándose a sus características cognitivas, edad y necesidades, promoviendo la adherencia, sensación de logro y motivación en las sesiones de terapia (Bai, 2025). La integración de interfaces naturales y multimodales (gestos, seguimiento de movimiento y retroalimentación háptica/visual) permite mejorar la interacción en los *serious games*.

3. Descripción del framework SIR-HAPT

3.1. Arquitectura general del sistema

SIR-HAPT (Sistema Inmersivo de Rehabilitación con Retroalimentación Háptica) se fundamenta en una arquitectura que integra tres componentes principales: un *serious game* en RA, un módulo de hardware especializado para inmersión y retroalimentación háptica, y un sistema de gestión terapéutica

basado en la nube (Figura 1). El diseño parte de dos perfiles de usuario (paciente y terapeuta) cuyas necesidades determinan el flujo de información y los niveles de acceso dentro del sistema.

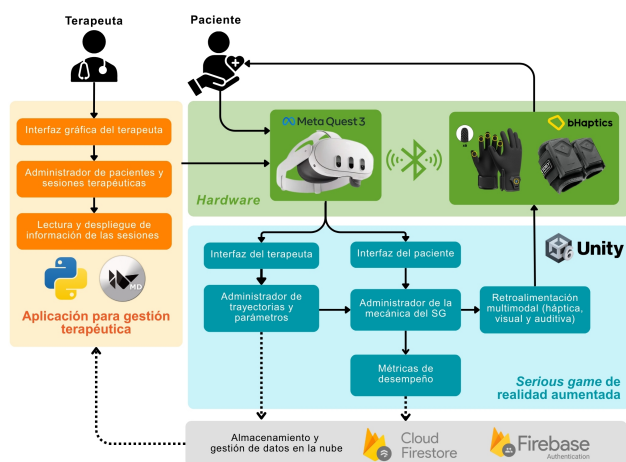


Figura 1: Diagrama de los módulos de la arquitectura de SIR-HAPT

El serious game se compone de una jerarquía de módulos funcionales: un administrador de la mecánica del juego que gestiona la lógica central, reglas y estados; un editor de trayectorias tridimensionales personalizables; y un administrador de parámetros que permite ajustar la dificultad según las capacidades motoras de cada paciente.

El módulo de hardware integra el visor *Meta Quest 3* y los dispositivos hápticos *TactGlove* y *Tactosy for Hands* de *bHaptics*. El *Meta Quest 3* es un *HMD standalone* (Helmet Mounted Display) con cámaras frontales de alta resolución para mapeo espacial y seguimiento de manos basado en visión, sin requerir conexión a una computadora externa. Los dispositivos hápticos, incorporados mediante el SDK (Software Development Kit) oficial de *bHaptics*, cuentan con seis actuadores de vibración en palma y dedos (*TactGlove*) y seis actuadores en el antebrazo (*Tactosy for Hands*). La comunicación entre el entorno virtual y el hardware es bidireccional: el *Meta Quest 3* proporciona el rastreo de movimiento para controlar los objetos virtuales, mientras que los dispositivos hápticos emiten retroalimentación táctil sincronizada con eventos específicos del juego.

El sistema de retroalimentación integra tres canales sensoriales: visual, mediante cambios de color en tiempo real; auditivo, con sonidos de logro y alerta; y háptico, a través de vibraciones en los actuadores de los dispositivos de *bHaptics*.

La capa de almacenamiento se implementó con *Firebase*, seleccionado por su capacidad de sincronización en tiempo real y su integración nativa con *Unity*. Se utilizan dos servicios: *Firebase Authentication* para la gestión segura de credenciales, y *Cloud Firestore* para el almacenamiento estructurado de información de pacientes, configuraciones de sesión, parámetros del juego y métricas de desempeño. El sistema de gestión terapéutica se comunica con esta base de datos, permitiendo al terapeuta administrar pacientes, programar sesiones y visualizar el historial de métricas desde un entorno separado al serious game. Esta separación de responsabilidades entre módulos garantiza la escalabilidad del sistema y su adaptabilidad a distintos contextos clínicos.

3.2. Diseño del serious game en Unity

El serious game se diseñó siguiendo el marco MDA (*Mechanics, Dynamics, Aesthetics*), que estructura el proceso de desarrollo en tres niveles interdependientes. En contextos terapéuticos, el diseño parte de la estética, es decir, las respuestas emocionales que el sistema debe evocar en el paciente, para derivar de ella las mecánicas y dinámicas. Este enfoque garantiza que cada decisión esté alineada con los objetivos clínicos (Perez and Diaz Leon, 2025).

La estética objetivo se definió en torno a cuatro respuestas emocionales: motivación, generada mediante sistemas de recompensa visual y progresión gradual; sensación de logro, reforzada por retroalimentación positiva al completar cada nivel; diversión, implementada a través de una temática de navegación espacial que transforma el ejercicio repetitivo en una experiencia lúdica; y competitividad, fomentada mediante el registro histórico de desempeño que permite al paciente comparar su progreso entre sesiones.

3.2.1. Mecánica central

A partir de la estética definida, se diseñó la mecánica central: el paciente controla una nave espacial mediante el movimiento natural de su mano, rastreada por el sistema de *hand tracking* del visor *Meta Quest 3*. La nave debe recorrer una trayectoria tridimensional predefinida por el terapeuta hasta alcanzar un planeta destino. La trayectoria está delimitada por un tubo virtual cuyo radio define la zona de tolerancia del ejercicio: un radio menor exige mayor precisión motora y corresponde a un nivel de mayor dificultad, mientras que un radio mayor permite mayor margen de error. Al iniciar el juego, se ingresa al menú del terapeuta (Figura 3.a) en donde debe seleccionar el paciente y una trayectoria previamente definida o diseñar una nueva según los objetivos clínicos del paciente (Figura 3.c).

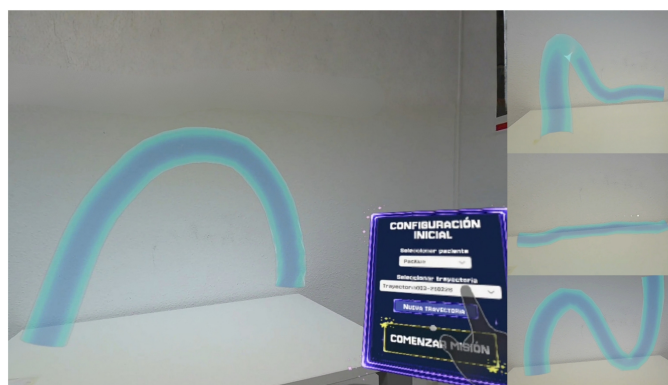


Figura 2: Visualización de trayectorias tridimensionales en realidad aumentada, a la derecha diferentes trayectorias predefinidas por el usuario

La mecánica de progresión opera sobre el radio del tubo: el ejercicio inicia con el radio máximo y, conforme el paciente completa la trayectoria con desempeño satisfactorio, el radio se reduce incrementalmente hasta alcanzar el mínimo de 5 cm, que representa la exigencia máxima del sistema. Y se puede repetir la tarea cuantas veces el terapeuta considere necesario. En la Figura 3.e se puede observar diferentes ejemplos de trayectorias

junto con la nave, que indica el punto de partida, y el planeta destino.

La dinámica del juego incorpora mecanismos de adaptación en tiempo real para evitar la frustración excesiva sin eliminar el reto terapéutico. Ante tres errores consecutivos en un mismo nivel, el radio se amplía automáticamente, reduciendo la exigencia. Si la nave permanece fuera de la trayectoria por más de diez segundos, su posición se reinicia al punto de inicio del nivel. Una capa de enseñanza, implementada como ventana semi-transparente, se activa durante los primeros intentos o cuando el sistema detecta dificultades persistentes, orientando al paciente sobre la ejecución correcta del movimiento.

3.2.2. Implementación del serious game en Unity

El serious game se desarrolló en Unity 6.0 configurado para su ejecución en el visor *Meta Quest 3* bajo sistema Android 14.0. Para habilitar la modalidad de realidad aumentada se integraron los módulos de seguimiento de manos, visualización del entorno físico mediante *passthrough* y comprensión espacial del entorno proporcionados por el *SDK* oficial de *Meta XR*. Esta configuración permite superponer elementos virtuales sobre el entorno real del paciente, manteniendo coherencia espacial y seguimiento en tiempo real.

Las trayectorias se implementaron con el sistema de *Splines* de Unity, que genera curvas suaves a partir de puntos de control interpolados. A lo largo de cada trayectoria se genera un tubo visual cuyo radio puede modificarse para ajustar la tolerancia del ejercicio, siendo este el parámetro principal de dificultad del sistema.

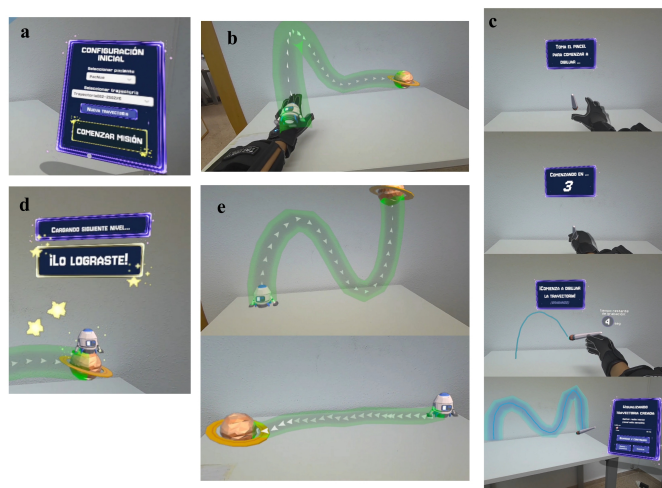


Figura 3: Componentes de SIR-HAPT. a. Interfaz inicial del terapeuta en dónde selecciona al paciente y su trayectoria de una predefinida o dibuja una nueva. b. Interfaz de usuario al realizar la tarea, seguimiento manos junto con la nave espacial. c. Flujo de trabajo para dibujar una nueva trayectoria. d. Interfaz de nivel completado. e. Diferentes trayectorias desde la interfaz del paciente

Para garantizar la correcta integración con el entorno físico, la trayectoria se posiciona automáticamente sobre la superficie de la mesa más cercana al usuario y la nave y el planeta destino se alinean en los extremos de la trayectoria. Esta configuración se logra gracias a la función de comprensión espacial, que carga la información del entorno actual previamente escaneado. El control de la nave se realiza mediante seguimiento de manos,

el paciente debe posicionar la mano que realizará el ejercicio sobre la nave, activando el seguimiento a la mano seleccionada. Esto permite una interacción natural sin necesidad de controles externos.

Durante la ejecución, el sistema calcula en tiempo real la desviación entre la nave y la trayectoria y cuando la distancia supera el radio de tolerancia configurado, se registra un error y se activa retroalimentación correspondiente.

Al completar la trayectoria, cuando la nave colisiona con el planeta destino (Figura 3.d), se ejecuta el cálculo y escritura de las métricas de desempeño en *Firestore*, las cuales son: tiempo total de ejecución, porcentaje de tiempo dentro de la trayectoria, número de errores y el vector completo de posiciones (x, y, z) muestreado a 60 Hz. Este último permite análisis posteriores de patrones de movimiento e identificación de segmentos problemáticos, aportando indicadores cuantitativos objetivos del progreso del paciente.

3.2.3. Mecánica de retroalimentación multimodal

La retroalimentación multimodal consta de tres canales sensoriales simultáneos: visual, auditivo y háptico (Figura 4). La retroalimentación visual consiste en el cambio de color de la trayectoria: cuando la nave permanece dentro del radio permitido el tubo es de color verde, mientras que cuando hay una desviación mayor a la tolerancia del tubo cambia a rojo, indicando error. El canal auditivo complementa la experiencia mediante señales de logro y alertas discretas, reforzando la percepción de progreso.

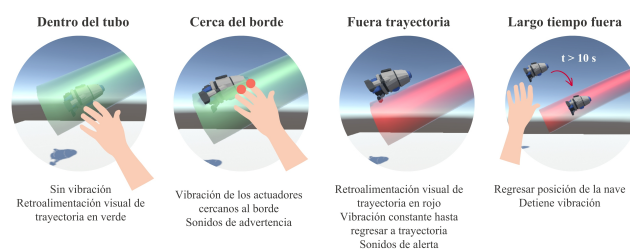


Figura 4: Mecánica de retroalimentación multimodal

Por otro lado, el canal háptico se implementa mediante los actuadores vibrotáctiles de los dispositivos de *bHaptics*, la intensidad de la vibración se modula en función del nivel de desviación respecto a la trayectoria y se activa de manera direccional, es decir, en la zona de la mano correspondiente al lado hacia el cual ocurre la desviación. Existen tres estados de este canal: cuando la nave se encuentra dentro de la trayectoria no hay vibración, cuando la nave se encuentra cercana a un borde de la tolerancia, hay una vibración leve como señal anticipatoria y cuando la nave se desvía de la trayectoria, hay vibración proporcional a la magnitud de la desviación. Para evitar una fatiga sensorial en el paciente, se incorporó un mecanismo de limitación temporal que desactiva la vibración tras un periodo prolongado de error continuo, reactivándose cuando el paciente recupera la trayectoria.

3.3. Aplicación para gestión terapéutica

El sistema de gestión terapéutica se desarrolló como una aplicación de escritorio independiente en Python utilizando

KivyMD, un *framework open-source* para el desarrollo de interfaces gráficas multiplataforma. Su función es proveer al terapeuta un entorno separado del serious game desde el cual administrar pacientes, configurar sesiones y consultar métricas de desempeño, accediendo a la misma base de datos en Firebase que utiliza el *serious game* en tiempo real.

La aplicación se compone de una pantalla de inicio de sesión, que requiere de autenticación mediante *Firebase Authentication* con proveedor *Email/Password*, garantizando que únicamente terapeutas registrados accedan al sistema. Al ingresar se puede seleccionar o bien ver el listado de pacientes o bien registrar uno nuevo. Dentro del listado de pacientes se desglosa la información relevante del paciente y las métricas de desempeño que obtuvo en las sesiones (Figura 5).

Se implementa *Firebase* como *backend* del sistema, el almacenamiento se estructura en un modelo jerárquico con una colección raíz "Pacientes", donde el identificador de cada documento es la concatenación normalizada de nombre y apellido del paciente, y una subcolección "Sesiones" anidada dentro de cada documento de paciente. Cada documento de sesión almacena las métricas de desempeño registradas automáticamente por el *serious game* al finalizar cada nivel. Esta estructura permite al terapeuta consultar el historial de sesiones de cada paciente, comparar el progreso entre sesiones y planificar intervenciones futuras con base en indicadores obtenidos.

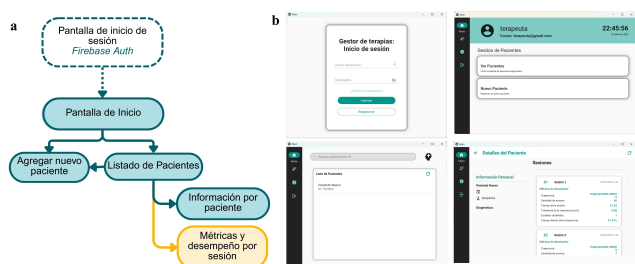


Figura 5: Aplicación para la gestión terapéutica. a. Mapa de navegación de la aplicación de escritorio. b. Interfaz de la aplicación en sus diferentes pantallas

4. Pruebas de funcionamiento

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del sistema, se realizaron pruebas con cinco usuarios sanos. A cada usuario se le explicó el funcionamiento de la herramienta, primero se les registró en la aplicación de gestión terapéutica y después se les equipó con el visor y los dispositivos hápticos para iniciar el *serious game*. Cada usuario dibujó tres trayectorias tridimensionales distintas desde la interfaz del terapeuta y realizó cinco partidas con cada una, acumulando 15 sesiones por usuario.

Al finalizar, se aplicó una encuesta de 15 ítems en escala Likert de cinco puntos (1: "Totalmente en desacuerdo", 5: "Totalmente de acuerdo") que evaluó la intuitividad de la interfaz, la claridad de las indicaciones del juego y el rol de la retroalimentación háptica como guía durante el ejercicio.

4.1. Resultados

Las métricas de desempeño promedio obtenidas por trayectoria de cada usuario sano se muestran en la Tabla 1, en donde

T1, T2 y T3 indican la trayectoria. Se reportan tres indicadores por sesión: número de errores (ocasiones en que la nave salió del tubo de tolerancia), tiempo de ejecución en segundos y $\%_{\text{tiempo dentro}}$ que indica el porcentaje de tiempo dentro de la trayectoria (proporción del tiempo total en que el movimiento se mantuvo dentro del tubo).

Tabla 1: Métricas de desempeño por usuario y trayectoria

	Métrica	T1	T2	T3
Usuario 1	Errores	4.60	6.20	5.20
	Tiempo (s)	4.67	7.02	8.65
	$\%_{\text{tiempo dentro}}$	79.26 %	85.87 %	89.28 %
Usuario 2	Errores	8.40	3.00	3.40
	Tiempo (s)	15.39	9.67	5.64
	$\%_{\text{tiempo dentro}}$	80.76 %	91.77 %	87.13 %
Usuario 3	Errores	3.60	2.80	3.00
	Tiempo (s)	9.21	8.79	7.60
	$\%_{\text{tiempo dentro}}$	57.65 %	83.98 %	84.28 %
Usuario 4	Errores	6.20	3.40	5.40
	Tiempo (s)	9.36	10.16	14.23
	$\%_{\text{tiempo dentro}}$	89.85 %	96.05 %	87.23 %
Usuario 5	Errores	10.40	2.20	8.80
	Tiempo (s)	9.37	4.19	8.91
	$\%_{\text{tiempo dentro}}$	82.63 %	89.02 %	78.11 %

Los valores registrados muestran que todos los usuarios completaron las trayectorias con porcentajes de tiempo dentro superiores al 57 %, con un promedio global de 84.3 % y valores de hasta 96 %, lo que indica que la mecánica de seguimiento opera de forma estable y que el sistema responde correctamente al movimiento de la mano. La variabilidad entre usuarios y trayectorias se debe a diferencias en la geometría de las trayectorias diseñadas y a la curva de aprendizaje individual.

La encuesta arrojó un promedio de usabilidad de 4.75/5, con puntuaciones máximas en el aprendizaje rápido sobre cómo controlar la nave y seguir la trayectoria y la satisfacción general (5.0/5). La retroalimentación háptica obtuvo un promedio de 4.43/5, siendo los ítems mejor evaluados el incremento en la sensación de inmersión y la utilidad de la vibración para identificar errores.

Los usuarios destacaron la claridad visual de la tarea, la sencillez de la interfaz y como los canales visual y háptico se complementan, específicamente, se señaló que la retroalimentación háptica resultó clave para corregir desviaciones en el eje de profundidad. Estos resultados indican que el sistema opera de forma funcional y que la retroalimentación háptica cumple su rol como canal de guía durante el ejercicio.

5. Conclusiones

Se desarrolló SIR-HAPT, un sistema inmersivo de realidad aumentada con retroalimentación háptica para rehabilitación del miembro superior, integrando el visor *Meta Quest 3*, los dispositivos hápticos *TactGlove* y *Tactosy for Hands* de *bHaptics*, un serious game desarrollado en Unity 6.0 y una aplicación de gestión terapéutica en Python. Las pruebas de funcionamiento con usuarios sanos confirmaron la funcionalidad estable del sistema: la inicialización del entorno de RA, el seguimiento de

manos, la sincronización de la retroalimentación háptica y el registro y disponibilidad de métricas en la nube funcionaron de manera consistente a lo largo de las 75 sesiones registradas.

Los resultados de la encuesta indican que la interfaz es intuitiva y fácil de aprender. Los usuarios comprendieron con rapidez la mecánica del juego y reportaron satisfacción general con el diseño. En cuanto a la retroalimentación háptica, los usuarios señalaron que las vibraciones les permitieron identificar errores y corregir su trayectoria, siendo particularmente útil en el eje de profundidad. Asimismo, destacaron que la combinación de los canales visual y háptico hizo la actividad más inmersiva y motivadora. Entre las áreas de mejora identificadas se encuentran el ajuste del anclaje de la nave sobre la mano y la gestión de trayectorias cíclicas, aspectos que se abordarán en iteraciones futuras del sistema.

Como trabajo futuro, se podría realizar una validación del sistema como herramienta terapéutica, diseñando un protocolo de pruebas preclínicas y clínicas que permita evaluar el impacto de la retroalimentación háptica en el proceso de rehabilitación del miembro superior, en conjunto con terapeutas especializados. En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que SIR-HAPT es una herramienta funcional, adaptable y con potencial para su integración en entornos terapéuticos reales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente en el marco del proyecto MYOREHAB (PCI2023-143405) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

(MCIN) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI) [MCI-N/AEI/10.13039/501100011033].

Referencias

- Bae, S., Park, H.-S., 2023. Development of immersive virtual reality-based hand rehabilitation system using a gesture-controlled rhythm game with vibrotactile feedback: An fnirs pilot study. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 31, 3732–3743. DOI: 10.1109/tnsre.2023.3312336
- Bai, B., 2025. Optimisation strategies for serious game interface design. *Communications in Humanities Research* 72, 153–160. DOI: 10.54254/2753-7064/2025.LC25159
- Islam, M. S., 2024. Ar-based upper extremity rehabilitation with multimodal feedback for patients with stroke and parkinson's disease: A scoping review. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 68 (1), 1328–1332. DOI: 10.1177/10711813241268629
- Luciani, B., Pedrocchi, A., Tropea, P., Seregini, A., Braghin, F., Gandolla, M., 2025. Augmented reality for upper limb rehabilitation: real-time kinematic feedback with hololens 2. *Virtual Reality* 29 (2), 57. DOI: 10.1007/s10055-025-01124-1
- Ong, D. S. M., Zhang, M. Z. W., Vallabhajosyula, R., 2021. Serious games as rehabilitation tools in neurological conditions: A comprehensive review. *Technology and Health Care* 29 (1), 15–31. DOI: 10.3233/thc-202333
- Perez, E., Diaz Leon, C., 2025. Chapter 11 - immersive and nonimmersive serious games design concepts for neurorehabilitation. In: López, N. M. (Ed.), *Advances in Technology-Assisted Neurorehabilitation*. Academic Press, pp. 209–228. DOI: B978-0-12-819877-3.00007-X
- Shi, Y., Shen, G., 2024. Haptic sensing and feedback techniques toward virtual reality. *Research* 7. DOI: 10.34133/research.0333