

Jornadas de Automática

Sistema de realimentación háptica por vibración para mejorar evaluación de destreza manual con Box and Block Test virtual

Yepez-Figueroa, Johnny J.^{a,*}, Oña, Edwin Daniel^a, Alonso-Cámarra, Hugo^a, Tapia-González, Silvia^b, Balaguer, Carlos^a, Jardón, Alberto^a

^a*Robotics Lab, Dpto de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Spain.*

^b*Departamento de Ciencias Médicas Básicas, Facultad de Medicina-Instituto de Medicina Molecular Aplicada-Nemesio Díez (IMMA-ND), Universidad San Pablo-CEU, CEU Universities, Urbanización Montepíñlope, Madrid, Spain.*

To cite this article: Yépez-Figueroa, J.J., Oña, E.D., Alonso-Cámarra, H., Tapia-González, S., Balaguer, C., Jardón, A. 2025. Vibration haptic feedback system for improved manual dexterity assessment with virtual Box and Block Test. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12192>

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo de sistema háptico por vibración para las manos, diseñado para integrarse en el entorno del VR-BBT, una versión virtual inmersiva del test clínico Box and Block Test (BBT). El objetivo del sistema es proporcionar retroalimentación táctil durante el desarrollo de la prueba con el VR-BBT y disminuir los efectos de la pérdida de sensación táctil propia de la realidad virtual. El sistema implementado se basa en un diseño de dedales flexibles que se colocan en la yema de los dedos y que se activan cuando el usuario interactúa con los cubos virtuales del VR-BBT. A diferencia de otros sistemas hápticos tipo guante, la solución implementada busca facilitar su colocación por pacientes con rigidez en las manos. El funcionamiento y ergonomía del sistema se han validado preliminarmente a través de una encuesta de satisfacción a usuarios sanos después de usar el sistema VR-BBT con y sin realimentación táctil. Los resultados sugieren que el diseño del guante es cómodo y funcional para un uso prolongado. Además, se ha comprobado que el diseño del sistema no distorsiona la morfología de la mano de cara a su reconocimiento por parte del sistema de visión del VR-BBT. Este prototipo representa un avance para el desarrollo de sistemas que potencien las capacidades de sistemas de rehabilitación basadas en realidad virtual.

Palabras clave: Dispositivos hapticos, Realidad virtual, Rehabilitación, Destreza manual, Juegos serios

Vibration haptic feedback system for improved manual dexterity assessment with virtual Box and Block Test

Abstract

This article presents the development of a vibrating haptic system prototype for the hands, designed to integrate with the VR-BBT environment—an immersive virtual rendition of the clinical Box and Block Test (BBT). The system's goal is to provide tactile feedback during the VR-BBT task and mitigate the loss of tactile sensation inherent to virtual reality. It employs flexible thimble-style actuators placed on the fingertips that trigger whenever the user interacts with the virtual blocks in VR-BBT. Unlike other glove-based haptic systems, this design simplifies donning for patients with hand stiffness. The system's functionality and ergonomics were preliminarily validated through a user satisfaction survey with healthy participants after using VR-BBT both with and without tactile feedback. Results indicate that the thimble design is comfortable and functional for prolonged use and does not distort the hand's morphology in a way that would interfere with the VR-BBT's vision-based tracking. This prototype represents a significant advance in the development of virtual-reality-based rehabilitation systems by enhancing their haptic capabilities.

Keywords: Haptic devices, Virtual reality, Rehabilitation, Hand dexterity, Serius games

* Autor para correspondencia: johnnyjavier.yepez@uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. Introducción

En las últimas décadas, los videojuegos con fines terapéuticos, conocidos como *serious games*, han cobrado una relevancia creciente en el ámbito de la rehabilitación. Estos entornos interactivos ofrecen escenarios motivadores que promueven la participación activa del paciente en su proceso de recuperación, facilitando la evaluación y mejora de diversas funciones motoras y cognitivas (Karapapas and Goumopoulos, 2021). Dentro de este contexto, el Box and Block Test (BBT) ha sido ampliamente adoptado como una prueba estandarizada para evaluar la destreza manual gruesa en pacientes con alteraciones neurológicas, como la enfermedad de Parkinson. Esta prueba, consta de una caja de madera con dos compartimentos separados por una barrera central, y un total de 150 cubos pequeños que se tiene que desplazar de forma manual. La puntuación de la prueba se basa en comparar el número de cubos desplazados con cada mano durante el tiempo de un minuto (Mathiowetz et al., 1985).

En los últimos años, se han desarrollado versiones alternativas basadas en el BBT integrando diferentes tecnologías como visión artificial (Hsiao et al., 2013), sensorización de la caja (Oña et al., 2023; Prochaska and Ammenwerth, 2023), o incluso realidad virtual (Oña et al., 2020). Dichos sistemas permiten obtener de forma automática la puntuación del test, así como promover su administración automática. En particular los sistemas basados en RV como el VR-BBT ofrecen capacidades muy prometedoras a la hora de fomentar la interacción natural y registro automático de datos (números de cubos totales, tiempo de interacción, trayectorias, entre otros). Sin embargo, una de las principales limitaciones de la RV es la perdida del tacto durante la interacción con objetos virtuales.

En esta línea, con el propósito de reducir el efecto de esa perdida de estímulo tangible, se pueden incorporar sistemas de realimentación haptica para complementar estrategias basadas en RV (Gao and Spence, 2025). En este contexto, y con el objetivo de mejorar la percepción durante la manipulación de cubos virtuales del sistema VR-BBT desarrollado en trabajos previos (Oña et al., 2020), este trabajo propone la integración de un sistema de realimentación haptica que estimule la mano del paciente durante la interacción con el entorno virtual. El sistema descrito en este artículo busca (1) interferir mínimamente con el sistema de reconocimiento de la mano del VR-BBT, (2) estimular de forma controlada la mano del paciente cuando toca un cubo virtual, y (3) obtener un diseño fácil de usar y personalizable. Con el fin de evaluar la eficacia del sistema haptico propuesto, se realizó un estudio preliminar en el laboratorio con participantes sanos y se recogieron sus opiniones sobre el sistema mediante una encuesta de satisfacción.

La estructura del artículo presenta en la Sección 2 un resumen sobre distintos tipos de realimentación haptica enfocados a la mano y su vinculación con *serious games* en rehabilitación. En la Sección 3 se describe la arquitectura (hardware y software) del sistema haptico y su integración al entorno del VR-BBT. En la Sección 4 se presenta la validación técnica del dispositivo y sus funcionalidades. En la Sección 5 se discuten los resultados obtenidos, así como se proponen algunas líneas futuras de desarrollo. Finalmente, las conclusiones del estudio y los aportes del prototipo se resumen en la Sección 6.

2. Sistemas con realimentación haptica

La realimentación haptica desempeña un papel crucial en la rehabilitación, al proporcionar estímulos táctiles y proprioceptivos que enriquecen la interacción del usuario con entornos virtuales o dispositivos terapéuticos. Esta retroalimentación mejora la percepción sensorial y puede facilitar la recuperación de funciones motoras al ofrecer información adicional durante la ejecución de movimientos.

En el ámbito de la rehabilitación de la mano, los dispositivos de realimentación haptica se clasifican generalmente en cuatro tipos principales (Ajayi et al., 2025). (1) La realimentación vibratoria utiliza pequeños actuadores que generan pulsos mecánicos en la piel, mejorando la percepción táctil y la conciencia corporal; es especialmente común en guantes hapticos. (2) La realimentación de fuerza emplea actuadores que ofrecen resistencia o asistencia al movimiento, simulando fuerzas externas y favoreciendo el entrenamiento de la fuerza y la coordinación motora, tal como ocurre en numerosos exoesqueletos. (3) La realimentación táctil, por su parte, recrea sensaciones de presión o textura mediante actuadores específicos, lo que mejora la discriminación de superficies y la destreza manual, siendo habitual en prótesis avanzadas. Finalmente, (4) la realimentación propioceptiva proporciona información sobre la posición y el movimiento de las articulaciones, ayudando en la educación del sentido de posición y movimiento; importante en rehabilitación neurológica (Fleury et al., 2020).

Varios estudios han explorado dispositivos portátiles basados en actuadores vibrotáctiles integrados con tecnologías de realidad virtual y aumentada, logrando experiencias de rehabilitación más inmersivas y personalizadas. Entre los ejemplos más destacados se encuentran el VTS Glove, que incorpora actuadores vibratorios mecánicos distribuidos en los dedos para reducir la espasticidad y mejorar la percepción táctil en pacientes post-ictus, permitiendo su uso prolongado en domicilio (Seim et al., 2021). De forma complementaria, sistemas basados en actuadores de masa excéntrica ERM (Eccentric Rotating Mass) que genera vibración mediante la rotación de un peso desbalanceado sobre su eje, a diferencia de los actuadores resonantes lineales (LRA) que operan en su frecuencia de resonancia mediante un sistema de muelle y masa interna (Precision Microdrives, 2025b), utilizan cinco motores distribuidos en la palma y dedos para ofrecer vibraciones proporcionales a la fuerza virtual aplicada, lo que facilita la discriminación de rigidez en entornos de realidad virtual (van Wegen et al., 2023).

El SenAct Glove representa una evolución hacia diseños ultracompactos con actuadores auto-sensores que combinan la retroalimentación de fuerza y vibración, optimizando la teleoperación y las tareas en realidad virtual mediante una retroalimentación haptica de alta precisión (Yu et al., 2022). Por su parte, el vDeltaGlove integra actuadores multimodales capaces de generar tanto fuerza como vibración, orientado a aplicaciones de teleoperación robótica que requieren diferentes modalidades de estímulo haptico para la manipulación remota de objetos (Trinitatova and Tsetserukou, 2023). Asimismo, el SenseGlove combina seis actuadores vibratorios con motores de fuerza para ofrecer una realimentación integrada en experiencias de VR y AR, manteniendo un seguimiento preciso del movimiento de la mano (Sim et al., 2021).

Otro enfoque innovador se observa en el guante vibrotáctil destinado a la restauración sensorial en personas con discapacidad visual, que transforma imágenes captadas por una cámara en patrones de vibración en las yemas de los dedos, mejorando la navegación y la percepción del entorno (Abad et al., 2022). Estos desarrollos demuestran la versatilidad de la re-alimentación háptica y su potencial para adaptarse a distintas necesidades terapéuticas.

No obstante, la mayoría de estos sistemas están basados en diseños tipo guante que cubre toda la mano, lo cual, dificulta su colocación en pacientes neurológicos. Además, el hecho de cubrir toda la mano dificulta su reconocimiento por parte del sistema de visión propio de las gafas VR. Por ello, el diseño propuesto en este trabajo busca reducir dichas limitaciones por medio de un diseño que no cubra la mano y que facilite su uso.

3. Arquitectura del sistema háptico por vibración

La Figura 1 presenta la arquitectura general del sistema háptico propuesto. En ella se muestran los tres componentes principales del sistema: (1) el módulo háptico para cada mano, (2) el entorno de visualización inmersiva basado en realidad virtual, y (3) el sistema de procesamiento central.

El modulo háptico consiste en 5 actuadores (uno para cada dedo) que se activan de forma sincronizada con eventos en el entorno virtual provenientes del VR-BBT. El entorno virtual del VR-BBT permite detectar la interacción con los cubos virtuales y envían un flag cuando se reconoce el gesto de agarrar el cubo, el cual es enviado al guante háptico para activar el estímulo. A nivel de conexiones, en esta fase de desarrollo, el VR-BBT se ejecuta en un ordenador que sirve como sistema de procesamiento central y que a su vez recibe la comunicación por puerto serie de los dos sistemas hápticos, sincronizando los estímulos háptico - virtual.

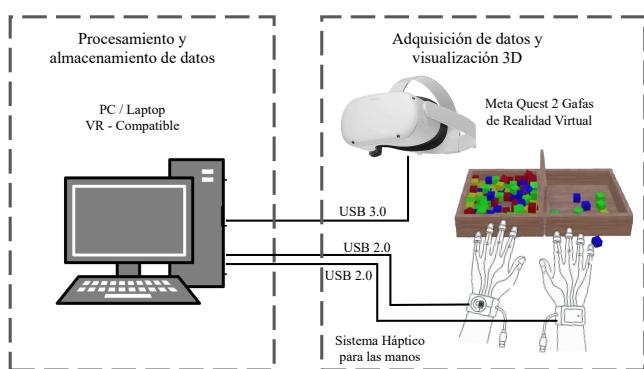


Figura 1: Arquitectura del sistema.

A continuación se detalla el desarrollo del diseño CAD de los actuadores, el sistema electrónico y su integración con el entorno virtual.

3.1. Diseño CAD

El diseño CAD está enfocado en desarrollar diferentes modelos que ofrezcan la mayor versatilidad y comodidad de uso, permitiendo una fácil colocación en la punta de los dedos sin interferir con el sistema de seguimiento de manos de las gafas

de realidad virtual. Los diferentes diseños de dedal son paramétricos en distintos tamaños para obtener variedad en las dimensiones anatómicas de los usuarios. Los diseño se realizaron con el software Onshape.

La Figura 2(a) corresponde a un diseño en espiral que envuelve parcialmente el dedo, pensado para proporcionar un mayor agarre y estabilidad durante el uso. La Figura 2(b) muestra un diseño tipo anillo en forma de U, que permite una colocación más rápida y sencilla sobre el dedo, mejorando la ergonomía sin comprometer la transmisión de la vibración. Finalmente, la Figura 2(c) presenta una versión modificada del modelo tipo anillo, diseñada específicamente para evitar que el dedal se sujeten en la uña, desplazando el punto de apoyo a la falange anterior. Esta última modificación mejora el confort durante el uso prolongado y asegura una mejor adaptación anatómica a distintos tamaños de dedo, sin perder eficacia en la fijación del motor ni en la calidad del estímulo háptico.

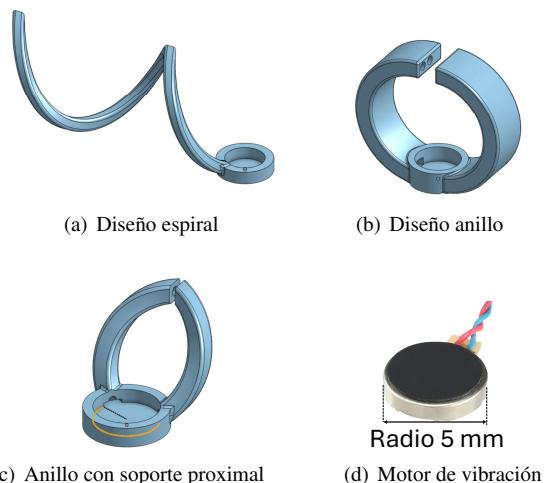


Figura 2: Modelos CAD diseñados en este estudio

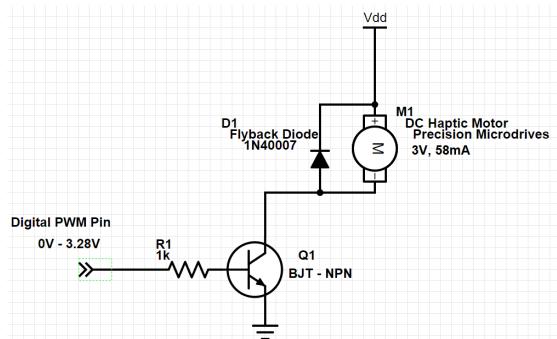
Cada uno de los modelos de dedal fue diseñado para alojar internamente un motor de vibración (ver Figura 2(d)) modelo Precision Microdrives 310-103.004, es un motor ERM. Este motor funciona a un voltaje nominal de 3 V, alcanzando una velocidad de vibración de $12200 \text{ rpm} \pm 3000$, lo que equivale a una frecuencia de vibración aproximada de 203 Hz, con una corriente típica de funcionamiento de 58 mA y una amplitud de vibración normalizada de 1,3 G, proporcionando así una estimulación táctil intensa y claramente perceptible. Su peso es muy ligero (alrededor de 1,2 g en motores similares de la serie 310), lo que contribuye a minimizar la carga sobre el usuario y mejora la comodidad durante sesiones prolongadas de rehabilitación (Precision Microdrives, 2025a). Se ha seleccionado este modelo por su tamaño compacto y perfil circular (10 mm de diámetro \times 2,7 mm de longitud del cuerpo, $\pm 0,1$ mm), que se adapta ergonómicamente a la superficie de la yema de los dedos, facilitando su montaje sin interferir con la movilidad ni con los sistemas de visión en realidad virtual.

Los prototipos que se han implementados han sido impresos en resina Flexible 80A Resin de Formlabs (Formlabs, 2025), un elastómero translúcido y de tacto suave con una dureza Shore de 80A, especialmente concebido para recrear las características mecánicas de piezas de caucho o poliuretano

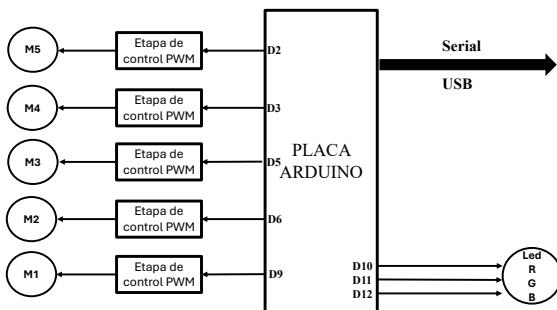
termoplástico. Las muestras fabricadas con esta resina soporan elevadas cargas de flexión y compresión y mantienen su desempeño incluso tras numerosos ciclos de fatiga.

3.2. Sistema electrónico

El sistema electrónico aprovecha la capacidad de la Arduino Nano 33 BLE para generar cinco señales moduladas PWM (una por cada dedo) que oscilan entre 0 V y 3,3 V en corriente continua. Estas señales llegan a las bases de los transistores NPN contenidos en el circuito integrado HFA3046BZ, un encapsulado compacto que agrupa cinco interruptores de este tipo. Al variar el ciclo de trabajo de la señal PWM, se ajusta la tensión media aplicada al motor y, por tanto, la velocidad de giro y la intensidad de la vibración, es decir, cuanto mayor es el duty cycle, más fuerte es la sensación háptica.



(a) Esquema del circuito de control PWM para cada motor de vibración



(b) Arquitectura del sistema electrónico

Figura 3: Sistema electrónico del dispositivo háptico

Los motores Precision Microdrives 310-103 operan de forma óptima a 3 V, consumen alrededor de 58 mA y producen una vibración de 1,3 G a unos 203 Hz, por lo que alimentarles desde el pin de 3,3 V de la placa garantiza que nunca superamos el máximo recomendado de 3,8 V y preservamos su durabilidad. Además, para evitar que las corrientes inducidas al apagar el motor dañen el transistor, se incorpora un diodo flyback (1N4007) en antiparalela con cada motor.

La figura 3(a) muestra el esquema de un canal, donde la señal PWM activa el transistor NPN para comutar la corriente al motor, ilustrando el control individual de la vibración en cada dedo. Por su parte, la figura 3(b) presenta la arquitectura completa del sistema, con los pines PWM de la Arduino Nano 33 BLE (D2, D3, D5, D6 y D9) conectados a cada uno de los cinco canales. En conjunto, este diseño ofrece un control

preciso de cada motor con un circuito compacto y fácilmente replicable, adecuado para proyectos de investigación y desarrollo en háptica.

3.3. Integración con sistema virtual

En este prototipo, el Arduino Nano 33 BLE se conecta al sistema de procesamiento central a través de un enlace serial USB, lo que garantiza (1) compatibilidad con cualquier sistema operativo y facilita la implementación en motores de juego como Unity o entornos de simulación sin depender de librerías especializadas. (2) Al tratarse de una conexión cableada directa, la latencia se mantiene al mínimo, lo que resulta crítico para sincronizar con precisión la señal PWM de los motores hápticos con los eventos virtuales. Además, (3) el puerto USB permite monitorizar y registrar el flujo de datos en tiempo real durante las fases de prueba, simplificando enormemente el proceso de depuración, y (4) ofrece una comunicación resistente ante posibles interferencias electromagnéticas.

A diferencia de tecnologías inalámbricas como Bluetooth o Wi-Fi, que requieren emparejamientos, ajustes de seguridad y pueden verse afectadas por interferencias o pérdidas de señal, en esta fase de desarrollo necesitamos descartar cualquier problema de comunicación. Por ello, la conexión USB serial garantiza una transmisión directa y estable de los datos, con baja latencia y sin configuraciones adicionales. De esta manera, podemos centrar las pruebas en el rendimiento háptico sin preocuparnos por posibles fallos en el enlace. Más adelante, en trabajos futuros, evaluaremos opciones inalámbricas para ofrecer mayor movilidad y comodidad al usuario.

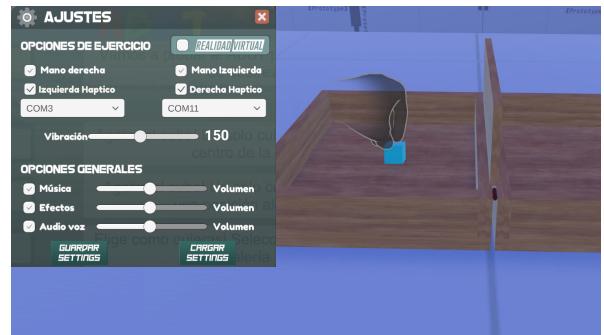


Figura 4: Configuración de la vibración en el entorno VR-BBT.

Además se ha integrado un panel de configuración en el VR-BBT, como se observa en la Figura 4, el cual permite identificar y seleccionar los puertos seriales correspondientes con cada dispositivo háptico, etiquetándolos según la mano (izquierda o derecha). Adicionalmente, el panel permite ajustar de manera sencilla por medio Slider el nivel de intensidad de vibración de los actuadores, lo cual facilita la personalización de la experiencia háptica de acuerdo con las necesidades del paciente.

4. Validación técnica preliminar

En la Figura 5 se presentan los dos prototipos que se han implementado (uno para cada mano) utilizando para los dedales el diseño de la Figura 2(c). Se puede apreciar que el diseño de los dedales no afecta a la forma de la mano y permite que

los sistemas habituales de reconocimiento de mano (LeapMotion, Oculus Hand Tracking, etc) no reduzcan su efectividad en el seguimiento e identificación de sus modelos entrenados de manos.



Figura 5: Prototipo de dedales hapticos.

Para evaluar de forma preliminar el desempeño y la usabilidad del guante haptico desarrollado, se llevaron a cabo experimentos con usuarios sanos en laboratorio. El estudio incluyó a 15 participantes sin problemas motrices y con distintos niveles de familiaridad tecnológica. Los participantes fueron invitados a usar el sistema VR-BBT en una sola sesión, primero sin realimentación haptica, y a continuación usando el guante haptico (ver Figura 6). Tras completar el experimento, los participantes llenaron una encuesta para evaluar el grado de satisfacción con el sistema haptico.

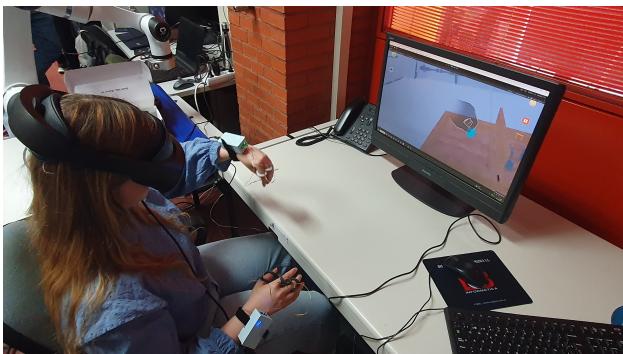


Figura 6: Participante usando el sistema VR-BBT con guante haptico.

La encuesta fue diseñada según el modelo *System Usability Scale* (SUS), utilizando afirmaciones alternadas entre positivas y negativas. Se empleó una escala tipo Likert de 5 puntos, donde 1 representa “Totalmente en desacuerdo” y 5 “Totalmente de acuerdo”. Las preguntas se elaboraron para cubrir aspectos clave como la facilidad de uso, la claridad de las sensaciones hapticas, la comodidad del dispositivo, y su potencial para usos terapéuticos.

La Tabla 1 presenta las preguntas del cuestionario y los resultados promedio obtenidos.

Tabla 1: Resultados de encuesta de usabilidad y funcionalidad

Usabilidad	Avg.
Q1 Me resultó fácil aprender a usar el guante	4.28
Q2 Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a usar el guante muy rápidamente	4.22
Q3 Me sentí muy seguro(a) usando el guante	4.22
Q4 Las funciones del guante estaban bien integradas	3.89
Q5 Creo que me gustaría usar este guante con frecuencia	3.17
Q6 Encontré el guante engoroso y difícil de manejar	2.61
Q7 Encontré el guante innecesariamente complicado de usar	2.72
Q8 Creo que necesitaría el apoyo de una persona experta para poder usar este guante	2.28
Q9 Encontré muchas inconsistencias en el funcionamiento del guante	2.33
Q10 Necesité aprender muchas cosas antes de poder usar el guante	2.06
Funcionalidad	Avg.
Q11 Percibí con claridad las sensaciones hapticas	4.67
Q12 No sentí dolor ni incomodidad al usar el guante	4.06
Q13 Las sensaciones fueron naturales y coherentes	3.72
Q14 Creo que este guante puede ser útil en mis terapias o actividades diarias	3.78
Q15 El guante fue cómodo durante todo el uso	3.39
Q16 Me resultó fácil colocarme el guante correctamente sin ayuda	2.94

5. Discusión

En base a los resultados obtenidos, se puede apreciar que existe una percepción generalmente positiva del sistema haptico por parte de los participantes. Por un lado, en el aspecto de usabilidad, las puntuaciones más altas se obtuvieron para las preguntas Q1, Q2, y Q3 relacionadas con la facilidad de uso y confort. Esto sugiere que el dispositivo es, en su estado actual, comprensible e intuitivo para la mayoría de los usuarios. Este aspecto es fundamental considerando el enfoque hacia aplicaciones terapéuticas, donde la facilidad de uso es crítica.

No obstante, algunos ítems del cuestionario SUS (Kim, 2024) reflejaron puntuaciones moderadas o bajas, particularmente en lo que respecta a la necesidad de apoyo experto y la percepción de inconsistencias en el funcionamiento. Esto sugiere oportunidades de mejora en la integración de funciones y en la experiencia del usuario durante los primeros momentos de interacción con el dispositivo.

En cuanto a la funcionalidad del sistema haptico, los resultados son especialmente alejadores. Los usuarios valoraron de forma muy positiva la claridad de las sensaciones hapticas, lo cual confirma que los actuadores vibratorios empleados lograron proporcionar una retroalimentación perceptible y significativa. Esta validación funcional respalda el diseño electrónico y el enfoque adoptado para simular estímulos físicos.

Uno de los principales desafíos identificados fue la dificultad para colocarse el guante sin ayuda, que obtuvo la puntuación más baja en la sección de funcionalidad. Este resultado se ve respaldado por el tiempo promedio de colocación, que fue de 85.56 segundos, indicando una posible limitación ergonómica en el diseño del sistema. Se recomienda optimizar la estructura física del guante y facilitar su instalación para mejorar la experiencia del usuario.

5.1. Trabajos futuros

El sistema haptico desarrollado actualmente funciona mediante comunicación serial por USB, con alimentación directa

desde la PC o laptop. Esta configuración ha permitido validar su funcionamiento en laboratorio y garantizar una comunicación efectiva con el entorno del VR-BBT. Sin embargo, como parte de la evolución del sistema, se plantea su transición hacia una versión completamente portátil e inalámbrica.

Para ello, es necesario eliminar la dependencia de cables mediante la incorporación de baterías recargables en cada módulo háptico. La placa Arduino Nano 33 BLE, ya presente en el diseño actual, ofrece capacidades de comunicación inalámbrica mediante Bluetooth Low Energy (BLE), lo cual habilita una arquitectura descentralizada y autónoma.

Finalmente, se realizará un estudio con pacientes para evaluar la efectividad y ergonomía del sistema implementado, e incluir las mejoras oportunas basadas en la experiencia de usuario y recomendaciones de médicos especialistas.

6. Conclusiones

El desarrollo de este prototipo háptico se enmarca en el objetivo de integrarlo en proyectos de Serious Games aplicados al área médica, específicamente en procesos de rehabilitación. Esta iniciativa surge de la necesidad de mejorar la calidad, personalización y efectividad de las terapias mediante tecnologías inmersivas que estimulen tanto el cuerpo como la mente del paciente. El guante háptico ofrece una interfaz tangible y reactiva, capaz de brindar retroalimentación sensorial al usuario, lo que contribuye a una experiencia más rica y funcional durante la rehabilitación.

Su aplicación puede beneficiar especialmente a pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares, personas con artritis reumatoide o degenerativa, individuos en procesos postquirúrgicos de extremidades superiores, así como aquellos que requieren terapia neuromuscular. En todos estos casos, la estimulación sensorial y motora controlada, combinada con entornos lúdicos, puede acelerar la recuperación y fomentar una mayor adherencia al tratamiento.

Como parte de la validación del prototipo, se realizó una encuesta centrada en aspectos ergonómicos, cuyos resultados indicaron que el guante ofrece un buen ajuste a distintas morfologías de mano, permitiendo su uso durante sesiones prolongadas sin generar incomodidad. La ergonomía, en este contexto, no solo garantiza la comodidad del paciente, sino también la funcionalidad y precisión del sistema háptico durante los ejercicios rehabilitativos.

Este prototipo háptico no solo demuestra su potencial dentro del ámbito de la rehabilitación médica, sino que también sienta las bases para su integración futura en plataformas tecnológicas más amplias, permitiendo así un tratamiento más humano, interactivo y efectivo.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a este resultado ha recibido financiación de los proyectos “iRoboCity2030-CM, Robótica inteligente para ciudades sostenibles (TEC-2024/TEC-62) y “FotoArt5.0-CM, Laboratorios inteligentes para la ciencia del futuro”, (TEC-2024/TEC-308) financiados por los “Programas de Actividades I+D en Tecnologías de la Comunidad de Madrid”; y del proyecto

“iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation”, (DTS22/00105), financiado por el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) y cofinanciado con fondos FEDER de la UE.

Referencias

- Abad, A. C., Reid, D., Ranasinghe, A., 2022. A novel untethered hand wearable with fine-grained cutaneous haptic feedback. *Sensors* 22 (5). DOI: 10.3390/s22051924
- Ajai, O. K., Du, S., Nahri, S. N. F., 2025. A review of haptic technologies for hardware-in-the-loop development. *Sensors and Actuators Reports*, 100331.
- Fleury, M., Lioi, G., Barillot, C., Lécuyer, A., 2020. A survey on the use of haptic feedback for brain-computer interfaces and neurofeedback. *Frontiers in Neuroscience* 14, 528.
- Formlabs, 2025. Flexible 80A Resin. <https://formlabs.com/es/store/materials/flexible-80a-resin/>, accessed: 2025-06-20.
- Gao, Y., Spence, C., 2025. Enhancing presence, immersion, and interaction in multisensory experiences through touch and haptic feedback. *Virtual Worlds* 4 (1). DOI: 10.3390/virtualworlds4010003
- Hsiao, C.-P., Zhao, C., Do, E. Y.-L., 2013. The digital box and block test automating traditional post-stroke rehabilitation assessment. In: 2013 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PERCOM workshops). IEEE, pp. 360–363.
- Karapapas, C., Goumopoulos, C., 2021. Mild cognitive impairment detection using machine learning models trained on data collected from serious games. *Applied Sciences* 11 (17). DOI: 10.3390/app11178184
- Kim, H.-Y., 2024. Development and usability assessment of virtual reality- and haptic technology-based educational content for perioperative nursing education. In: *Healthcare*. Vol. 12. MDPI, p. 1947.
- Mathiowetz, V., Volland, G., Kashman, N., Weber, K., 1985. Adult norms for the box and block test of manual dexterity. *The American journal of occupational therapy* 39 (6), 386–391.
- Oña, E. D., Balaguer, C., Jardón, A., 2023. Automatic cube counting system for the box and blocks test using proximity sensors: Development and validation. *Electronics* 12 (4), 914.
- Oña, E. D., Jardón, A., Cuesta-Gómez, A., Sánchez-Herrera-Baeza, P., Cano-de-la Cuerda, R., Balaguer, C., 2020. Validity of a fully-immersive vr-based version of the box and blocks test for upper limb function assessment in parkinson's disease. *Sensors* 20 (10). DOI: 10.3390/s20102773
- Precision Microdrives, 2025a. Datasheet 310-103-004 Vibration Motor. <https://catalogue.precisionmicrodrives.com/product/310-103-004-10mm-vibration-motor-3mm-type>, accessed: 2025-06-20.
- Precision Microdrives, 2025b. Vibration Motors: ERMs and LRAs. <https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors-erms-and-lras>, accessed: 2025-06-20.
- Prochaska, E., Ammenwerth, E., 2023. A digital box and block test for hand dexterity measurement: instrument validation study. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies* 10, e50474.
- Seim, C. E., Wolf, S. L., Starner, T. E., 2021. Wearable vibrotactile stimulation for upper extremity rehabilitation in chronic stroke: clinical feasibility trial using the vts glove. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 18 (1), 14. DOI: 10.1186/s12984-021-00813-7
- Sim, D., Baek, Y., Cho, M., Park, S., Sagar, A. S. M. S., Kim, H. S., 2021. Low-latency haptic open glove for immersive virtual reality interaction. *Sensors* 21 (11). DOI: 10.3390/s21113682
- Trinitatova, D., Tsetserukou, D., 2023. Study of the effectiveness of a wearable haptic interface with cutaneous and vibrotactile feedback for vr-based teleoperation. *IEEE Transactions on Haptics* 16 (4), 463–469.
- van Wegen, M., Herder, J. L., Adelsberger, R., Pastore-Wapp, M., van Wegen, E. E. H., Bohlhalter, S., Nef, T., Krack, P., Vanbellingen, T., 2023. An overview of wearable haptic technologies and their performance in virtual object exploration. *Sensors* 23 (3). DOI: 10.3390/s23031563
- Yu, M., Cheng, X., Peng, S., Cao, Y., Lu, Y., Li, B., Feng, X., Zhang, Y., Wang, H., Jiao, Z., et al., 2022. A self-sensing soft pneumatic actuator with closed-loop control for haptic feedback wearable devices. *Materials & Design* 223, 111149.