

Prueba Piloto de una Plataforma Exergaming Bimanual para Tareas de Neurorehabilitación Pilot Test of a Bimanual Exergaming Platform for Neurorehabilitation Tasks

M. I. Juárez-Chavero ^a, E. Rodríguez-Hernández ^a, O. A. Domínguez-Ramírez ^{a,*}, R. Villafuerte-Segura ^a,
A. Jarillo-Silva ^b

^aÁrea Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bInstituto de Informática, Universidad de la Sierra Sur, 70900, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México.

Resumen

El uso de plataformas basadas en sistemas exergaming ha contribuido notablemente al diagnóstico y tratamiento de personas con lesiones físicas o neurológicas. La integración de estos, con sistemas robóticos asistenciales y programación de juegos virtuales, permite notables avances en la rehabilitación de extremidades corporales o establecer estímulo neurocognitivo, y con ello propiciar acciones de neurorehabilitación. Sin embargo, es importante referir que cada usuario-paciente experimenta diferentes niveles de exigencia mental, física y temporal; así como distintos grados de esfuerzo, rendimiento y nivel de frustración durante el proceso de rehabilitación. En este se evalúa la prueba piloto de un tipo especial de plataforma exergaming bimanual, integrada en un ambiente de realidad virtual y dispositivos hápticos mayordomo en lazo cerrado con estrategias de control de fuerza y movimiento. En este artículo de investigación se aplica el protocolo NASA-TLX para evaluar el desempeño y la experiencia de usuarios sanos al finalizar la sesión del experimento. Se analiza el nivel de carga de la tarea a la que es sometido cada usuario evaluado, y así se define la demanda cognitiva y física como una actividad previa antes de la validación en un centro de rehabilitación.

Palabras Clave: Exergaming, Neurorehabilitación, NASA TLX, Interfaz háptica, Realidad virtual

Abstract

The use of exergaming platforms has significantly contributed to the diagnosis and treatment of people with physical or neurological injuries. Their integration with assistive robotic systems and virtual game programming enables significant advances in limb rehabilitation and the establishment of neurocognitive stimulation, thereby facilitating neurorehabilitation actions. However, it is important to note that each user-patient experiences different levels of mental, physical, and temporal demands, as well as varying degrees of effort, performance, and frustration during the rehabilitation process. This study evaluates the pilot test of a special type of bimanual exergaming platform, integrated into a virtual reality environment and closed-loop butler haptic devices with force and movement control strategies. This research article applies the NASA-TLX protocol to evaluate the performance and experience of healthy users at the end of the experimental session. The level of task load each user is subjected to is analyzed, and the cognitive and physical demand is defined as a prerequisite for validation in a rehabilitation center.

Keywords: Exergaming, Neurorehabilitation, NASA TLX, Haptic interface, Virtual reality

1. Introducción

La rehabilitación a través de las extremidades superiores es un proceso crítico para las personas que se recuperan de afecciones neurológicas, lesiones o trastornos congénitos. Los

métodos terapéuticos tradicionales, aunque eficaces, a menudo se enfrentan a retos como el escaso compromiso del paciente, la carga de trabajo del terapeuta y la dificultad de mantener la motivación a largo plazo. En los últimos años, la incorporación de

*Autor para correspondencia: omar@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ju403657@uaeh.edu.mx (Melani Ingrid Juárez-Chavero), ro502288@uaeh.edu.mx (Edwin Rodríguez-Hernández), omar@uaeh.edu.mx (Omar Arturo Domínguez-Ramírez), villafuerte@uaeh.edu.mx (Raúl Villafuerte-Segura), ajarillo@unsis.edu.mx (Alejandro Jarillo-Silva).

Historial del manuscrito: recibido el 11/07/2025, última versión-revisada recibida el 01/12/2025, aceptado el 25/11/2025, publicado el 25/03/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15496>



plataformas de exergaming, las cuales combinan ejercicio físico con videojuegos interactivos, ha surgido como una alternativa a la rehabilitación convencional, garantizando terapias más dinámicas y personalizadas (Agata *et al.* (2024); Muhammad *et al.* (2023); Jarillo-Silva *et al.* (2010); Candice *et al.* (2024); Gillian *et al.* (2014)).

Los exergames son videojuegos que se basan en movimientos físicos generales del jugador. Funcionan combinando la detección de movimiento en tiempo real junto a entornos virtuales atractivos, es decir, con videojuegos que pueden motivar a las personas a hacer ejercicio. El exergaming, como herramienta terapéutica, incorpora ejercicio funcional, con propósito y atractivo de forma cuantificable y fiable, lo que permite una dosificación precisa de la terapia (Barry *et al.* (2014), Aparicio-Juárez *et al.* (2024)).

La mayoría de los estudios han ilustrado la eficacia de la terapia basada en videojuegos y se considera que la motivación es un aspecto clave de la neurorrehabilitación. Al transformar las tareas repetitivas en desafíos lúdicos, se promueve una mayor adherencia y, potencialmente, una plasticidad cerebral más efectiva. Si bien se han obtenido resultados prometedores sobre los efectos positivos del exergaming, sus resultados en diferentes poblaciones aún no se han determinado (Chow y Mann (2023); Polizzi *et al.* (2024)).

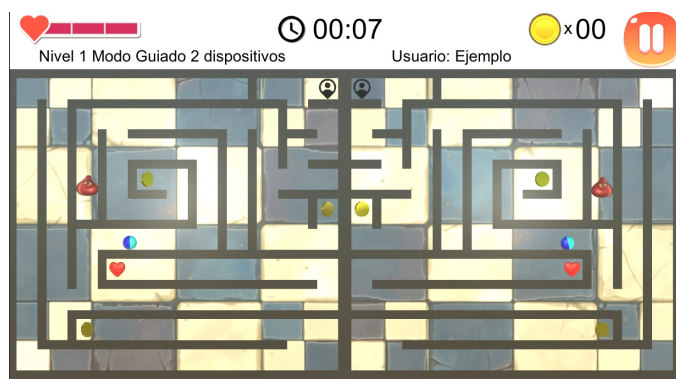


Figura 1: Laberinto virtual bimanual.

La presente investigación se centra en la integración y validación de una plataforma de neurorrehabilitación bimanual avanzada, cuyo propósito principal es asistir y mejorar la recuperación de la funcionalidad de las extremidades superiores en pacientes. El sistema integra dos tecnologías clave: una interfaz de exergaming (videojuegos interactivos) para fomentar el compromiso cognitivo y la motivación, y la incorporación de dos dispositivos hápticos Touch, que son actuadores motorizados los cuales aplican retroalimentación de fuerza directa al usuario, lo que le permite sentir objetos virtuales y producir sensaciones táctiles reales a medida que el usuario manipula los objetos 3D en la pantalla (3D Systems (2025)). La contribución técnica central radica en el diseño e implementación de una ley de control robusta, específicamente un control por modos deslizantes cartesiano, esencial para garantizar que la asistencia o resistencia robótica se aplique de manera precisa, estable y segura, adaptándose a las necesidades dinámicas del paciente y a la inestabilidad inherente de un entorno de rehabilitación. El alcance del estudio incluye la evaluación exhaustiva de la plata-

forma mediante un laberinto virtual en modo espejo (Figura 1) que requiere coordinación mano-ojo simultánea, y se extiende a la cuantificación de la experiencia subjetiva del paciente. El uso de un ambiente virtual con elementos interactivos y visualmente atractivos permite que el usuario realice el ejercicio de forma repetitiva, manteniendo la motivación y evitando el aburrimiento, un factor común en la terapia convencional. La interacción en la plataforma bimanual implementa retroalimentación visual, auditiva y kinestésica, permitiendo al usuario *chocar* o *sentir* las partes del laberinto mediante la implementación de los dispositivos hápticos (Figura 2). Se emplea el Índice de Carga de Tareas NASA-TLX, un método psicométrico que permite evaluar las demandas mentales, físicas y el nivel de frustración percibida, proporcionando una visión sobre la eficacia clínica y la usabilidad de este innovador sistema en el contexto de la terapia repetitiva.

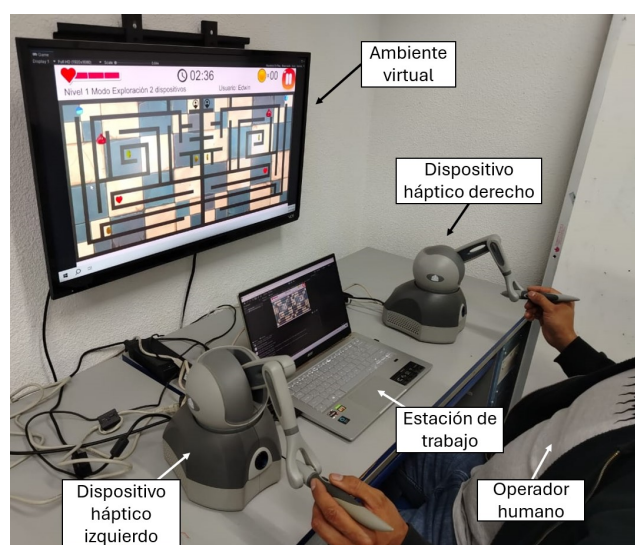


Figura 2: Plataforma háptica bimanual.

El objetivo de la presente investigación es evaluar y validar la eficacia de una plataforma de bimanual para neurorrehabilitación, basada en exergaming y dispositivos hápticos con control robusto, para mejorar la funcionalidad y coordinación de las extremidades superiores, analizando la carga de trabajo subjetiva del paciente a través del índice NASA TLX, el cual no solo se encarga de validar la viabilidad técnica y clínica de la plataforma, si no también ofrecer información sobre el diseño centrado en el paciente para futuras herramientas de rehabilitación.

De acuerdo con la investigación realizada, se muestra el proceso de análisis y validación correspondiente. La sección 2 describe el diseño de la Plataforma de Rehabilitación Bimanual y su arquitectura, detallando cada una de las ecuaciones no lineales implementadas, así como la aplicación del laberinto virtual. La sección 3 detalla la ley de control por modos deslizantes cartesiano implementada para la asistencia robótica. La sección 4 presenta la metodología experimental y los participantes. La sección 5 expone los resultados obtenidos, en los que se describe el rendimiento del laberinto como subjetivo, es decir, aplicado el método NASA TLX. Finalmente, la sección 6 presenta conclusiones y la posibilidad de dar continuidad a la investigación.

2. Materiales y métodos

La interacción bimanual humano-robot se establece mediante dos dispositivos hápticos que operan en bucle cerrado con un controlador no lineal y el operador humano en el bucle. Los comandos de movimiento (posición y velocidad) se definen con la implementación de trayectorias predefinidas al diseñar el laberinto y la implementación de un generador de tiempo base (TBG); este es el caso para la resolución de laberintos clínicamente validados (Flores *et al.* (2014)). Para ello, es necesario considerar las ecuaciones de movimiento de cada dispositivo háptico, modeladas como manipuladores robóticos con incertidumbre de fuerza de interacción en el efector final, proporcionadas por el usuario.

Un manipulador robótico es un sistema multivariable no lineal con n grados de libertad (GdL). Asociados al robot están los pares generalizados τ aplicados en las articulaciones a través de los actuadores; cada articulación está asociada a n posiciones angulares q y n velocidades angulares $\dot{q}$ (Kelly y Santibáñez (2003)).

El sistema robótico (dispositivo háptico) es un mecanismo de enlaces articulados con 6 grados de libertad (GdL), donde 3 GdL corresponden a las variables de posición de las articulaciones y 3 GdL a la orientación del efector final (condición subactuada). En el caso de estudio, las articulaciones completamente actuadas corresponden a las variables de posición, que representan los GdL de interés en la tarea de control del movimiento.

En el cálculo de la posición, se encuentra una relación entre las coordenadas cartesianas X y articulares q . Donde $X \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, el cual denota el vector de coordenadas operativas, y $q \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de coordenadas articulares. Para ello se realizan dos tipos de análisis: la cinemática directa y la inversa. Dado que la configuración del efector final se determina por las seis variables cartesianas que se controlan mediante los movimientos de las articulaciones del robot, es necesario encontrar las relaciones entre los dos conjuntos (Subir (2008)).

En la cinemática directa, las posiciones de las articulaciones ya están determinadas y el problema radica en encontrar la configuración del efector final. En la cinemática inversa, se resuelve de forma inversa, es decir, la posición del efector final está determinada y el problema radica en encontrar los ángulos de las articulaciones (Reyes (2011)).

El análisis de la cinemática del dispositivo háptico Touch y la representación de variables y constantes involucradas en el análisis se obtienen de (Jarillo-Silva *et al.* (2009)).

2.1. Modelo dinámico

El modelo dinámico es la ecuación que describe la dinámica no lineal del robot, la cual es necesaria para llevar a cabo el análisis y estudio de fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica de un robot manipulador (Reyes (2011)). La ecuación que describe la dinámica del dispositivo háptico para el estudio experimental de la propuesta de control es representada por la ecuación estándar asociada a un robot manipulador (Ecuación 1).

$$H(q_i)\ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G(q_i) + B(\dot{q}_i) = \tau_{Rob_i} + \tau_{Hum_i}, \quad (1)$$

donde i es un indicador del dispositivo utilizado sustituido ya sea por *Derecha* o *Izquierda* dependiendo del dispositivo háptico aplicado, $q \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de coordenadas articulares del robot, $\dot{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de velocidades articulares y $\ddot{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de aceleraciones articulares, $H(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de fuerzas inerciales, $C(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ la matriz que considera las aceleraciones centrífugas y de Coriolis, $G(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ el vector de efectos gravitacionales, $B(\dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de fricción viscosa-Coulomb y $\tau_{Rob} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de pares generalizados actuando en las articulaciones del robot, $\tau_{Hum} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de pares generalizados establecido por la interacción del humano con el robot. En este artículo no se muestran los valores necesarios para implementar la dinámica del robot, en caso de requerirlo, puede consultar la siguiente cita (Sansanayuth *et al.* (2012)).

Para la implementación de la plataforma háptica se resuelve con el uso de la cinemática y dinámica del robot en conjunto con la interacción del usuario. Como se observa en el esquema de la plataforma háptica bimanual (Figura 3), se obtiene la señal de control requerida por el robot (τ_{Rob}) para la realización de la tarea diseñada en ambos dispositivos hápticos. Posteriormente, se hace una conversión para la obtención de la fuerza del efector final del robot usando la Ecuación 2.

$$F_{Rob_i} = J(q_i)^{-1} \tau_{Rob_i} \quad (2)$$

donde $F_{Rob} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de fuerzas operacionales del robot, $q \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de coordenadas articulares del robot, $J(q)^{-1} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ corresponde a la inversa de la matriz Jacobiana, $\tau_{Rob} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de pares generalizados actuando en las articulaciones del robot.

2.2. Generador de Tiempo Base (TBG)

Es necesario garantizar la convergencia en tiempo finito en cada intervalo $t_0 \leq t \leq t_b$ de la trayectoria preestablecida, por lo cual se implementó $\xi(t)$, un polinomio de quinto grado (Ecuación 3) de tal modo que su derivada $\dot{\xi}(t)$ inicie en cero y finalice en cero (Ecuación 4).

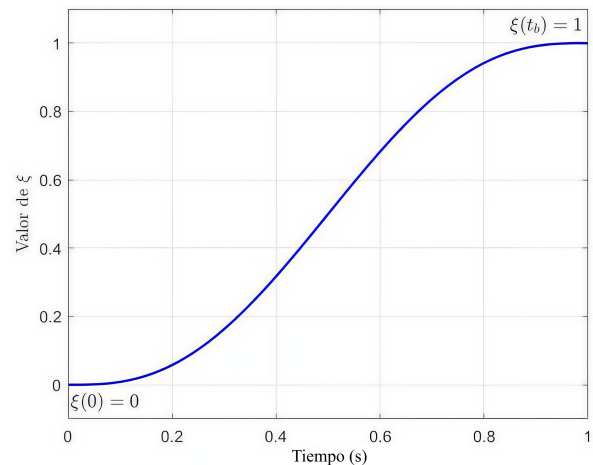


Figura 4: Respuesta del polinomio $\xi(t_b = 1)$.

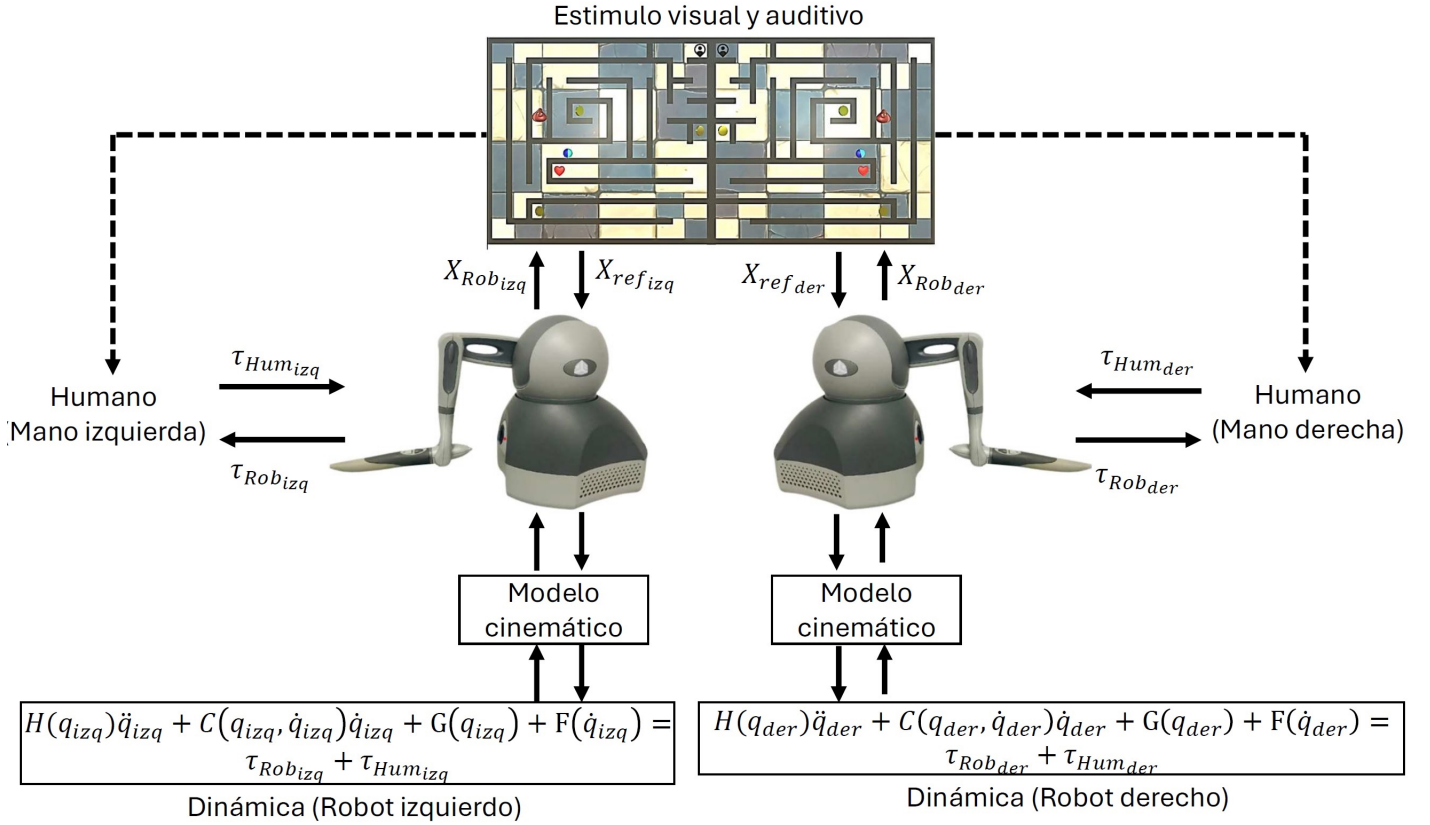


Figura 3: Esquema algorítmico de la plataforma bimanual.

$$\xi(t) = a_3 \frac{(t-t_0)^3}{(t_b-t_0)^3} - a_4 \frac{(t-t_0)^4}{(t_b-t_0)^4} + a_5 \frac{(t-t_0)^5}{(t_b-t_0)^5}, \quad (3)$$

$$\dot{\xi}(t) = 3a_3 \frac{(t-t_0)^2}{(t_b-t_0)^3} - 4a_4 \frac{(t-t_0)^3}{(t_b-t_0)^4} + 5a_5 \frac{(t-t_0)^4}{(t_b-t_0)^5}, \quad (4)$$

$$(5)$$

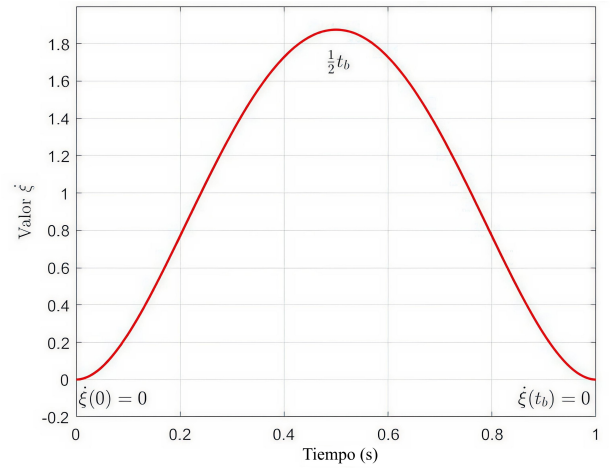
donde t es el tiempo, t_0 es el valor inicial de tiempo, $t_b > 0$ es el tiempo de convergencia para cualquier segmento de la trayectoria, el denominador $(t_b - t_0) > 0$ está definido positivo para evitar indeterminaciones y $a_3 = 10$, $a_4 = 15$, $a_5 = 6$ son los coeficientes del polinomio.

Donde los polinomios $\xi(t)$ y $\dot{\xi}(t)$ corresponden a trayectorias suaves de inicio a fin, como se muestra en las Figuras 4 y 5, evitando con esto movimientos bruscos, y su comportamiento sobre el error extendido permite romper los efectos inerciales debido al estado de reposo y movimiento (Aguilar *et al.* (2022)).

2.3. Control implementado

Se aplica el uso de un control por modos deslizantes de segundo orden, el cual es un control libre del modelo del sistema, creado para el seguimiento de trayectorias en robots manipuladores. Se distingue por su alta robustez y convergencia en tiempo finito con la propuesta del uso de la teoría de atractores terminales para generar un perfil de movimiento en robots, para mejorar el desempeño y hacer que las propiedades de estabilidad sean más fuertes. Se permite estabilidad global en el

seguimiento de trayectorias con alta mitigación de perturbaciones externas (Domínguez Ramírez *et al.* (2008)).

Figura 5: Respuesta del polinomio $\xi(t_b = 1)$

$$\begin{aligned} \tau_{Rob_i} = & -K_d J(q_i)^{-1} \Delta \dot{X}_i - K_d J(q_i)^{-1} \alpha \Delta X_i + K_d J(q_i)^{-1} S_i(t_0) e^{-k(t-t_0)} \\ & - K_d J(q_i)^{-1} \gamma \int_{t_0}^t \text{sgn}(\Delta \dot{X}_i + \alpha(t) \Delta X_i - S_i(t_0) e^{-k(t-t_0)}) dt, \end{aligned} \quad (6)$$

donde α es la ganancia de retroalimentación calculada por $K_p K_d^{-1}$, $K_d \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ y $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ son matrices de diagonales

simétricas definidas positivas, $\Delta X = X_{Rob} - X_{ref}$ representa el error de seguimiento y $\Delta \dot{X}$ el error de velocidad, $X_{Rob} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector asociado a la trayectoria real del robot, $X_{ref} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector asociado a la trayectoria de referencia, $S = \Delta \dot{X} + \alpha(t)\Delta X$ denota el error extendido y $S(t_0)$ es el valor inicial de $S(t)$ en $t = t_0$, considerando $k > 0$, $\gamma \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es una matriz diagonal definida positiva, la función $sgn(\varphi)$ representa la función discontinua de entrada $\varphi \in \mathbb{R}^3$.

Para la consulta de mayor información sobre el control, como es la prueba de estabilidad, puede consultar la siguiente referencia (Domínguez Ramírez et al. (2008)).

2.4. Modos de aplicación de la plataforma

Para la aplicación del experimento se implementaron dos modos de interacción con los dispositivos hápticos y el laberinto virtual, el modo de exploración y el modo guiado. El modo de exploración permite al usuario navegar libremente por todo el laberinto e interactuar con todos los elementos que lo conforman, incluyendo compensación de la gravedad por parte del robot. En el modo guiado, el robot lleva al usuario desde un punto inicial hasta el final del laberinto, siguiendo una trayectoria predefinida e implementando una ley de control robusta, que permita realizar adecuadamente el ejercicio a pesar de la perturbación generada por el usuario que pueda oponerse al movimiento del robot. En cada uno de los modos se obtiene información de posición, velocidad y fuerza del efector final que el robot registra en cada instante de tiempo.

2.5. Trayectorias de referencia

En este apartado se muestran las ecuaciones utilizadas para la obtención de los datos de referencia aplicados al modo guiado. Para lo cual se hace utilizando el TBG y las posiciones de los segmentos establecidas en el laberinto virtual considerando los puntos P_j a P_{j+1} donde $j = 1, 2, 3, \dots$, como se muestra en la Figura 6. A continuación se muestran las ecuaciones aplicadas para la posición de referencia y velocidad de referencia (Ecuación 7):

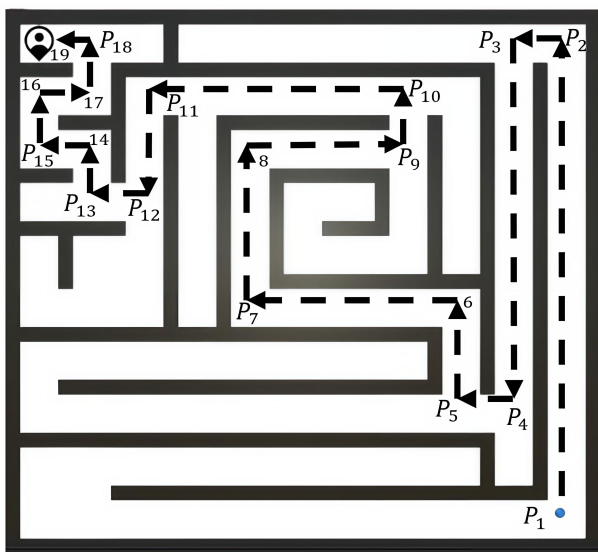


Figura 6: Trayectoria definida por el diseñador.

$$\begin{aligned} x_{ref} &= (x_f - x_0)\xi + x_0, & \dot{x}_{ref} &= (x_f - x_0)\dot{\xi}, \\ y_{ref} &= (y_f - y_0)\xi + y_0, & \dot{y}_{ref} &= (y_f - y_0)\dot{\xi}, \\ z_{ref} &= 0, & \dot{z}_{ref} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

donde x, y, z corresponden a los elementos del vector $X_{ref} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, x_0 es el valor inicial de x y x_f es su valor final en cada segmento de la trayectoria, se aplica lo mismo para los elementos y, z .

2.6. Protocolo del experimento

Se sigue un protocolo para la aplicación de la plataforma háptica. Se consideran los lineamientos adecuados para la implementación futura en pacientes con lesiones neurológicas o con discapacidad mental. Se muestra el diagrama de flujo del protocolo en la Figura 7.

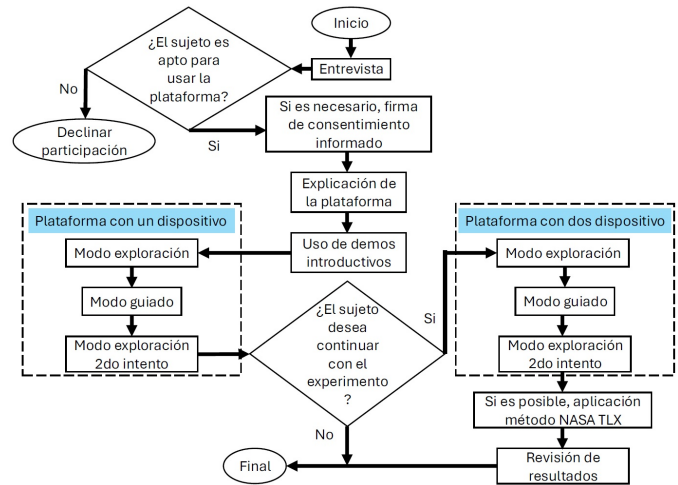


Figura 7: Diagrama de flujo del protocolo para la aplicación del experimento (Rodríguez-Hernández (2025)).

2.6.1. Entrevista y firma de consentimiento informado.

Se aplica al usuario un cuestionario que permite obtener información personal general, antecedentes médicos y antecedentes familiares. Se corrobora su aptitud para el uso de la plataforma siguiendo los siguientes criterios:

- Se recomienda la aplicación en niños de entre 7 y 15 años, a causa del bajo peso del robot de 1.42 kg y la baja fuerza máxima que este puede aplicar de 3.3 N.
- El usuario debe tener la capacidad de recibir y acatar indicaciones durante el experimento.
- Debe tener la capacidad de sostener correctamente al robot mientras este se mueve.

También se le pide que firme el consentimiento en el que tanto el usuario como su tutor están de acuerdo con la aplicación del experimento con la plataforma háptica. Un formato adecuado para su aplicación se obtiene del sitio web del Instituto Nacional de Rehabilitación (Ibarra (2024)).

2.6.2. Entendimiento interactivo de una interfaz háptica.

Se implementa el empleo de algunos ejercicios simples, como son algunos demos, que permiten facilitar el entendimiento del uso de la plataforma.

2.6.3. Uso del laberinto háptico con un dispositivo.

Los primeros ejercicios con el empleo de la plataforma háptica se realizan con el uso de un solo dispositivo, para lo cual el usuario elige usar el robot con su mano dominante. Para la aplicación se utiliza la siguiente secuencia:

1. Uso de la plataforma con el modo de exploración. Permite registrar las capacidades del usuario para realizar la tarea en el laberinto sin entrenamiento previo.
2. Uso de la plataforma con el modo guiado. Permite al usuario ser entrenado mediante el guiado por parte del robot, utilizando una trayectoria y velocidad preestablecidas para resolver el laberinto.
3. Uso de la plataforma con el modo de exploración por segunda ocasión. Permite comparar los resultados con el primer ejercicio en modo de exploración y observar los efectos del entrenamiento con el modo guiado.

2.6.4. Uso del laberinto háptico con dos dispositivos.

Se repiten los mismos pasos del punto anterior con la misma secuencia y los mismos objetivos, pero esta vez con dos dispositivos simultáneos.

2.6.5. Método NASA-TLX

Para la evaluación de la plataforma háptica se empleó el método NASA-TLX (Task Load Index) con el objetivo de evaluar la carga de trabajo mental percibida durante el uso de la plataforma háptica bimanual.

El método NASA-TLX es un método subjetivo que propone una escala de calificación multidimensional en la que se combina información sobre la magnitud y las fuentes de seis factores relacionados con la carga de trabajo para obtener una estimación sensible y fiable de la carga de trabajo. La carga de trabajo se estima mediante una media ponderada de seis subescalas: exigencia mental, exigencia física, exigencia temporal, esfuerzo, nivel de frustración y desempeño (Hart y Staveland (1988)).

- **Exigencia mental:** Este parámetro mide la actividad mental y perceptiva necesaria, por ejemplo: pensar, decidir, calcular, recordar, buscar, investigar, etc. ¿Se trata de una tarea fácil o difícil, simple o compleja, pesada o ligera?
- **Exigencia física:** Este parámetro mide el nivel de actividad física necesaria, por ejemplo: empujar, tirar, girar, pulsar, accionar, etc. ¿Se trata de una tarea fácil o difícil, lenta o rápida, relajada o cansada?
- **Exigencia temporal:** Este parámetro mide cuánta presión sintió el usuario, debido al ritmo al cual sucedían las actividades. ¿Era el ritmo lento y pausado o rápido y frenético?
- **Rendimiento:** Este parámetro se define con la pregunta: ¿Qué tan exitoso crees que fuiste al hacer lo que se solicitó y qué tan satisfecho estuviste con lo que lograste?

- **Esfuerzo:** Este parámetro mide en qué medida el usuario ha tenido que trabajar física o mentalmente para alcanzar su nivel de resultados.

- **Frustración:** Este parámetro se define con la pregunta: ¿en qué medida se ha sentido inseguro, desalentado, irritado, tenso o preocupado; o por el contrario, se ha sentido seguro, contento, relajado y satisfecho?

2.6.6. Revisión del desempeño del usuario al finalizar el experimento.

Utilizando la información de las métricas obtenidas durante la aplicación de la tarea de forma repetitiva durante un periodo definido, se lleva a cabo un estudio comparativo y estadístico, permitiendo obtener una valoración del desempeño obtenido del usuario mediante algunos parámetros basados en teoría de control, se muestra una tabla con sus características en la Tabla 1. Los parámetros son evaluados utilizando la Raíz Cuadrática Media (RMS, por sus siglas en inglés: Root Mean Square), que permite obtener el valor eficaz de una serie de valores muestreados, como se muestra en la Ecuación 8. Para el caso de la energía total consumida por el robot (E_T) se hace uso de una sumatoria, como se muestra en la Ecuación 9.

Tabla 1: Parámetros para la evaluación del desempeño del usuario.

Parámetros	Simbología	Descripción
Velocidad de movimiento RMS (m/s)	V_{RMS}	Velocidad eficaz con la que el usuario realizó el laberinto.
Fuerza RMS (N)	F_{RMS}	Fuerza eficaz del robot necesaria para realizar el ejercicio.
Error extendido RMS (m/s)	S_{RMS}	Valor eficaz del error extendido $S = \Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X$, comparando el recorrido realizado por el usuario y la trayectoria considerada como la más adecuada para cada nivel, utilizada para el control del dispositivo en el modo guiado.
Energía total consumida (J)	E_T	Es el consumo total de energía requerida por el robot durante toda la tarea, definida como la suma de la energía cinética (E_c) y potencial (E_p).
Duración del ejercicio (s)	D_T	Es el tiempo total requerido para completar el laberinto.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \|V_i\|^2} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|V_i\|^2}, \quad (8)$$

$$E_T = \int_0^T \dot{q}_i^T \tau_{Rob_i} dt \approx \sum_{i=1}^n \dot{q}_i^T \tau_{Rob_i}, \quad (9)$$

donde T representa el tiempo del experimento, n es el número de muestras, $\tau_{Rob} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de pares generalizados

actuando en las articulaciones del robot y $\dot{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es el vector de velocidades articulares del robot.

2.7. Prueba piloto de la plataforma háptica

Se estableció, de forma preliminar, una evaluación experimental de la plataforma con 11 usuarios sanos (personas sin diagnóstico de alguna enfermedad cognitiva o del sistema musculoesquelético) antes de la aplicación con pacientes con lesiones neurológicas o discapacidad mental (Figura 8). Esta prueba permite identificar posibles errores o mejoras que afecten al uso adecuado de la plataforma.



Figura 8: Voluntarios de la plataforma háptica bimanual.

Se realizó una recolección de datos mediante cuestionarios y entrevistas directas a los encuestados, de los cuales fueron 6 mujeres y 5 hombres. La Tabla 2, muestra la distribución y el número de personas con edades comprendidas entre los 16 y los 55 años, 3 personas con un rango de edad de 16 a 20 años representan un porcentaje total del 27 %; las personas con edades comprendidas entre los 21 y los 25 años, 5 personas, con un porcentaje total del 55 %; la persona con edad comprendida entre los 26 y los 30 años, 1 persona, con un porcentaje total del 9 %; la persona con edad comprendida entre los 36 y los 40 años, 1 persona, con un porcentaje total del 9 %; finalmente la persona con edad comprendida entre los 51 y los 55 años, 1 persona, con un porcentaje total del 9 %. A partir de estos datos, se puede concluir que el número de personas entre las edades de 21-25 años representa un mayor número de encuestados.

Tabla 2: Datos personales de los usuarios.

Usuario	Género	Edad (años)	Estatura (m)	Peso (kg)
1	M	23	1.74	69
2	M	22	1.76	60
3	M	22	1.72	65
4	M	17	1.72	74
5	M	23	1.64	68
6	F	16	1.57	52
7	F	37	1.60	65
8	F	28	1.60	87
9	F	16	1.63	67
10	F	21	1.65	53
11	F	53	1.45	54

Se consideró adecuado conocer información médica de los 11 participantes, como el consumo de medicamentos, los antecedentes médicos y los antecedentes familiares, con el objetivo de analizar variables personales relevantes. Estos datos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Antecedentes médicos de los usuarios.

U.	Alergias	Medicamentos actuales	Antecedentes patológicos	Antecedentes familiares
1	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes
2	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes
3	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes, hipertensión, cáncer
4	Tetraciclina	No	Ninguno	Diabetes, hipertensión
5	Ninguna	No	Ninguno	Cáncer
6	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes, cáncer
7	Ninguna	Leflunomida, deflazacor	Ninguno	Diabetes, hipertensión, cáncer
8	Ibuprofeno	Clonazepam	Asma	Diabetes, hipertensión, cáncer, enfermedades mentales
9	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes, hipertensión, cáncer
10	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes, hipertensión, cáncer
11	Ninguna	No	Ninguno	Diabetes, hipertensión, cáncer

Se presentan valores promedio y medidas de dispersión (media y desviación estándar) de las características antropométricas recolectadas en la Tabla 4. La edad de los participantes osciló entre los 16 y los 53 años. El promedio de edad fue de 25.36 años, con una desviación estándar (DE) de aproximadamente 10.86 años, indicando una muestra moderadamente dispersa en cuanto a edad. Mientras que las estaturas registradas van desde 1.45 m hasta 1.76 m. El promedio de estatura fue de 1.64 m, con una desviación estándar de ± 0.10 m, lo que sugiere una relativa homogeneidad en esta variable dentro de la muestra. El peso corporal: se obtuvieron valores entre 52 kg y 87 kg. El peso promedio fue de 63.55 kg, con una desviación estándar de ± 9.63 kg, indicando una dispersión algo mayor respecto a la estatura.

Tabla 4: Datos antropométricos.

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Edad (años)	16	53	25.36	± 10.86
Estatura (m)	1.45	1.76	1.64	± 0.10
Peso (kg)	52	87	63.55	± 9.63

De los 11 participantes, solo dos casos (18.2 %) reportaron estar bajo tratamiento médico activo:

- Usuario 7: tratamiento con deflazacort y leflunomida.
- Usuario 8: medicación con clonazepam.

Solo una usuaria (usuario 8) reportó antecedentes de asma, mientras que el 81.8 % restante indicó no tener antecedentes patológicos relevantes, marcados por la selección de la opción “Ninguna”. En relación con alergias, únicamente dos personas (18.2 %) reportaron alergia a medicamentos específicos (tetraciclina e ibuprofeno), mientras que el 81.8 % restante no presentó alergias conocidas.

Mediante los resultados obtenidos existe una alta prevalencia de enfermedades crónicas como diabetes e hipertensión en los antecedentes familiares, lo cual sugiere una carga genética significativa entre los usuarios evaluados. A pesar de que el 81.8 % no presenta enfermedades actuales ni uso de medicamentos, la presencia de antecedentes podría implicar riesgo futuro. La edad de inicio de seguimiento (desde los 16 años) permite una posible intervención preventiva si se continúa el monitoreo. Sin embargo, la condición física y los antecedentes médicos de los usuarios no sesgaron el resultado de la evaluación de la plataforma de interacción física.

2.7.1. Ejemplo de la aplicación del NASA-TLX

Exigencia Mental ¿Que tan demandante mentalmente es la tarea? 	Exigencia Física ¿Que tan demandante físicamente es la tarea?
Exigencia Temporales ¿Que tan fuerte o rapido es el ritmo impuesto para hacer la tarea? 	Rendimiento ¿Que tan exitoso ha sido para lograr lo que ha requerido?
Esfuerzo ¿Que tan duro tiene que trabajar para lograr un adecuado nivel de rendimiento? 	Nivel de Frustración ¿Que tan inseguro, irritado o estresado y molesto esta por la tarea?

Figura 9: Calificación de las seis subescalas del método NASA-TLX.

Para este estudio se aplicó una versión en línea del método NASA-TLX (ISL (2025)). La cual permite agilizar el proceso de evaluación y evitar problemas de tiempo que puedan ocurrir con algún participante. La página web aplica la forma inicial del método original, en la cual se califica cada una de las 6 subescalas con valor de 1 a 20 puntos según la percepción del usuario (Figura 9) y se realiza una comparación por pares entre cada una de las 6 subescalas (Figura 10). Para la evaluación final, se agregó un paso extra que permite seguir la metodología del método NASA-TLX que la página web no realiza, la cual consta de dividir la suma final sobre 15 siguiendo la metodología original y permite obtener una puntuación media de la carga de trabajo ponderada (WWL, por sus siglas en inglés: weighted workload), esta puntuación proporciona información

sobre el nivel de la carga de trabajo implicada en la tarea específica que se desea evaluar. Se calcula la WWL a partir de la información obtenida en la primera etapa del método. Se establece una carga mental baja con una puntuación menor a 33 %, media de 33 a 66 % y alta con más del 66 %. En caso de una carga baja, no se requiere hacer cambios, para la carga media se recomienda establecer estrategias para bajar el valor obtenido y en caso de carga alta, se requerirán cambios importantes en la plataforma. En este caso, se ejemplificó el procedimiento utilizando los datos de uno de los voluntarios con la mayor carga mental, presentados en la Tabla 5.

☒ Exigencias Mentales ☐ Exigencias Físicas	☐ Exigencias Físicas ☒ Exigencias Temporales	☒ Exigencias Temporales ☐ Esfuerzo
☒ Exigencias Mentales ☐ Exigencias Temporales	☐ Exigencias Físicas ☒ Rendimiento	☒ Exigencias Temporales ☐ Nivel de Frustración
☒ Exigencias Mentales ☐ Rendimiento	☐ Exigencias Físicas ☒ Esfuerzo	☒ Rendimiento ☐ Esfuerzo
☒ Exigencias Mentales ☐ Esfuerzo	☐ Exigencias Físicas ☒ Nivel de Frustración	☒ Rendimiento ☐ Nivel de Frustración
☒ Exigencias Mentales ☐ Nivel de Frustración	☒ Exigencias Temporal ☐ Rendimiento	☒ Esfuerzo ☐ Nivel de Frustración

Figura 10: Comparaciones por pares del método NASA-TLX.

Tabla 5: Cálculo de la puntuación para el nivel de carga mental del usuario.

Variable	a) Peso	b) Puntuación	c) Puntuación convertida (b*5)	d) Puntuación ponderada (c*a)
Exigencia mental	5	8	40	200
Exigencia física	0	11	55	0
Exigencia temporal	4	15	75	300
Rendimiento	3	19	95	285
Esfuerzo	2	11	55	110
Frustración	1	6	30	30
Suma				925
Pesos (Total)				15
Puntuación media WWL				61

2.8. Resultados del método NASA-TLX

Se recolectaron los resultados del método NASA-TLX de los 11 usuarios de la aplicación en la Tabla 6. La puntuación media WWL mostró una amplia variabilidad entre los participantes, con valores que van desde el 5 hasta 61 %. Se clasificó la carga percibida en tres niveles: baja, media y alta. El 63.6 % de los participantes presentó un nivel de carga mental baja, el

Tabla 6: Resultados del método NASA-TLX.

Usuario	Puntuación media WWL (%)	Exigencia mental	Exigencia física	Exigencia temporal	Rendimiento	Esfuerzo	Frustración
1	5	20	5	10	10	10	20
2	48	120	250	220	0	80	50
3	61	200	0	300	285	110	30
4	5	5	25	10	15	20	0
5	17	50	165	10	25	15	0
6	42	100	90	110	135	0	195
7	38	320	0	210	10	5	25
8	27	225	10	20	0	5	150
9	12	100	30	25	15	10	0
10	27	225	10	20	0	5	150
11	17	10	15	195	15	15	5

36.4 % un nivel medio, y un 9 % estuvo a punto de alcanzar el umbral considerado como carga alta, lo que sugiere una distribución equilibrada en cuanto a la percepción de carga mental.

- **Exigencia mental:** Los valores fluctuaron entre 5 y 320. El caso con mayor exigencia mental fue el participante 7 (320).
- **Exigencia física:** La mayoría de los participantes reportó bajos niveles de exigencia física. Los valores más altos se registraron en los usuarios 2 (250) y 5 (165).
- **Exigencia temporal:** Se observaron picos elevados en los usuarios 2 (220), 3 (300) y 7 (210), lo que sugiere que la percepción de presión temporal puede ser un factor determinante en el incremento de la carga mental.
- **Rendimiento:** Esta dimensión mostró gran dispersión, con valores desde 0 hasta 285, siendo el usuario 3 quien reportó el máximo valor.
- **Esfuerzo:** Destaca el usuario 3, con valor de 110, lo cual se correlaciona con sus niveles de carga media.
- **Frustración:** En general, los niveles de frustración fueron bajos en la mayoría de los casos, con excepción del usuario 6 (195) y el usuario 8 (150), lo que puede indicar la existencia de factores individuales o contextuales que afectaron su experiencia subjetiva de la tarea.

No se identificaron patrones claros en cuanto a la influencia del género o edad sobre el nivel de carga percibido, aunque los valores extremos de WWL se presentaron tanto en participantes jóvenes (usuario 3, 22 años) como en adultos (usuario 7, 37 años), lo que sugiere que las diferencias individuales y la familiaridad con la tarea podrían tener mayor peso que las variables demográficas.

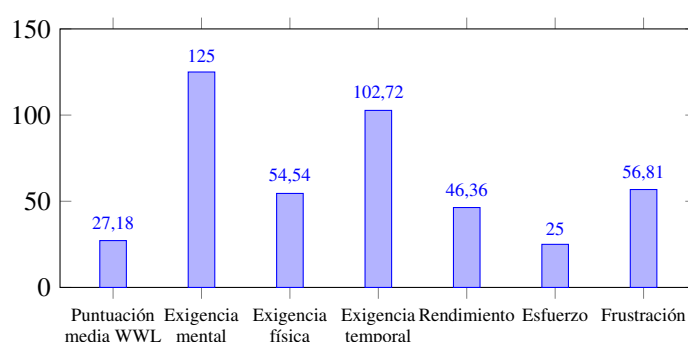


Figura 11: Análisis del promedio obtenido de las personas encuestadas, dado por cada parámetro del método NASA-TLX.

Se estableció una gráfica de barras en la cual se muestran valores promedio de WWL y las 6 subescalas del método (Figura 11). Se identificó un valor promedio de la puntuación media WWL de 27.18 puntos, lo cual representa una carga baja en la mayoría de los usuarios. Sin embargo, se evidenciaron niveles elevados de exigencia temporal y exigencia mental, los cuales podrían afectar al aumento del nivel de carga mental. En general, el método NASA-TLX muestra que la plataforma es adecuada para usuarios sanos. En las futuras evaluaciones en pacientes se espera que los niveles de carga mental puedan aumentar, por lo cual será necesario aplicar cambios y estrategias que permitan disminuir estos valores.

3. Resultados experimentales

En esta sección se analizan los datos obtenidos de los usuarios y su desempeño con el uso de la plataforma bimanual. Las trayectorias de todos los usuarios en el modo de exploración se visualizan en la Figura 12 con el uso de la mano izquierda y en la Figura 13 para la mano derecha. La forma de resolver el laberinto en modo de exploración se realizó de forma diversa por parte de los usuarios, donde algunos prefirieron realizar el ejercicio una mano a la vez o ambas manos de forma simultánea. Con el uso del modo guiado la respuesta es más clara (Figuras 14 y 15), al aplicarse en personas sanas, el recorrido de la trayectoria se hace de forma correcta con pocas interferencias por parte de los usuarios, permitiendo que este modo sea

adecuado para el entrenamiento de los usuarios y mejorar sus habilidades en el modo exploración.

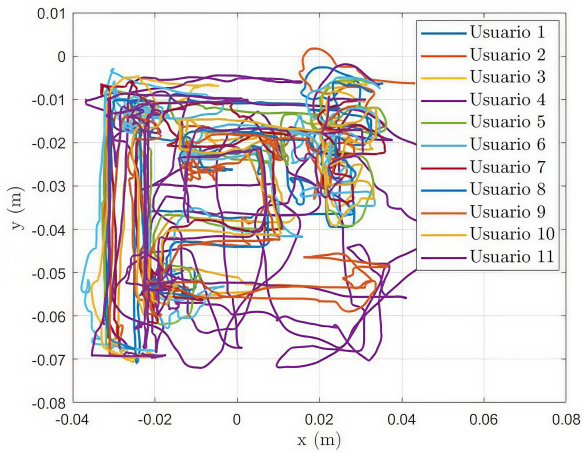


Figura 12: Plano de trabajo del recorrido de los voluntarios en el laberinto usando el modo de exploración con la mano izquierda.

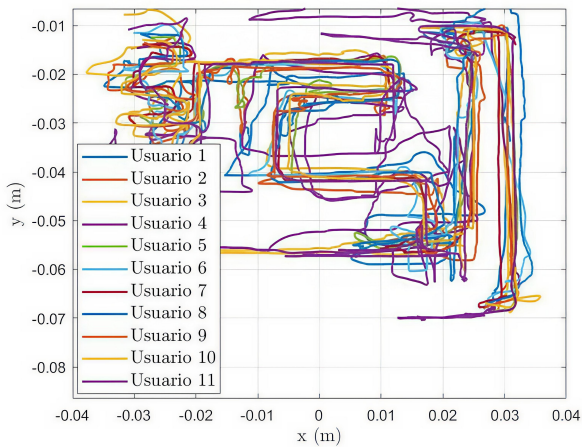


Figura 13: Plano de trabajo del recorrido de los voluntarios en el laberinto usando el modo de exploración con la mano derecha.

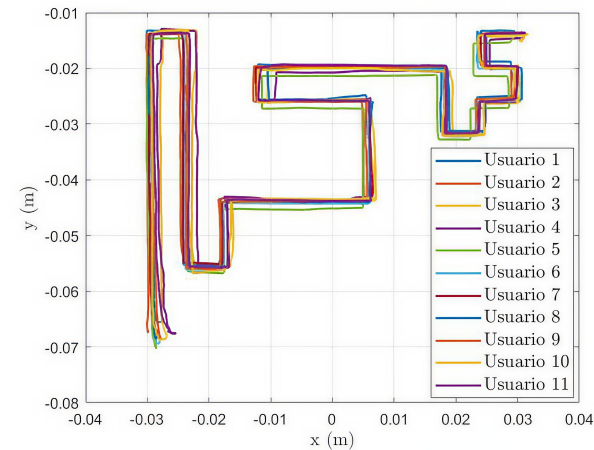


Figura 14: Plano de trabajo del recorrido de los voluntarios en el laberinto usando el modo guiado con la mano izquierda.

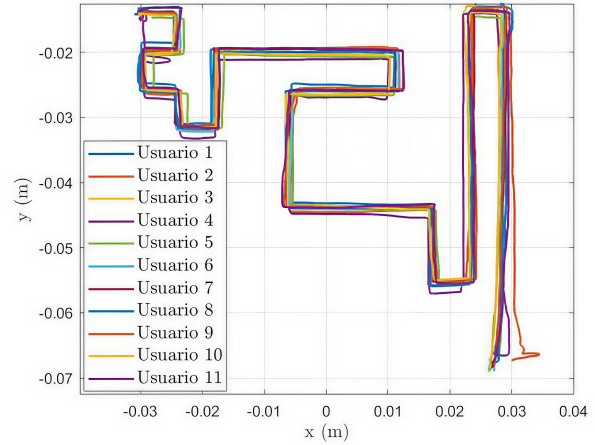


Figura 15: Plano de trabajo del recorrido de los voluntarios en el laberinto usando el modo guiado con la mano derecha.

Para obtener una nueva perspectiva del desempeño de la plataforma con el modo guiado, se tomaron algunos datos del robot en estado libre y se compararon con el comportamiento al interactuar con un usuario. El resultado del plano de trabajo se muestra en la Figura 16, donde se puede visualizar un adecuado comportamiento en las diferentes condiciones de uso. En la Figura 17 se muestra el comportamiento de la velocidad, donde se aplicó una velocidad media de 0.017 m/s para toda la trayectoria y a pesar del ruido de la señal, la plataforma funciona correctamente. En las Figuras 18, 19 y 20 se muestra la comparación de fuerzas y energías consumidas por el robot con y sin usuario, y el error durante el modo guiado. En las cuales se puede ver un comportamiento similar en las señales, como también algunas oscilaciones indeseadas en la señal generada por el robot en modo libre, esto a causa de la baja fricción en las articulaciones y al trabajar sin un usuario, el robot requiere mayor aplicación de fuerza y energía para estabilizar al robot y aun mantener el error menor a 1 m/s.

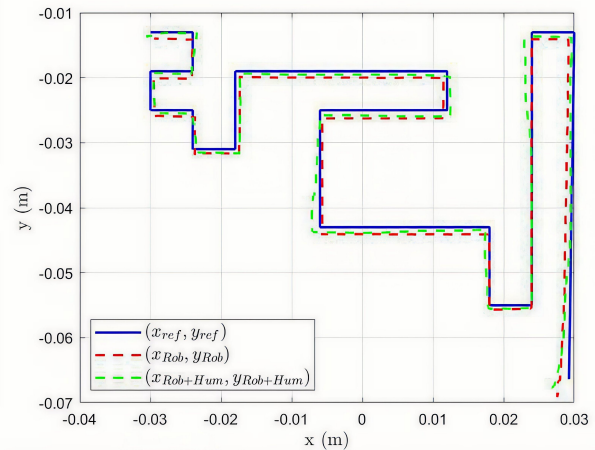


Figura 16: Comparación del uso de la plataforma en diferentes condiciones en el plano de trabajo.

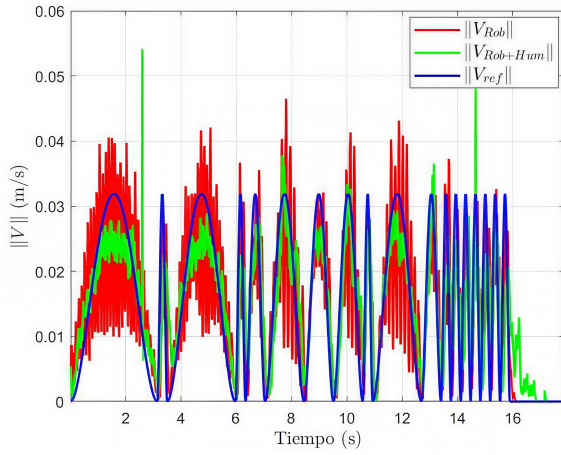


Figura 17: Comparación de la norma de velocidad $\|V\|$ en distintas condiciones.

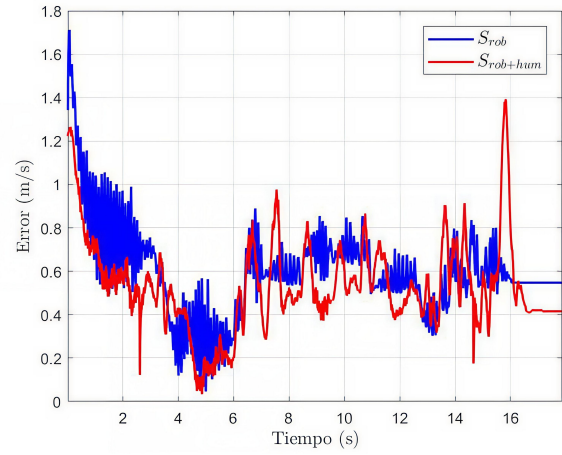


Figura 20: Comparación del error extendido $S = \Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X$ en distintas condiciones.

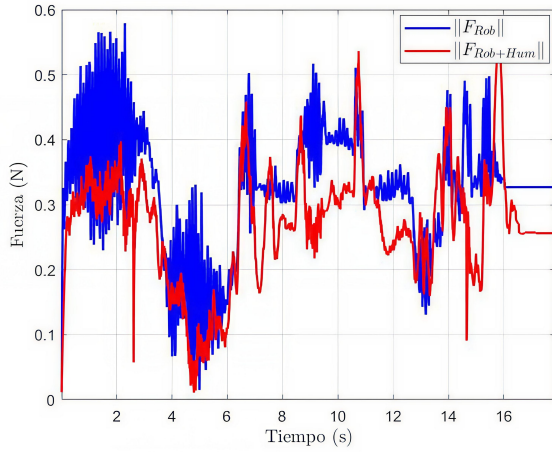


Figura 18: Comparación de la norma de fuerza $\|F\|$ en distintas condiciones.

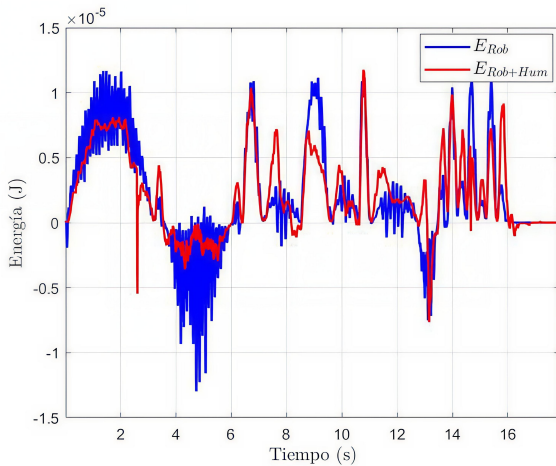


Figura 19: Comparación de la energía consumida por el robot ($E = E_c + E_p$) en distintas condiciones.

Se puede observar que la capacidad del sistema para mantener la estabilidad a pesar de condiciones variables. En el contexto de rehabilitación, esto significa que la fuerza aplicada al usuario es adecuada para el seguimiento de la trayectoria, lo cual, en caso de su aplicación en pacientes, es crucial para la dosificación terapéutica.

3.1. Resultados del desempeño del usuario

Se le realizó 3 veces el experimento a un mismo usuario, empezando con la aplicación de modo exploración (E1) y continuando con el modo guiado (G1) y después alternando cada uno de los modos de la plataforma hasta terminar con la tercera ronda del modo guiado (G3), realizando pequeños descansos de 5 minutos entre cada experimento. En la Figura 21, se analiza la velocidad del usuario diferenciando entre mano izquierda y derecha, donde se puede ver que conforme avanzan las etapas de exploración, la velocidad del usuario empieza a aumentar con su mano derecha y los resultados del modo guiado se mantienen muy similares. En el diagrama de la Figura 22, se observa que la fuerza del robot en el modo exploración se mantiene muy similar, esto ya que únicamente se aplica compensación del efecto de la gravedad para este modo, mientras que en el modo guiado el usuario empezó a aplicar mayor oposición al movimiento del robot, provocando que este aplicara más fuerza para compensar la perturbación. En la Figura 23, se puede ver que en el modo de exploración el usuario presenta un error alto en la primera etapa del ejercicio, pero ese error disminuye al pasar a las siguientes etapas, y en el modo guiado el error se mantiene pequeño. En la Figura 24, se puede apreciar que el consumo de energía del robot es variado en el modo de exploración, pero en el modo guiado aumenta conforme avanzan las etapas. Esto se debe a que la fuerza aplicada por el usuario se contrapone a la del robot, causando mayor consumo de energía. Para este caso, como se puede observar en la Figura 25, el tiempo para la resolución del nivel también fue disminuyendo conforme avanzan las etapas de exploración.

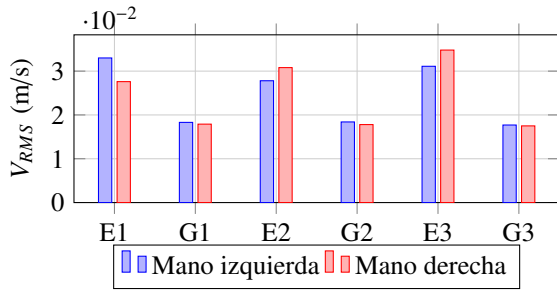


Figura 21: Diagrama comparativo de velocidad.

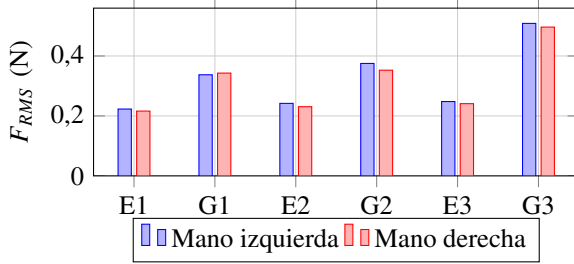


Figura 22: Diagrama comparativo de fuerza.

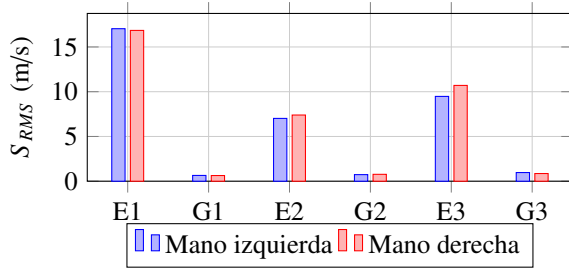


Figura 23: Diagrama comparativo del error.

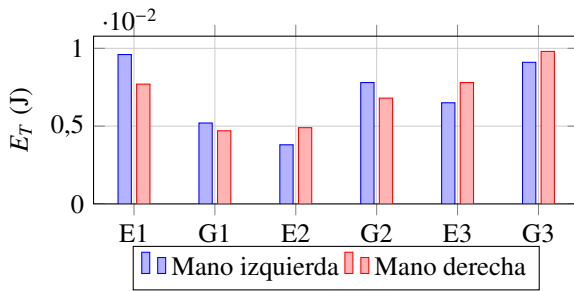


Figura 24: Diagrama comparativo de la energía total.

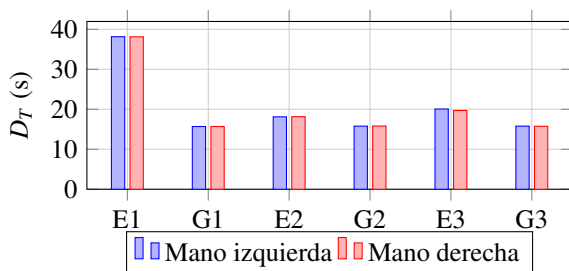


Figura 25: Diagrama comparativo de duración total del nivel.

Tabla 7: Respuesta experimental de la dinámica en el modo de exploración de la población evaluada.

U.	V_{RMS} (m/s)	F_{RMS} (N)	S_{RMS} (m/s)	E_T (J)	D_T (s)
1	0.031	0.221	21.052	0.034	131.12
2	0.036	0.269	20.864	0.073	159.63
3	0.023	0.228	19.5029	0.0335	202.98
4	0.034	0.232	21.843	0.122	195.03
5	0.019	0.228	18.770	0.034	198.66
6	0.024	0.234	20.848	0.05	283.82
7	0.019	0.219	19.202	0.029	174.07
8	0.019	0.226	19.681	0.04	176.52
9	0.021	0.242	17.34	0.03	158.16
10	0.018	0.231	19.164	0.031	221.86
11	0.017	0.219	21.55	0.036	223.43

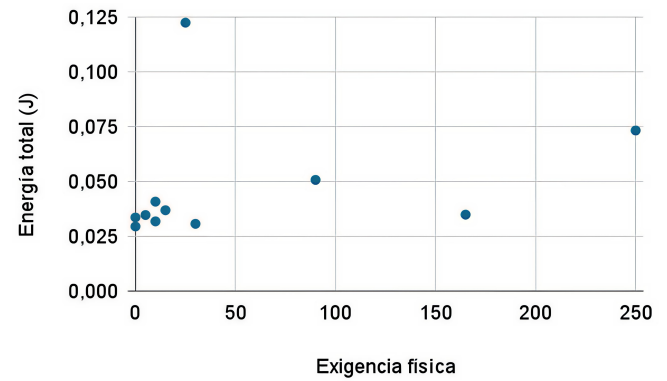


Figura 26: Relación de energía total y exigencia física.

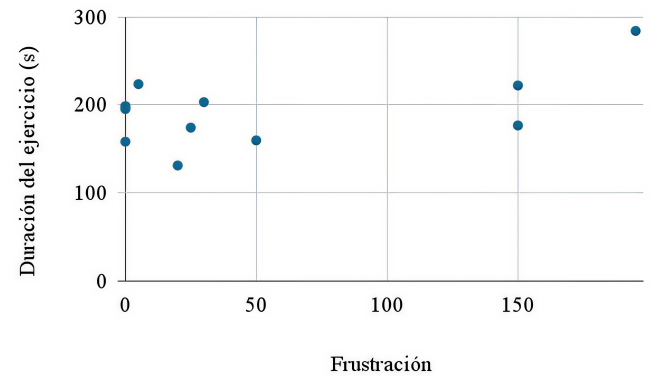


Figura 27: Relación de la duración del ejercicio y frustración.

El análisis de la información generada tanto de la evaluación del protocolo NASA TLX, con la evaluación del método de entrenamiento cognitivo con el sistema exergaming propuesto; estuvo basado en el comparativo de las Tablas 6 y 7. En esta evaluación, es posible apreciar una relación estrecha entre la conducta de la energía total asociada a la dinámica del dispositivo como sensor de estado, y la subescala de la exigencia física

(Figura 26); es decir, es apreciable verificar una proporcionalidad entre ambos resultados. De manera similar, en la Figura 27, es posible apreciar que el tiempo de ejecución o permanencia en la búsqueda de la solución del laberinto es determinante en el nivel de frustración que abona en el porcentaje total de la carga mental. En ambos casos, las variables de la dinámica y las subescalas mencionadas guardan una relación estrecha; tal que una puede conducir a predecir la otra sin necesidad de evaluarla.

4. Conclusiones

La presente investigación logró con éxito el desarrollo e implementación de una plataforma de neurorehabilitación que integra el exergaming con la asistencia robótica de dispositivos hápticos. La implementación del Control por Modos Deslizantes Cartesiano demostró una estabilidad superior y una mitigación efectiva de la incertidumbre dinámica. Se logró un error de seguimiento de trayectoria promedio del efector final de sólo 0.005 mm bajo condiciones de perturbación (fuerzas externas simuladas), lo que representa una reducción de al menos el 50 % en el error de seguimiento comparado con un controlador PID convencional. La implementación de una plataforma bimanual con pacientes permite la neurorehabilitación aplicando ejercicios físicos y de razonamiento lógico de forma repetitiva. También permite recopilar información del desempeño del paciente y obtener una valoración física y mental, permitiendo dar una valoración confiable por parte de un especialista. Gracias a la aplicación del método NASA-TLX se puede valorar la experiencia del usuario durante la realización del ejercicio y, si es el caso, identificar cualidades de la plataforma que se necesitan modificar. Para este caso no se identificó ningún patrón entre los usuarios que indique que algún aspecto de la plataforma sea inadecuado, pero aún es necesaria la aplicación de más pruebas tanto en personas sanas como en pacientes para poder asegurar el desempeño de la plataforma como herramienta médica. Es importante mencionar que antes de realizar las pruebas correspondientes a cada usuario, previamente se les dio una breve introducción acerca del funcionamiento del sistema, ya que la mayor parte de los usuarios desconocen la implementación de los robots con ambiente virtual. El análisis de la puntuación media WWL reveló que la plataforma es altamente tolerable. La puntuación global promedio fue de 27.18 (en una escala de 100). Específicamente, la exigencia física se mantuvo en un promedio de 54 puntos, y el nivel de esfuerzo fue el más bajo de todas las escalas, con 25 puntos en promedio, indicando una alta usabilidad y aceptación por parte de los usuarios. Estos resultados prevén que la plataforma será una herramienta útil y bien aceptada para la neurorehabilitación de extremidades superiores, demostrando que la integración de control robusto y exergaming ofrece un equilibrio entre desafío motriz y compromiso del paciente.

Referencias

3D Systems, I. (2025). Touch dispositivo háptico. <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch>.

- Agata, P., Sergio, R., Martino, R., Amalia, E. G., Cristiano, M. V., y Marco, I. (2024). Efficacy of videogames and exergames in pediatric neurorehabilitation: a systematic review. *Minerva Pediatr (Torino)*, 76(5):690–702. doi: 10.23736/S2724-5276.23.07146-X.
- Aguilar, J. V., Domínguez-Ramírez, O. A., y J., P.-R. (2022). Control pid deslizante con generador de tiempo base para un sistema de levitación magnética. *Publicación semestral Padi Vol. 10 No. Especial 5*. DOI: 10.29057/jicbi.v10iEspecial5.10203.
- Aparicio-Juárez, J., Domínguez-Ramírez, O. A., y Escotto-Córdova, E. A. (2024). Tecnologías emergentes en el diagnóstico y tratamiento del tdah. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(23):9–19.
- Barry, G., Galna, B., y Rochester, L. (2014). The role of exergaming in parkinson's disease rehabilitation: a systematic review of the evidence. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, p. 7:11:33. DOI: 10.1186/1743-0003-11-33.
- Candice, S., Luanna, B., Maria, C., Thaiana, B., Rummenigge, R., y Fabrícia, A. (2024). A systematic review of exergame usability as home-based balance training tool for older adults usability of exergames as home-based balance training. *PLoS ONE*, 19(8). DOI: 10.1371/journal.pone.0306816.
- Chow, D. H. K. y Mann, S. K. F. (2023). Exergaming and education: a relational model for games selection and evaluation. *Front. Psychol.*, p. 14:1197403. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.1197403.
- Domínguez Ramírez, O. A., Parra Vega, V., Díaz Montiel, M. G., Pozas Cárdenas, M. J., y Hernández Gómez, R. A. (2008). Cartesian sliding pd control of robot manipulators for tracking in finite time: Theory and experiments. *DAAAM International*, pp. 257–272. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2008.23.
- Flores, J., Ostrosky, F., y Lozano, A. (2014). *BANFE-2 Batería Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales*. El Manual Moderno, México.
- Gillian, B., Brook, G., y Lynn, R. (2014). The role of exergaming in parkinson's disease rehabilitation: a systematic review of the evidence. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11:33. <http://www.jneuroengrehab.com/content/11/1/33>.
- Hart, S. G. y Staveland, L. E. (1988). Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. *Human Mental Workload*, p. 139–183. DOI: 10.1016/s0166-4115(08)62386-9.
- Ibarra, L. G. (2024). Carta de consentimiento informado. <https://www.inr.gob.mx/Descargas/Investigacion/FORMATO-CONSENTIMIENTO-INFORMADO.docx>.
- ISL (2025). Método nasa tlx (task load index). https://ergomedia.isl.gob.cl/app_ergo/nasatlx/. (Accessed on 26/06/2025).
- Jarillo-Silva, A., Domínguez-Ramírez, O., Parra-Vega, V., y Ordaz-Oliver, P. (2009). Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, pp. 193–198. DOI: 10.1109/CERMA.2009.55.
- Jarillo-Silva, A., Domínguez-Ramírez, O. A., y Parra-Vega, V. (2010). Haptic training method for a therapy on upper limb. En *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, volumen 4, pp. 1750–1754.
- Kelly, R. y Santibáñez, V. (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson Educación, S.A., Madrid.
- Muhammad, A. T., Emad, A. A., Hammad, A. F., y Muayad, S. A. (2023). Application of virtual reality-assisted exergaming on the rehabilitation of children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*, 12:7091. DOI: 10.3390/jcm12227091.
- Polizzi, A., Rinella, S., Ruggieri, M., Gentile, A. E., Verrelli, C. M., e Iosa, M. (2024). Efficacy of videogames and exergames in pediatric neurorehabilitation: a systematic review. *Minerva Pediatr (Torino)*, pp. 690–702. DOI: 10.23736/S2724-5276.23.07146-X.
- Reyes, F. (2011). *Robótica: Control de Robots Manipuladores*. Alfaomega, S.A. de C.V., México.
- Rodríguez-Hernández, E. (2025). Exergaming basado en sincronización háptica para ejercicios de rehabilitación en miembro superior de niños con discapacidad cerebral: evaluación y análisis. Tesis de máster, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. DOI: 10.13140/RG.2.2.10676.72322.
- Sansanayuth, T., Nilkhamhang, I., y K., T. (2012). Teleoperation with inverse dynamics control for phantom omni haptic device. *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, Akita, Japan, pp. 2121–2126.
- Subir, K. S. (2008). *Introducción a la robótica*. McGraw-Hill, México, D.F.