UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

## Tesis

# EXERGAMING BASADO EN SINCRONIZACIÓN HÁPTICA PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN EN MIEMBRO SUPERIOR DE NIÑOS CON DISCAPACIDAD CEREBRAL: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Automatización y Control

PRESENTA

M. en C. Edwin Rodríguez Hernández

Director:
Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez

Codirector:
Dr. Alejandro Jarillo Silva
Dr. Juan Daniel Ramírez Zamora

Pachuca de Soto, Hgo., México 4 de septiembre de 2025

M. en C. Edwin Rodríguez Hernández

# Exergaming basado en Sincronización Háptica para Ejercicios de Rehabilitación en Miembro Superior de Niños con Discapacidad Cerebral: Evaluación y Análisis

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
*School of Engineering and Basic Sciences*
Área Académica de Computación y Electrónica
*Department of Electronics and Computer Science*

Mineral de la Reforma Hidalgo, a 26 de agosto de 2025

**Número de control:** ICBI-AACyE/1853/2025
**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado **"EXERGAMING BASADO EN SINCRONIZACIÓN HÁPTICA PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN EN MIEMBRO SUPERIOR DE NIÑOS CON DISCAPACIDAD CEREBRAL: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS"**, realizado por el sustentante **Edwin Rodríguez Hernández** con número de cuenta 502288, perteneciente al programa de la Maestría en Ciencias en Automatización y Control, una vez que se ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente.

**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Por lo que el sustentante deberá cumplir con los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

**Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez**
**Director de Tesis**

**Dr. Alejandro Jarillo Silva**
**Codirector de Tesis**

**Comité Tutorial**

| | | |
|---|---|---|
| Dr. Félix Agustín Castro Espinoza | Presidente | UAEH |
| Dr. Eduardo Cornejo Velázquez | Secretario | UAEH |
| Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez | Vocal 1 | UAEH |
| Dr. Omar Sandre Hernández | Vocal 2 | UAEH |
| Dr. Alejandro Jarillo Silva | Vocal 3 | UNSIS |
| Dr. Juan Daniel Ramírez Zamora | Suplente | UAEH |

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40052, 40053
aacye_icbi@uaeh.edu.mx, jesus_ordaz@uaeh.edu.mx

*Esta tesis se la quiero dedicar a mi querida*
*familia que siempre ha estado a mi lado.*
*Mis padres y mis tías, quienes me educaron y cuidaron,*
*gracias a ustedes estoy en esta etapa de mi vida,*
*me impulsaron a superar cada percance y dificultad.*
*Gracias a ustedes, hoy soy una persona que se enorgullece de quién es.*

Gracias a

**CITIS - UAEH** por la formación académica brindada a lo largo de mi estancia en sus instalaciones, y de manera particular a su laboratorio de robótica avanzada e interfaces hápticas, por el apoyo durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

# Agradecimientos

Me gustaría expresar mis agradecimientos a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, la cual me proporcionó los medios necesarios para culminar de forma exitosa la *Maestría en Automatización y Control*.

Les agradezco a mis padres Pedro Rodríguez Hernández y Juana Nely Hernández Juárez, por su amor y apoyo incondicional, quienes siempre me apoyaron a tomar las mejores decisiones y me inculcaron a aprender todo tipo de conocimiento nuevo que me pudiera servir en la vida y no sufrir en un futuro. Así como también a mis tías, Elva Rodríguez Hernández, Rocío Rodríguez Hernández y Hortencia Rodríguez Hernández, las cuales siempre me procuraron y cuidaron en todo sentido, nunca me dejaron solo y siempre estuvieron apoyándome, aunque fuera difícil. A mi hermana Ailin Rodríguez Hernández y a todos mis primos, quienes, además de ser parte de mi familia, también han sido como amigos que permanecen a mi lado en los momentos buenos y malos.

A mi director de tesis, el Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez, quiero expresarle mi respeto y agradecimiento. Lo considero un excelente profesor y educador, quien gracias a toda su trayectoria a lo largo de los años lo ha convertido en una persona de gran valor. Me siento muy feliz de trabajar con usted y contribuir a la sociedad en temas de investigación tan importantes.

A mis codirectores, el Dr. Alejandro Jarillo Silva y el Dr. Juan Daniel Ramírez Zamora. Quienes me estuvieron apoyando en el desarrollo de mi tesis, siempre dando todo tipo de

consejos e información adecuada, impulsándome a hacer un buen trabajo de investigación con resultados satisfactorios.

A mis sinodales, el Dr. Omar Sandre Hernández, el Dr. Eduardo Cornejo Velázquez y el Dr. Félix Agustín Castro Espinoza. Le agradezco el tiempo y la dedicación que usaron para revisar, evaluar y juzgar este trabajo de investigación. Permitiendo crear un documento de calidad, útil para otras personas.

Finalmente expreso mi gratitud a mis catedráticos y compañeros de clase. Quienes me permitieron trabajar en un ambiente sano y rico en conocimiento y de este modo trabajar con motivación.

# Resumen


## Exergaming basado en Sincronización Háptica para Ejercicios de Rehabilitación en Miembro Superior de Niños con Discapacidad Cerebral: Evaluación y Análisis

Esta tesis constituye la evaluación y el análisis de datos en pacientes niños con discapacidad cerebral de centros de rehabilitación clínicamente diagnosticados. Adicionalmente, las contribuciones están asociadas a: 1) la creación de un ambiente de realidad virtual basada en laberintos para interacción háptica bimanual asociada al caso de estudio; 2) la consolidación del modelo matemático, el control y la planificación de movimiento tanto para exploración háptica, como para guiado háptico pasivo; 3) el consentimiento informado para la evaluación en humanos; 4) la selección de métricas para el análisis de datos; son algunas de las actividades complementarias para el desarrollo de la investigación.

En este documento de tesis, se presentan evidencias de la validación de los modelos matemáticos (cinemática y dinámica) de la plataforma robótica de estudio; así como la aplicación de un control PD plus (compensación dinámica del efecto gravitacional e inyección de fricción viscosa articular), como también el uso de un control por modos deslizantes con Generador de Tiempo Base, para regulación y seguimiento. Se considera como tarea de seguimiento a una rosa de 8 pétalos para verificar los efectos de la manipulabilidad, cinemática y dinámica del robot en lazo cerrado de control. Se implementa el diseño del ambiente virtual con el uso de 5 diferentes laberintos, con el uso de recomendaciones de creación de juegos serios y el uso del control con trayectorias predefinidas, con la aplicación inicial en usuarios sanos.

# Abstract


## Exergaming based on Haptic Synchronization for Exercises Rehabilitation of the Upper Limb of Children with Disabilities Brain: Evaluation and Analysis

This thesis constitutes the evaluation and analysis of data in clinically diagnosed child patients with brain disabilities from rehabilitation centers. Additionally, the contributions are associated with 1) the creation of a virtual reality environment for bimanual haptic interaction associated with the case study; 2) the consecration of the mathematical model, control, and planning of movement for both haptic exploration and passive haptic guidance. 3) Informed consent for human evaluation. 4) Selection of metrics for data analysis; these are some of the complementary activities for the development of research.

In this thesis, evidence is presented of the validation of the mathematical models (kinematics and dynamics) of the robotic platform under study; as well as the application of a PD plus control (dynamic compensation of the gravitational effect and injection of viscous joint friction), as well as the use of a sliding mode control with a Time-Base Generator for regulation and tracking. An 8-petal rose is considered a tracking task to verify the effects of the robot's manipulability, kinematics, and dynamics in a closed-loop control. The virtual environment is designed using 5 different mazes, incorporating recommendations for creating serious games and employing control with predefined trajectories, with an initial application in healthy users.

# Índice general

Resumen . . . . . xiii
Abstract . . . . . xv
Índice general . . . . . xvii
Índice de figuras . . . . . xxi

**1. Introducción** **1**
1.1. Breve descripción sobre las contribuciones de los exergames en rehabilitación 1
1.2. Antecedentes . . . . . 2
1.3. Parálisis cerebral (PC) . . . . . 3
1.4. La realidad virtual (RV) . . . . . 4
1.5. Exergame basado en exploración y guiado háptico . . . . . 4
1.6. Plataforma háptica exergaming bimanual . . . . . 6
1.7. Planteamiento del problema . . . . . 10
1.8. Justificación . . . . . 10
1.9. Solución propuesta . . . . . 11
1.10. Objetivos . . . . . 12
1.10.1. Objetivo general . . . . . 12
1.10.2. Objetivos particulares . . . . . 12
1.11. Contribuciones . . . . . 12
1.12. Organización de la tesis . . . . . 13

**2. Modelos matemáticos y control de movimiento** **15**
2.1. Introducción . . . . . 15
2.2. Especificaciones técnicas de la plataforma exergaming . . . . . 15
2.2.1. Dispositivo háptico Touch . . . . . 15
2.2.2. Software y hardware utilizados . . . . . 17
2.3. Modelo cinemático . . . . . 17
2.3.1. Modelo cinemático directo de posición (MCDP) . . . . . 18
2.3.2. Modelo cinemático inverso de posición (MCIP) . . . . . 19

2.3.3. Modelo cinemático directo de velocidad (MCDV) . . . . . 20
2.3.4. Modelo cinemático inverso de velocidad (MCIV) . . . . . 21
2.3.5. Modelo cinemático directo de aceleración (MCDA) . . . . . 21
2.3.6. Modelo cinemático inverso de aceleración (MCIA) . . . . . 22
2.3.7. Simulación digital . . . . . 22
2.3.8. Manipulabilidad de Yoshikawa . . . . . 25
2.4. Modelo dinámico . . . . . 26
2.4.1. Propiedades del modelo dinámico . . . . . 28
2.4.2. Diseño del filtro de velocidad . . . . . 29
2.4.3. Control PD+ . . . . . 32
2.4.4. Análisis de la estabilidad del control PD+ . . . . . 33
2.4.5. Prueba experimental de la compensación del vector de fuerzas gravitacionales . . . . . 33
2.4.6. Resultado experimental usando control PD+ . . . . . 34
2.4.7. Generador de Tiempo Base . . . . . 39
2.4.8. Control por modos deslizantes cartesiano . . . . . 40
2.4.9. Análisis de estabilidad . . . . . 42
2.4.10. Resultado experimental usando control por modos deslizantes cartesiano . . . . . 43
2.4.11. Índices de desempeño . . . . . 48
2.5. Discusión y conclusiones . . . . . 49

**3. Ambiente virtual interactivo con retroalimentación de fuerza kinestésica 51**
3.1. Aplicaciones para el desarrollo de videojuegos . . . . . 51
3.1.1. Unity . . . . . 52
3.1.2. Unreal Engine . . . . . 52
3.1.3. GameMaker Studio 3 . . . . . 52
3.1.4. RPG Maker MV . . . . . 52
3.1.5. Godot . . . . . 52
3.2. Características del equipo tecnológico . . . . . 53
3.2.1. Hardware . . . . . 53
3.2.2. Software . . . . . 53
3.3. Ambiente de Realidad Virtual en Unity . . . . . 54
3.3.1. Características principales del ambiente virtual . . . . . 55
3.3.2. Lógica detrás del juego . . . . . 60
3.4. Discusión y conclusiones . . . . . 62

**4. Evaluación experimental** **65**
4.1. Metodología para el uso de la plataforma en el usuario . . . . . 66
4.1.1. Entrevista y firma de consentimiento informado . . . . . 67
4.1.2. Entendimiento interactivo de una interfaz háptica. . . . . 67
4.1.3. Uso del laberinto háptico con un dispositivo. . . . . 69
4.1.4. Uso del laberinto háptico con dos dispositivos. . . . . 69
4.1.5. Estudio comparativo. . . . . 69
4.1.6. Aplicación del método NASA TLX. . . . . 70
4.2. Uso de la plataforma en modo exploración con niños sanos . . . . . 71
4.2.1. Cálculo del tiempo base a partir de la velocidad media . . . . . 74
4.3. Trayectorias en el laberinto . . . . . 74
4.3.1. Tarea de movimiento del nivel 1 de la plataforma . . . . . 74
4.3.2. Tarea de movimiento del nivel 2 de la plataforma . . . . . 75
4.3.3. Tarea de movimiento del nivel 3 de la plataforma . . . . . 76
4.3.4. Tarea de movimiento del nivel 4 de la plataforma . . . . . 76
4.3.5. Tarea de movimiento del nivel 5 de la plataforma . . . . . 77
4.4. Prueba piloto de la plataforma en el ICBI-UAEH . . . . . 78
4.4.1. Trayectorias de referencia . . . . . 78
4.4.2. Parámetros del control . . . . . 78
4.4.3. Uso de la plataforma con estudiantes universitarios . . . . . 79
4.4.4. Resultados del modo guiado . . . . . 81
4.4.5. Resultados del modo exploración . . . . . 83
4.4.6. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 1 de la plataforma. . . . . 85
4.4.7. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 2 de la plataforma. . . . . 87
4.4.8. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 3 de la plataforma. . . . . 89
4.4.9. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 4 de la plataforma. . . . . 91
4.4.10. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 5 de la plataforma. . . . . 93
4.4.11. Observaciones y comentarios del experimento con voluntarios . . . . 95
4.4.12. Nivel 1 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control . . . . . 96
4.4.13. Nivel 2 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control . . . . . 98

4.4.14. Nivel 3 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control . . . 100
4.4.15. Nivel 4 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control . . . 102
4.4.16. Nivel 5 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control . . . 104
4.4.17. Observaciones y comentarios de la plataforma con y sin humano en el lazo de control . . . 106
4.4.18. Aplicación del método NASA TLX (Task Load Index) . . . 106
4.4.19. Resultados del método NASA-TLX . . . 107
4.5. Discusión y conclusiones . . . 109

**5. Conclusiones y trabajo futuro** **111**

**Bibliografía** **113**

**A. Información personal y médica** **121**

**B. Formato consentimiento informado** **123**

**C. NASA TLX** **129**
C.1. Tabla de Evaluación del Método NASA TLX . . . 132

**D. Publicaciones** **133**

**E. Análisis antiplagio** **137**

# Índice de figuras


1.1. Esquema de exploración háptica [18]. . . . . 5
1.2. Esquema de un guiado háptico pasivo [18]. . . . . 5
1.3. Plataforma exergaming de interacción háptica bimanual basada en laberintos virtuales. Tarea del dispositivo con mano derecha [43]. . . . . 6
1.4. Tarea compuesta a partir de trayectorias $T_n$ para los dispositivos derecho e izquierdo [43]. . . . . 8
1.5. Experimento bimanual de guiado háptico pasivo [43]. . . . . 9
1.6. Experimento bimanual de exploración háptica [43]. . . . . 9

2.1. Dispositivo háptico Touch [63]. . . . . 16
2.2. Cinemática directa e inversa. . . . . 17
2.3. Cadena cinemática del dispositivo háptico Touch [23]. . . . . 19
2.4. Diagrama de flujo de la cinemática del dispositivo háptico Touch. . . . . 22
2.5. Cinemática en $x$ vs $y$ vs $z$ con trayectoria en forma de rosa de 8 pétalos. . 23
2.6. Resultados del modelo cinemático (posición y velocidad). . . . . 24
2.7. Resultados del modelo cinemático (aceleración). . . . . 25
2.8. Manipulabilidad según Yoshikawa. . . . . 25
2.9. Pruebas numéricas de las propiedades basadas en el experimento de la rosa de 8 pétalos (Figura 2.5). . . . . 29
2.10. Comparación del uso del filtro Butterworth 2° orden. . . . . 31
2.11. Diagrama de bloques del control PD con compensación de gravedad. . . . . 32
2.12. Resultado experimental de uso de compensación de gravedad. . . . . 34
2.13. Resultado experimental con control PD+, parte 1. . . . . 35
2.14. Resultado experimental con control PD+, parte 2. . . . . 36
2.15. Resultado experimental con control PD+, parte 3. . . . . 37
2.16. Resultado experimental con control PD+, parte 4. . . . . 38
2.17. Pruebas numéricas de las propiedades del modelo dinámico. . . . . 40
2.18. Diagrama de bloques del control por modos deslizantes. . . . . 42

2.19. Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 1. . . . . 44
2.20. Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 2. . . . . 45
2.21. Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 3. . . . . 46
2.22. Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 4. . . . . 47

3.1. Interfaz gráfica de usuario: componentes del laberinto virtual. . . . . 55
3.2. Conjunto de niveles de la plataforma háptica propuesto. . . . . 56
3.3. Objetos de interacción en el laberinto. . . . . 57
3.4. Modo bimanual de la plataforma: operación simultánea de dos dispositivos hápticos. . . . . 59
3.5. Menú principal de la plataforma. . . . . 59
3.6. Menú secundario de la plataforma. . . . . 60
3.7. Diagrama de flujo general del juego. . . . . 61
3.8. Diagrama de flujo complementario. . . . . 62

4.1. Plataforma háptica bimanual. . . . . 65
4.2. Diagrama de flujo de la aplicación del experimento. . . . . 66
4.3. Demo de superficies virtuales para ejemplificación de una tarea háptica [63]. 67
4.4. Demo de pelotas cayendo [63]. . . . . 68
4.5. Demo ensartar aros [63]. . . . . 68
4.6. Niños sanos que participaron con el uso de la plataforma háptica. . . . . 72
4.7. Comportamiento de niños sanos en modo exploración en cada uno de los niveles de la plataforma. . . . . 73
4.8. Tarea del nivel 1. . . . . 75
4.9. Tarea del nivel 2. . . . . 75
4.10. Tarea del nivel 3. . . . . 76
4.11. Tarea del nivel 4. . . . . 77
4.12. Tarea del nivel 5. . . . . 77
4.13. Voluntarios que participaron con el uso de la plataforma háptica. . . . . 79
4.14. Resultado experimental de plataforma en modo guiado con control por modos deslizantes con voluntarios, parte 1. . . . . 81
4.15. Resultado experimental de plataforma en modo guiado con control por modos deslizantes con voluntarios, parte 2. . . . . 82
4.16. Resultado experimental de plataforma en modo exploración con compensación de la gravedad con voluntarios, parte 1. . . . . 83
4.17. Resultado experimental de plataforma en modo exploración con compensación de la gravedad con voluntarios, parte 2. . . . . 84
4.18. Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 1. . . . . 86
4.19. Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 2. . . . . 88

4.20. Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 3. . . . . 90
4.21. Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 4. . . . . 92
4.22. Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 5. . . . . 94
4.23. Resultado experimental de plataforma nivel 1 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1. . . . . 96
4.24. Resultado experimental de plataforma nivel 1 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2. . . . . 97
4.25. Resultado experimental de plataforma nivel 2 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1. . . . . 98
4.26. Resultado experimental de plataforma nivel 2 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2. . . . . 99
4.27. Resultado experimental de plataforma nivel 3 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1. . . . . 100
4.28. Resultado experimental de plataforma nivel 3 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2. . . . . 101
4.29. Resultado experimental de plataforma nivel 4 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1. . . . . 102
4.30. Resultado experimental de plataforma nivel 4 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2. . . . . 103
4.31. Resultado experimental de plataforma nivel 5 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1. . . . . 104
4.32. Resultado experimental de plataforma nivel 5 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2. . . . . 105
4.33. Análisis del promedio obtenido de las personas encuestadas, dado por cada parámetro del método NASA TLX. . . . . 108

# Acrónimos

**DH**: Dispositivo Háptico.
**PC**: Parálisis cerebral.
**MCDP**: Modelo Cinemático Directo de Posición.
**MCDV**: Modelo Cinemático Directo de Velocidad.
**MCDV**: Modelo Cinemático Directo de Aceleración.
**MCIP**: Modelo Cinemático Inverso de Posición.
**MCIV**: Modelo Cinemático Inverso de Velocidad.
**MCIV**: Modelo Cinemático Inverso de Aceleración.
**PD**: Proporcional y Derivativo.
**RMS**: Root Mean Square (Raíz Cuadrática Media).
**RV**: Realidad Virtual.
**RA**: Realidad Aumentada.
**HRpI**: Human-Robot physical Interaction (Interacción Física Humano-Robot).
**TBG**: Time Base Generator (Generador de Tiempo Base).
**SMC**: Sliding Mode Control (Control por Modos Deslizantes).

# Notación

| | |
|---|---|
| $\mathbb{R}$ | Espacio de los reales. |
| $\mathbb{R}^n$ | Espacio lineal de vectores de dimensión n. |
| $\mathbb{R}^{n\times m}$ | Matriz con $n$ filas y $m$ columnas y elementos de $\mathbb{R}$. |
| $\mathbb{R}^+$ | Campo de los reales positivos. |
| $\rightarrow$ | Mapeo del dominio sobre el rango. También, *Tiende a.* |
| $\|a\|$ | Valor absoluto del escalar $a$. |
| $\forall$ | Para todo. |
| $\exists$ | Existe. |
| $\in$ | Perteneciente a. |
| $\Rightarrow$ | Implica. |
| $\Leftrightarrow$ | Equivalente a, o sí y solo sí. |
| $C^\infty$ | Función suave. |
| $q$ | Vector de posiciones generalizadas. |
| $\dot{q}$ | Vector de velocidades generalizadas $\left(\frac{dq}{dt}\right)$. |
| $\ddot{q}$ | Vector de aceleraciones generalizadas $\left(\frac{d^2q}{dt^2}\right)$. |
| $\tilde{q}$ | Vector de error de posición articular, donde $\tilde{q} = q - q_d$, con $q_d$ como posición articular deseada. |
| $\dot{\tilde{q}}$ | Vector de error de velocidad articular, donde $\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d$, con $\dot{q}_d$ como velocidad articular deseada. |
| $\ddot{\tilde{q}}$ | Vector de error de aceleración articular, donde $\ddot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_d$, con $\ddot{q}_d$ como aceleración articular deseada. |
| $S$ | Error extendido, con $S = \dot{\tilde{q}} + \alpha\tilde{q}$, y $\alpha \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz de ganancias simétrica y definida positiva. |
| $u$ | Vector de entradas de control generalizadas. |
| $(\cdot)^{-1}$ | Operador de función inversa. |
| $\mathcal{L}(\dot{q}, q)$ | Lagrangiano. |
| $H(q)$ | Matriz de fuerzas de inercia. |
| $C(q, \dot{q})$ | Matriz de fuerzas de Coriolis y de fuerzas centrífugas. |
| $G(q)$ | Vector de fuerzas gravitacionales. |
| $F(\dot{q})$ | Vector de pares de fricción viscosa-Coulomb. |
| $\tau$ | Vector de pares. |
| $\mathcal{E}(\dot{q}, q)$ | Energía total. |

# Glosario

**Actuador.** Los actuadores de un robot proporcionan el movimiento para el manipulador y para el efector final [52].

**Cadena cinemática.** Un robot manipulador se considera como una serie de eslabones interconectados a través de articulaciones (servomotores) rotacionales o prismáticas en forma de cadena cinemática abierta [45].

**Cinemática.** Es la parte de la física que estudia el movimiento de un sistema mecánico, sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen [45].

**Cinemática directa.** Es el estudio del movimiento del robot relacionando las coordenadas cartesianas en función de las coordenadas articulares o generalizadas [45].

**Cinemática inversa.** Es un problema no lineal que relaciona las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas [45].

**Control.** El control de cualquier sistema significa aplicar/ejercer fuerza(s) para que el sistema se mueva/trabaje de acuerdo con las instrucciones ordenadas. En un sistema robótico, se requiere de un manipulador para ejecutar una tarea específica mediante el movimiento de su efector final en forma precisa y repetida [52].

**Control de fuerza.** Consiste en lograr que el efector final de un manipulador aplique un nivel de fuerza deseado durante una tarea de interacción con su entorno. Es decir, una estrategia de control de la fuerza es la que modifica las trayectorias de posición del efector final del robot con base en la fuerza detectada, logrando, de esta forma, controlar la interacción entre el robot y su entorno [45].

**Control de trayectoria.** En un control de trayectoria punto a punto, el brazo del robot se mueve desde un punto deseado hasta el siguiente sin considerar la trayectoria que se

toma entre ellos [52].

**Dinámica.** Es el estudio de las fuerzas y momentos que causan el movimiento en un sistema [52].

**Dispositivo háptico.** Se utilizan diversos diseños robóticos como dispositivos hápticos. Los dispositivos hápticos se diferencian de otros dispositivos de entrada de datos tradicionales por sus actuadores, controlados para proporcionar sensaciones hápticas adecuadas al operador humano [16].

**Espacio de trabajo.** Es el espacio o lugar donde el robot puede realizar todos sus posibles movimientos. El espacio de trabajo está definido por la geometría del robot y la naturaleza de sus articulaciones [45].

**Estabilidad.** Significa que un sistema no se desviará o se alejará de su posición deseada [52].

**Extremo final.** Es la parte terminal o final del último eslabón, determinada a colocar la herramienta adecuada para una aplicación específica [45].

**Grado de libertad.** El grado de libertad de un sistema mecánico se define como el número de coordenadas independientes o coordenadas mínimas necesarias para describir perfectamente su posición o configuración [52].

**Háptica.** Es el estudio de la percepción táctil humana, específicamente a través de receptores kinestésicos (fuerza/posición) y cutáneos (táctiles), asociados con la percepción y la manipulación. En la literatura sobre robótica y realidad virtual, la háptica se define ampliamente como interacciones táctiles reales y simuladas entre robots, humanos y entornos reales, remotos o simulados, en diversas combinaciones [16].

**Interfaz háptica.** Las interfaces hápticas permiten replicar o mejorar la percepción táctil de manipular o percibir un entorno real a través de dispositivos mecatrónicos y control informático [16].

**Lagrangiano.** Es ampliamente utilizado para obtener la dinámica no lineal del robot $\mathcal{L}(\dot{q}, q)$, específicamente el Lagrangiano del robot se define como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial [45].

**Modelo dinámico.** Ecuación que describe la dinámica no lineal de un robot manipulador, la cual es válida cuando el robot tiene una estructura cinemática abierta. Además, se considera que los eslabones son rígidos, es decir, no incluye el fenómeno de elasticidad [45].

**Rehabilitación neurológica**. Es un programa supervisado por un médico y diseñado para las personas con enfermedad, traumatismo o trastorno del sistema nervioso [45]. El campo de la robótica de rehabilitación considera sistemas robóticos que 1) brindan terapia a personas que buscan recuperar sus funciones físicas, sociales, comunicativas o cognitivas, y/o 2) asisten a personas con discapacidad crónica a llevar a cabo actividades de la vida diaria [16].

**Robot**. Es un dispositivo multifuncional reprogramable diseñado para mover material, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas [45].

**Robótica.** Es una disciplina científica que aborda la investigación y desarrollo de una clase particular de sistemas mecánicos, denominados robots manipuladores, diseñados para realizar una amplia variedad de aplicaciones industriales, científicas, domésticas y comerciales [45].

**Sistema háptico.** Permite a un usuario tocar, sentir, manipular, crear y cambiar objetos tridimensionales simulados dentro de un ambiente virtual o localizado en un entorno remoto [45].

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1. Breve descripción sobre las contribuciones de los exergames en rehabilitación

Los ejercicios físicos basados en tecnología (exergaming) han ganado popularidad en los últimos años, particularmente con aplicaciones en capacitación, evaluación de habilidades, rehabilitación, cuidado de la salud y mucho más. Los exergames son una forma divertida, viable, atractiva y segura de realizar ejercicio físico para la mayoría de las poblaciones de pacientes. Su uso en el hogar permite una mayor comprensión de su aplicabilidad y su impacto en los resultados clínicos, lo que puede contribuir a una mejor funcionalidad y calidad de vida en esta población. En [35] se realizó una revisión sistemática con el objetivo de sintetizar la evidencia sobre la utilidad de los exergames como herramienta para el entrenamiento del equilibrio en el hogar en adultos mayores. La búsqueda se realizó en seis bases de datos electrónicas e incluyó: 1) ensayos controlados aleatorios con entrenamiento en el hogar con exergames como intervención; 2) estudios con adultos mayores (de 60 años o más) con deterioro del equilibrio estático o dinámico; 3) estudios que compararon los efectos de los exergames con la atención habitual, la educación para la salud o la ausencia de intervención; y 4) estudios que reportaron resultados de usabilidad y equilibrio. Los exergames aplicados en casa mostraron una buena usabilidad y tuvieron efectos significativos en el equilibrio funcional en comparación con la atención usual o ninguna intervención, especialmente en la modalidad inmersiva. En [11], se revisaron los hallazgos de la investigación actual sobre exergaming y sus efectos en diferentes grupos de población y se recomendaron futuras investigaciones para optimizar su uso como herramienta educativa y de ejercicio físico. El exergaming es una herramienta beneficiosa que puede 1) aumentar el nivel de ejercicio físico de la población general, 2) promover el aprendizaje y la educación física en los estudiantes, y 3) facilitar la rehabilitación. Estos objetivos se

logran mejor si las exigencias de los exergames complementan la capacidad del jugador. Este estudio propuso un modelo con una perspectiva multidimensional para asegurar una correspondencia precisa entre las exigencias de un exergame y la capacidad del jugador. En [54], se muestran hallazgos que sugieren que los videojuegos de ejercicio asistidos por realidad virtual (RV) pueden tener algunas ventajas sobre la rehabilitación convencional para mejorar el funcionamiento y el rendimiento de los niños con parálisis cerebral en las actividades de la vida diaria, la movilidad de las extremidades superiores e inferiores y la cognición. Los videojuegos de ejercicio asistidos por RV parecen ser tan eficaces como la fisioterapia convencional en las demás medidas funcionales estudiadas. Gracias a su potencial eficacia, mayor viabilidad, ausencia de efectos secundarios reportados y una experiencia entretenida, los videojuegos de ejercicio asistidos por RV pueden ser un enfoque complementario viable a la fisioterapia convencional para la rehabilitación de niños con parálisis cerebral. En [41] se realizó una revisión de veintiún ensayos controlados aleatorios centrados en la aplicación de la RV y los exergames en la prevención de caídas. Esta revisión sugiere que el entrenamiento en RV en rehabilitación parece ser un complemento prometedor a las técnicas tradicionales de fisioterapia para mejorar resultados físicos específicos. La realidad virtual y los exergames podrían considerarse un complemento a la fisioterapia estándar y su posible continuación en el hogar para personas mayores. En [42] se llevó a cabo un estudio sobre el uso la eficiencia de los juegos digitales en la neurorrehabilitación pediátrica, incluyendo 54 artículos en la revisión, se observa que a menudo los estudios se centran en la rehabilitación motora de miembros superiores, descuidando principalmente aspectos cognitivos como son la atención, la resolución de problemas, la memoria, como también otros aspectos relacionados con el juego: el disfrute, la historia descrita narrativamente en el juego y las interacciones sociales, a pesar de ello la terapia con videojuegos sigue siendo una herramienta válida en el proceso de rehabilitación.

## 1.2. Antecedentes

Resultados de investigación orientados a la asistencia médica y neurorrehabilitación con dispositivos robóticos representan herramientas significativas para el tratamiento de pacientes con movimiento involuntario o limitado en el miembro superior (derivado de una lesión neurológica) [1][5][12]. La curva de desempeño para procedimientos convencionales (terapia física) de neurorrehabilitación representa un menor impacto en la recuperación biomecánica con relación a las estrategias de neurorrehabilitación robótica. En [13] se presenta un principio de neurorrehabilitación en miembro superior para pacientes con movimiento limitado o involuntario basado en entrenamiento háptico, mediante el esquema de guiado kinestésico local empleando una plataforma robótica experimental. Se establece un trabajo preliminar de sistema de interacción humano-robot, basado en dis-

positivos hápticos tipo mayordomo en lazo cerrado con controladores no lineales. Existen varios métodos destinados a la interacción física entre humanos y robots (HRpI, por sus siglas en inglés: Human-Robot physical Interaction) para proporcionar fisioterapia a los pacientes. El uso de dispositivos hápticos se ha convertido en una opción para medir y registrar las fuerzas a lo largo de un recorrido determinado y apoyar en el análisis del protocolo al fisioterapeuta. En este sentido, es fundamental el control de movimiento para que la guía háptica transmita las especificaciones del protocolo clínico. Dada la variabilidad inherente del paciente, una demanda concluyente de estos métodos HRpI es la necesidad de modificar en línea su respuesta sin rechazar ni descuidar las fuerzas de interacción, sino procesarlas como interacción del paciente. En [43], considerando la dinámica no lineal del robot que interactúa con ambas extremidades superiores con un paciente, se presenta un control adaptativo para garantizar una guía háptica estable mediante el procesamiento de la causalidad de las fuerzas de interacción del paciente, a pesar de las incertidumbres y la dinámica desconocida del robot. En [6] se propuso una configuración integrada para retroalimentación visual-háptica basada en electromiograma (EMG) durante los movimientos de las extremidades superiores (tareas de seguimiento en espiral), para probar si las retroalimentaciones sensoriales aumentadas pueden inducir una mejora del control motriz en pacientes con distonía primaria, permitiendo su aplicación para la rehabilitación sensoriomotora.

Con el propósito de establecer las condiciones de una plataforma exergame con estímulo visual y kinestésico, en la siguiente sección, se describe el principio de funcionamiento de una interacción háptica activa (exploración y navegación virtual) y una interacción háptica pasiva (guiado háptico); en ambos casos, el estímulo visual es congruente con la retroalimentación kinestésica.

## 1.3. Parálisis cerebral (PC)

La parálisis cerebral (PC) es un trastorno permanente del neurodesarrollo [3]. El término cubre un grupo de condiciones que resultan de una lesión no progresiva que afecta el cerebro en desarrollo antes, durante o después del nacimiento. Esta lesión causa deterioro en el sistema motor que afecta principalmente el movimiento y el desarrollo postural de los pacientes. El deterioro del sistema motor también puede ir acompañado de un déficit sensorial, cognitivo o de comunicación o incluso anomalías del comportamiento [37].

Los niños con PC tienen anomalías motoras, como debilidad y falta de control, que afectan el equilibrio, la postura y la coordinación, y causan contracturas y deformidades. Los pacientes requieren rehabilitación para aumentar la masa muscular y la función

motora, lo que puede mejorar su independencia y su rendimiento en la vida diaria. La neurorrehabilitación efectiva requiere tareas repetidas y variadas con dificultad creciente, que pueden ayudar al cerebro a formar nuevas sinergias musculares para objetivos específicos [9][47].

## 1.4. La realidad virtual (RV)

Con los recientes avances en tecnología, la rehabilitación a través de ejercicios asistidos por RV se introdujo como un enfoque complementario para los pacientes con parálisis cerebral. La tecnología de la RV proporciona una simulación computarizada interactiva de un entorno del mundo real. La tecnología con el movimiento de los usuarios en tiempo real mediante sensores tridimensionales, que son dispositivos que pueden medir la fuerza o dirección de un campo magnético o eléctrico en tres dimensiones, es decir, a lo largo de los ejes $x$, $y$ y $z$. Se pueden utilizar para diversas aplicaciones, como detección de posición, seguimiento de movimiento, reconocimiento de gestos y robótica. Los usuarios se mueven y participan en el videojuego con todos sus sentidos (tacto, oído y visión), y los sensores dan información directa y alentadora sobre su desempeño [60]. Los ejercicios de RV tienen diferentes formas de inmersión. La RV no inmersiva utiliza una pantalla pequeña y un teclado/ratón o un joystick. La RV semi-inmersiva utiliza una pantalla grande y partes del cuerpo. La RV inmersiva utiliza auriculares y sensores de movimiento. La RV inmersiva da la sensación de inmersión y presencia. Los videojuegos comerciales basados en RV suelen requerir movimientos rápidos y no son específicos ni están orientados a tareas. Por ello, se utilizan videojuegos especiales para la neurorrehabilitación de los niños con PC [61]. Desarrollar y validar juegos de RV para PC es un desafío [54].

## 1.5. Exergame basado en exploración y guiado háptico

Un dispositivo háptico puede operar bajo dos diferentes esquemas: 1) exploración háptica y 2) guiado háptico pasivo. Las características de cada uno de estos esquemas, se describen a continuación:

1. Exploración háptica: el operador humano navega de manera voluntaria en el ambiente virtual y recibe retroalimentación de fuerza cuando existe contacto o deformación al interactuar con algún objeto virtual. Para ello, un algoritmo de detección de contacto o deformación es evaluado instantáneamente (cálculo de la magnitud y dirección de la fuerza de retroalimentación). De no existir contacto, el dispositivo háptico opera como un dispositivo de medición (en espacio articular y operacional

cartesiano a través de sus modelos cinemáticos), es decir, este no proporciona fuerza sobre el miembro superior del exergame, como se muestra en la Figura 1.1.

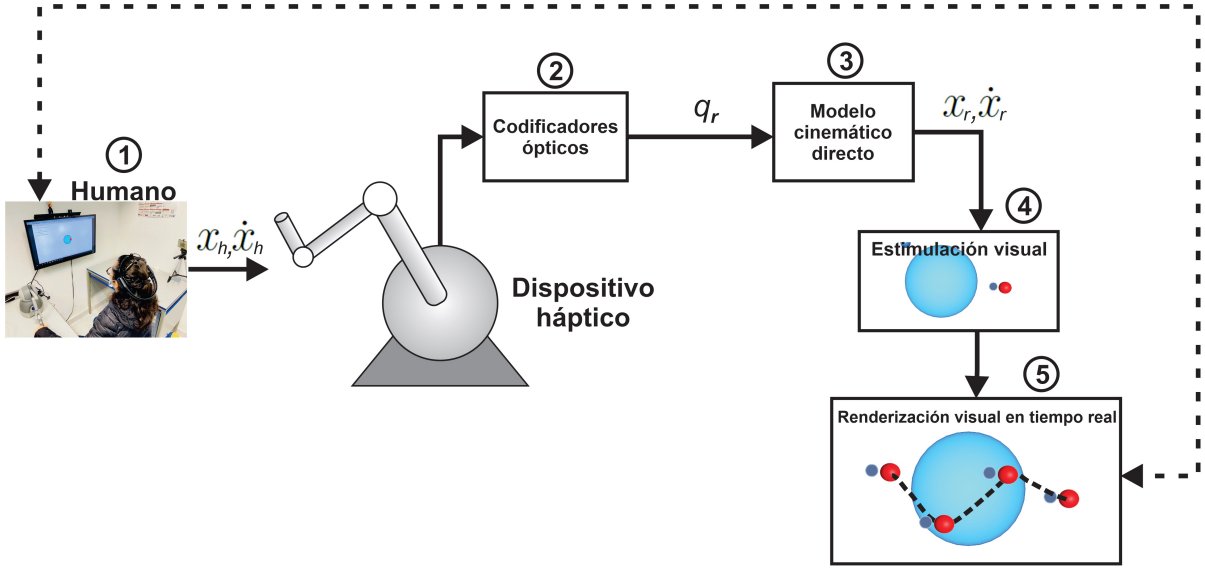



Figura 1.1: Esquema de exploración háptica [18].

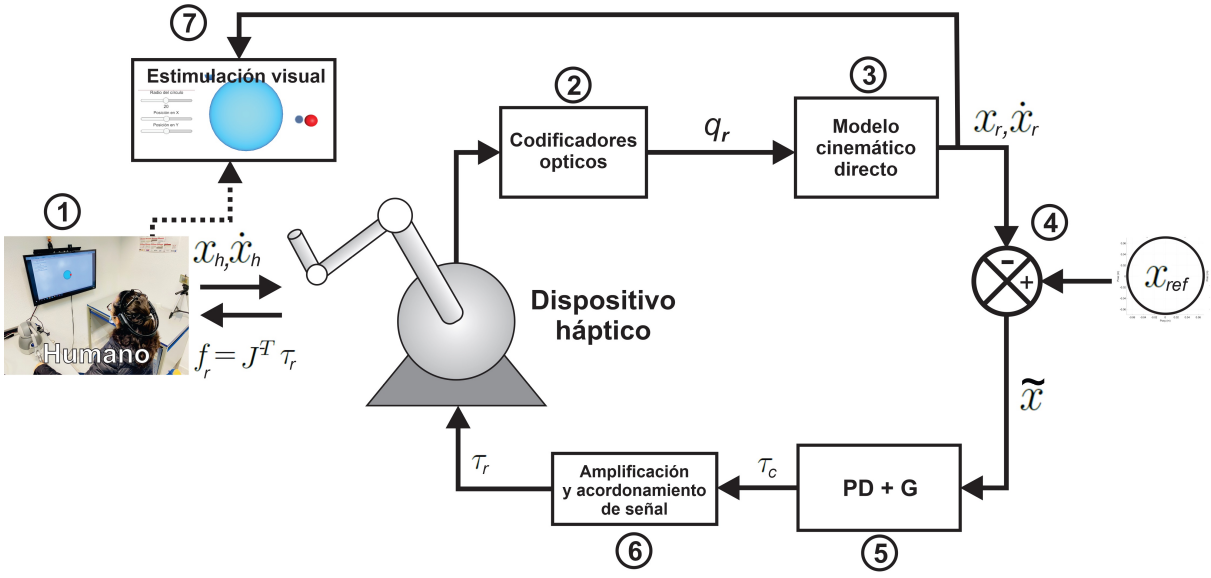



Figura 1.2: Esquema de un guiado háptico pasivo [18].

2. Guiado háptico pasivo: el operador humano (exergamer) es guiado en una trayectoria

en el espacio de trabajo del robot (en correspondencia con el ambiente de realidad virtual). Para ello, una acción de control pasiva para robots manipuladores con regulación global con el exergamer en el lazo es empleada. Métricas de desempeño y mejora son descritas por: error de convergencia, Hamiltoniano (energía total) y estabilidad del sistema HRpI (Figura 1.2). En la Figura 1.1, se presenta una descripción de los subsistemas de un sistema HRpI para exploración háptica, en donde: 1) representa al usuario que manipula al dispositivo robótico, 2) detección de desplazamiento articular (codificadores ópticos), 3) cálculo de la posición y velocidad cartesianas (modelo cinemático directo de posición y velocidad) y la referencia dada en el ambiente virtual, 4) la simulación visual del ambiente de realidad virtual, 5) percepción del humano en el ambiente de realidad virtual en tiempo real.

En la Figura 1.2 se describe la tarea de guiado háptico pasivo de un sistema HRpI, en donde: 4) define el error de convergencia, 5) representa la acción de control de movimiento, 6) define el vector de pares generalizados para recrear la retroalimentación de fuerza, 7) define el estímulo visual de seguimiento. Las etapas 1), 2) y 3) operan de la misma manera que en el esquema de exploración háptica (Figura 1.1).

## 1.6. Plataforma háptica exergaming bimanual

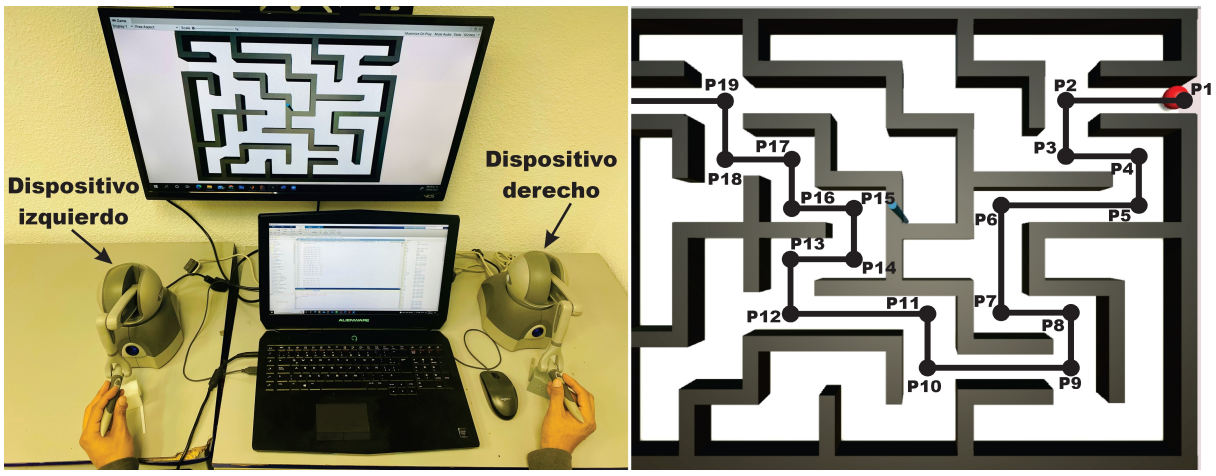



Figura 1.3: Plataforma exergaming de interacción háptica bimanual basada en laberintos virtuales. Tarea del dispositivo con mano derecha [43].

Un sistema HRpI permite garantizar el estímulo kinestésico y táctil a un usuario, en congruencia con un estímulo visual provisto de un ambiente de realidad virtual. Trabajo previo ha permitido consolidar una plataforma de interacción bimanual, en la que dos dispositivos hápticos interactúan en un ambiente virtual, como los descritos en las Figuras 1.1 y 1.2.

En la Figura 1.3, se presenta la imagen de una plataforma exergaming, constituida de dos dispositivos hápticos Touch de 6 grados de libertad (6 gdl) de los cuales 3 gdl son completamente actuados y un ambiente virtual basado en laberintos interactivos construidos en Unity. El usuario puede interactuar con una o dos extremidades superiores para la solución. Para ello, el laberinto puede resolverse de manera libre, es decir, en exploración háptica (Figura 1.1) o en guiado háptico pasivo (Figura 1.2).

La tarea de consigna de movimiento, definida para el controlador pasivo en modo guiado háptico, es construida a partir de 19 trayectorias planificadas para garantizar convergencia en tiempo finito, a través de un Generador de Tiempo Base [43]. Las gráficas de la Figura 1.4 ilustran la planificación de la tarea de guiado háptico para ambas extremidades, refiriéndose a un reto de coordinación mano-ojo con ambas extremidades, y asociándolo a una estrategia para diagnóstico y neurorrehabilitación.

La evaluación de la estrategia de control en la plataforma en el modo de guiado háptico pasivo, con ambas extremidades, puede visualizarse en la Figura 1.5. En estas condiciones, se establece que la plataforma exergaming es configurada para desempeñar el entrenamiento en el usuario, ya que es guiado a través de las trayectorias que componen la tarea descrita en la Figura 1.4.

Para la tarea de exploración háptica, la ausencia de la fuerza de retroalimentación, así como la aplicación de una ley de control que tan solo permita inyección dinámica de fricción y compensación de los efectos del campo gravitacional, son los requerimientos para la interacción con el ambiente virtual (Figura 1.6). Es notable la experiencia del uso en cada una de las extremidades, y que puede fortalecerse a partir de la tarea de guiado pasivo como mecanismo de entrenamiento.

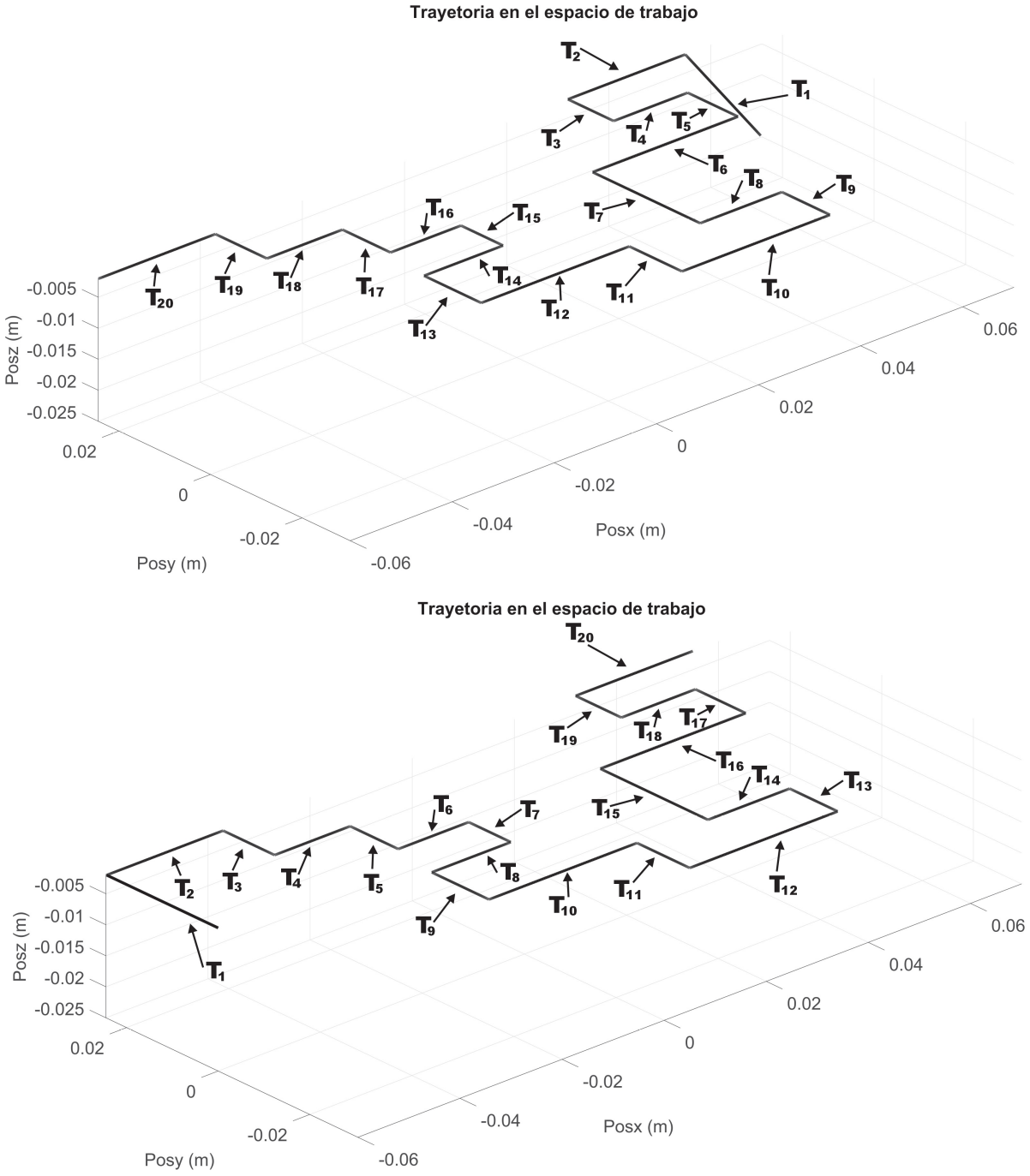



Figura 1.4: Tarea compuesta a partir de trayectorias $T_n$ para los dispositivos derecho e izquierdo [43].

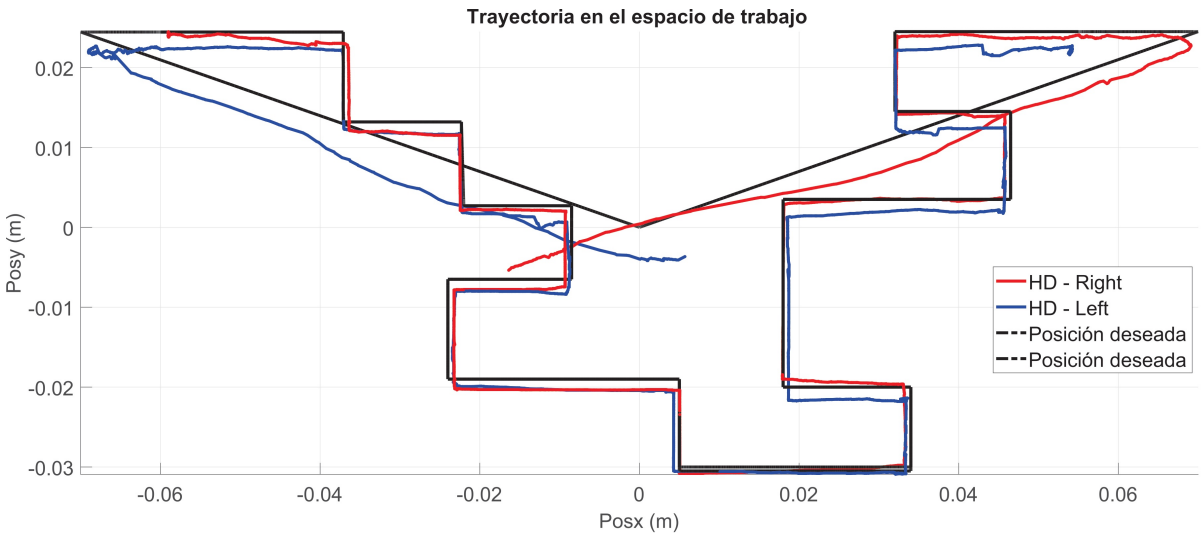



Figura 1.5: Experimento bimanual de guiado háptico pasivo [43].

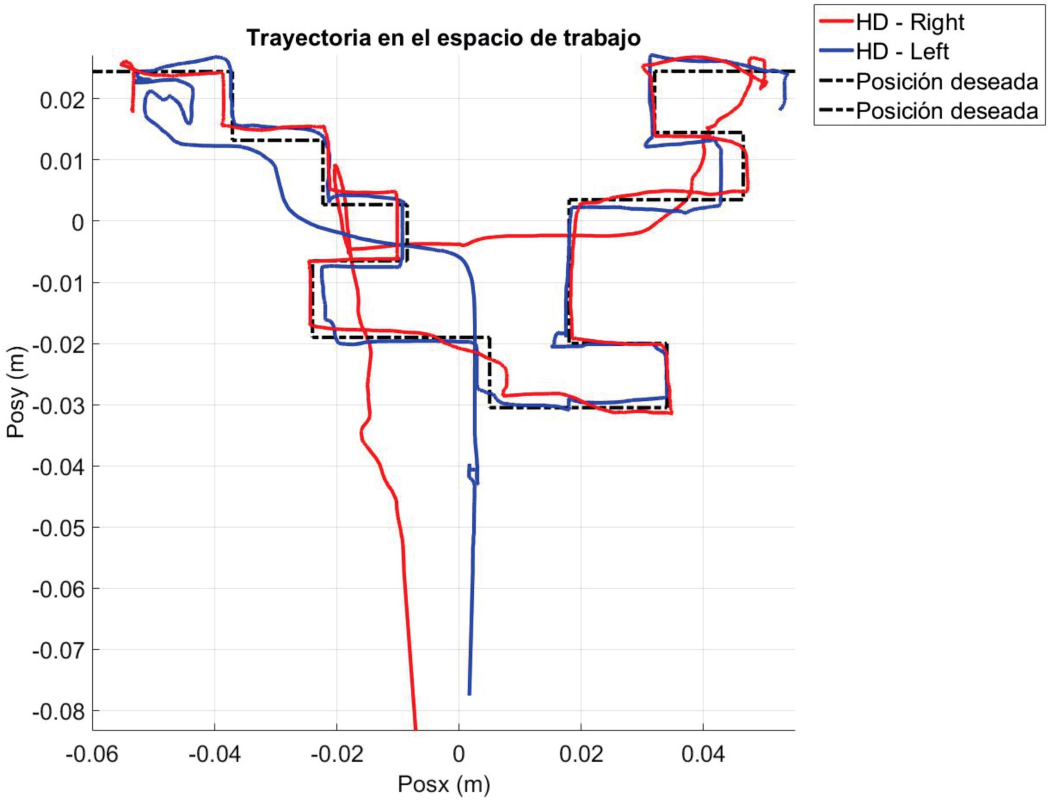



Figura 1.6: Experimento bimanual de exploración háptica [43].

## 1.7. Planteamiento del problema

En la rehabilitación de niños con discapacidad cerebral, los métodos tradicionales suelen presentar limitaciones debido a su naturaleza repetitiva, dependiente de la disponibilidad de terapeutas especializados y a su falta de adaptabilidad a las necesidades específicas de cada paciente. Estos factores dificultan la aplicación del tratamiento a los niños, disminuyen su motivación y, en muchos casos, prolongan el tiempo necesario para alcanzar mejoras en su desarrollo motor y cognitivo.

El avance en el campo de la automatización y control ha permitido la introducción de tecnologías que pueden optimizar estos procesos. En particular, el uso de dispositivos hápticos representa una alternativa novedosa para la rehabilitación, dado que permite integrar retroalimentación de fuerza en tiempo real y simular entornos virtuales interactivos. Sin embargo, el uso simultáneo de dispositivos hápticos de forma bimanual en un entorno de rehabilitación infantil aún es poco explorado y presenta desafíos tanto técnicos como de diseño, que son necesarios para garantizar la eficacia y seguridad de la terapia.

Aprovechar la combinación de dos dispositivos hápticos de forma simultánea en un entorno virtual controlado podría permitir una rehabilitación más inmersiva y personalizada. Esta tecnología no solo podría mejorar la precisión y la eficiencia del tratamiento, sino que también proporcionaría un entorno motivador y didáctico para el niño, aumentando la adherencia y la efectividad de las terapias. No obstante, existen preguntas sobre cómo lograr una integración efectiva de estos dispositivos para crear una plataforma háptica bimanual que optimice el proceso de rehabilitación.

A partir de esta problemática, surge la pregunta de investigación: ¿Cómo se puede desarrollar una plataforma háptica bimanual que combine retroalimentación de fuerza y un espacio virtual para crear un entorno cómodo, sencillo, didáctico, eficiente y adecuado que ayude a la rehabilitación de niños con discapacidad cerebral? Esta investigación tiene como objetivo explorar la viabilidad técnica y el impacto terapéutico de una plataforma prototipo de este tipo en el contexto de la rehabilitación infantil, contribuyendo al campo de la automatización y control con soluciones innovadoras y accesibles.

## 1.8. Justificación

Este trabajo tiene como objetivo complementar el proceso de rehabilitación en pacientes con discapacidad cerebral, dado que, en la rehabilitación convencional, se requiere la asistencia constante de un profesional de la salud capacitado para cada sesión de tratamiento. Sin embargo, los avances tecnológicos actuales, como la robótica, la RV y la inteligencia artificial, permiten automatizar y controlar ciertos aspectos del proceso de rehabilitación. Esto abre la posibilidad de ofrecer alternativas más eficientes, accesibles y

didácticas, que contribuyen a mejorar la fuerza y la movilidad del paciente.

La presente investigación contribuirá al conocimiento existente al abordar vacíos y limitaciones sobre la efectividad del uso de robótica y RV en la rehabilitación infantil para discapacidades neurológicas. Dado que los estudios previos en esta área son aún limitados, este trabajo aportará información novedosa sobre cómo estas tecnologías pueden aplicarse en la rehabilitación motora y cognitiva, además de brindar datos específicos sobre sus efectos en el desarrollo y la motivación de los niños.

Además, los resultados de esta investigación representan un antecedente de futuras actividades en la práctica clínica y en el desarrollo de herramientas terapéuticas y educativas. Los hallazgos obtenidos podrán ser aprovechados por hospitales, centros de rehabilitación y empresas tecnológicas para adaptar o desarrollar dispositivos y programas de RV y robótica enfocados en la rehabilitación infantil, promoviendo un enfoque más efectivo y accesible para los pacientes. Estos resultados también podrán servir como base para futuras investigaciones que busquen ampliar el alcance de estas tecnologías a otras discapacidades.

La originalidad de este estudio reside en su enfoque, ya que integra el uso de robótica y RV específicamente para la rehabilitación de niños con discapacidades cerebrales, un contexto donde su aplicación ha sido poco explorada. Además, el trabajo propone una metodología innovadora que permitirá evaluar la efectividad de estos métodos de forma integral, considerando tanto los aspectos físicos como los motivacionales del paciente.

Finalmente, la viabilidad y factibilidad del proyecto están garantizadas, ya que se cuenta con el acceso a la tecnología y el personal capacitado necesario para llevar a cabo el estudio en condiciones controladas. Los procesos y recursos necesarios han sido evaluados previamente, asegurando que el proyecto pueda desarrollarse correctamente y en un plazo establecido.

## 1.9. Solución propuesta

La solución propuesta incluye una plataforma háptica bimanual y un entorno virtual con retroalimentación de fuerza kinestésica, fundamentado en principios establecidos en la rehabilitación y el aprendizaje motriz. La teoría del aprendizaje motriz resalta la importancia de la práctica y la retroalimentación constante para mejorar el rendimiento en las habilidades motoras. Al incorporar retroalimentación kinestésica, se ofrece a los pacientes información crítica que puede facilitar su progreso.

Además, estudios previos han demostrado que la RV puede incrementar la motivación y el compromiso de los pacientes durante las terapias, lo que se traduce en mejores resultados de rehabilitación [9]. Por otro lado, el uso de dispositivos hápticos ha mostrado ser efectivo para corregir movimientos y mejorar el control motriz de pacientes con diversos

padecimientos [1]. La combinación de estos elementos en un entorno de rehabilitación tiene el potencial de mejorar el proceso terapéutico, proporcionando una experiencia más atractiva y efectiva para los niños con discapacidad cerebral.

## 1.10. Objetivos

### 1.10.1. Objetivo general

Desarrollar y evaluar una plataforma de exergaming bimanual que integre interacción háptica en entornos virtuales, con el propósito de ofrecer una alternativa tecnológica en el proceso de rehabilitación en miembros superiores, atendiendo de manera específica al diagnóstico y a las necesidades de los pacientes.

### 1.10.2. Objetivos particulares

1. De la plataforma exergaming, comprender: modelado matemático (cinemática y dinámica), estrategias de control pasivo y compensaciones dinámicas y planificación de movimiento.

2. Desarrollar un ambiente de RV implementando el software Unity, basado en un protocolo clínico establecido para rehabilitación motora en niños con discapacidad cerebral.

3. Integrar una plataforma de interacción física entre humanos y robots (HRpI) con dos dispositivos hápticos Touch, consolidando la ergonomía y reducción de las condiciones asociadas a la carga de trabajo en el usuario.

4. Realizar una prueba piloto considerando usuarios que cumplan con los criterios de inclusión y usuarios sanos.

5. Definir métricas tanto para el sistema HRpI como clínicas; y llevar a cabo un análisis de datos (gráfico y textual).

## 1.11. Contribuciones

La implementación de la plataforma de exergaming bimanual en un ambiente de realidad virtual, que incluye retroalimentación de fuerza kinestésica, visual y auditiva, se espera que genere contribuciones significativas incluidas en los siguientes puntos:

- Complementar el proceso de rehabilitación realizado por los terapeutas, mejorando de este modo la calidad del tratamiento.
- La naturaleza del exergaming, parecida a un videojuego, hará que las sesiones de rehabilitación sean más atractivas.
- Proporcionará un antecedente sobre el uso de la robótica y la RV en la rehabilitación infantil.
- La integración de dispositivos hápticos servirá como base para nuevas intervenciones más efectivas.
- Desarrollo y validación de algoritmos de control para mejorar el proceso de rehabilitación.

De este trabajo de investigación se han generado 3 publicaciones. Estas publicaciones detallan aspectos de resultados obtenidos, los cuales se describen a continuación y son referenciados en el Apéndice D:

- Garcia-Blancas, J., Domínguez-Ramírez, O. A., Rodríguez-Torres, E. E. et al. (2025). A technological proposal for a robot brain computer interface for neurorehabilitation purposes. Eur. Phys. J. Spec. Top. 234, 195–223. https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-024-01463-1
- Rodríguez-Hernández, E., Domínguez-Ramírez, O. A., Jarillo-Silva, A., Ramírez-Zamora, J. D., Curiel-Anaya, A. (2024) Passive haptic guidance based on sliding mode control. Conference: Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA). ISSN:2992-8338.
- Juárez-Chavero, M. I., Rodríguez-Hernández, E., Villafuerte-Segura, R., Domínguez-Ramírez, O. A. (2025) Workload assessment of a bimanual exergaming platform for neurorehabilitation tasks. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI.

## 1.12. Organización de la tesis

La organización de los capítulos de esta tesis se basa en lo siguiente:

Capítulo 2. En este capítulo se presenta el dispositivo háptico Touch, necesario para la retroalimentación de fuerza de la plataforma de exergaming, como también los datos

técnicos del dispositivo, su modelo cinemático de posición, velocidad y aceleración y su validación numérica, el modelo dinámico junto a su validación experimental, y la implementación de dos tipos de controles en la plataforma; control PD con compensación de la gravedad y control por modos deslizantes cartesiano y sus respectivos resultados en seguimiento de trayectoria.

Capítulo 3. En este capítulo se establecen el diseño del ambiente virtual de la plataforma en Unity, implementado para permitir inmersión y motivación al paciente, se muestran los programas complementarios y características del equipo de cómputo, se explican las consideraciones tomadas para crear el ambiente virtual y su lógica de funcionamiento.

Capítulo 4. Este capítulo se centra en la aplicación y los resultados de la plataforma en usuarios sanos, aplicando los resultados obtenidos de los capítulos 2 y 3, se pide la ayuda de especialistas en el área médica que validen y corrijan aspectos de la plataforma, permitiendo cumplir los objetivos establecidos del proyecto y una adecuada implementación.

Capítulo 5. En este capítulo se menciona la conclusión final de la tesis, así como posibles trabajos futuros.

# Capítulo 2

# Modelos matemáticos y control de movimiento

## 2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático (cinemático y dinámico) del dispositivo háptico Touch [23][49], así como la validación numérica y experimental a partir de la aplicación de una ley de control PD con compensación del efecto gravitacional e inyección de la dinámica de fricción viscosa articular, como también un control por modos deslizantes cartesiano.

## 2.2. Especificaciones técnicas de la plataforma exergaming

### 2.2.1. Dispositivo háptico Touch

El dispositivo Touch es un sistema robótico háptico profesional de gama media que es útil en aplicaciones de investigación, modelado 3D que aplica retroalimentación de fuerza en la mano del usuario, lo que le permite percibir objetos virtuales y generar sensaciones táctiles reales mientras el usuario manipula los objetos 3D en la pantalla. Las empresas integran dispositivos hápticos Touch en su trabajo para obtener soluciones convincentes mediante una percepción realista del tacto.

Puede usar dispositivos hápticos Touch (Figura 2.1) en diversas aplicaciones, como las de simulación, capacitación, evaluación de habilidades, ensayo, ensamblaje virtual, control robótico, detección de colisiones, diseño de interfaz de máquinas, rehabilitación, asignación y mucho más [63]. En la Tabla 2.1 se describen las especificaciones técnicas del dispositivo háptico.

Figura 2.1: Dispositivo háptico Touch [63].

| | Descripción |
|---|---|
| Área de trabajo | >431 x 348 x 165 mm (x,y,z) |
| Peso (solo dispositivo) | ∼1,42 kg |
| Rango de movimiento | Movimiento de la mano con giro de la muñeca |
| Resolución de la posición nominal | ∼0.055 mm |
| Fuerza de esfuerzo máxima y valor par en la posición nominal (brazos ortogonales) | 3.3 N |
| Fricción de accionamiento trasero | <0,26 N |
| Rigidez | Eje X > 1.26 N/mm<br>Eje Y > 2.31 N/mm<br>Eje Z > 1.02 N/mm |
| Retroalimentación de fuerza (3 grados de libertad) | x, y, z |
| Cardán de lápiz | Inclinación, giro, dirección (±5 % de potenciómetros de linealidad) |
| Interfaz | Puerto Ethernet conforme a RJ45 |

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del dispositivo háptico Touch [63].

### 2.2.2. Software y hardware utilizados

1. MATLAB, versión 2017a (64 bits).
2. Unity, versión 2020.3.22 f1 (64-bit).
3. Visual Studio, versión 2022 (64-bit).
4. Especificaciones del equipo de cómputo: procesador AMD Ryzen 7 con Radeon Graphics 1.90 GHz, RAM de 16 GB.

## 2.3. Modelo cinemático

Para que un robot ejecute una tarea específica, primero se deberá establecer la posición y la orientación del efector final, es decir, su posición o configuración en relación con su base. Esto es indispensable para resolver problemas de posicionamiento. Una vez obtenida la posición, se puede determinar la velocidad y la aceleración.

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 [52].

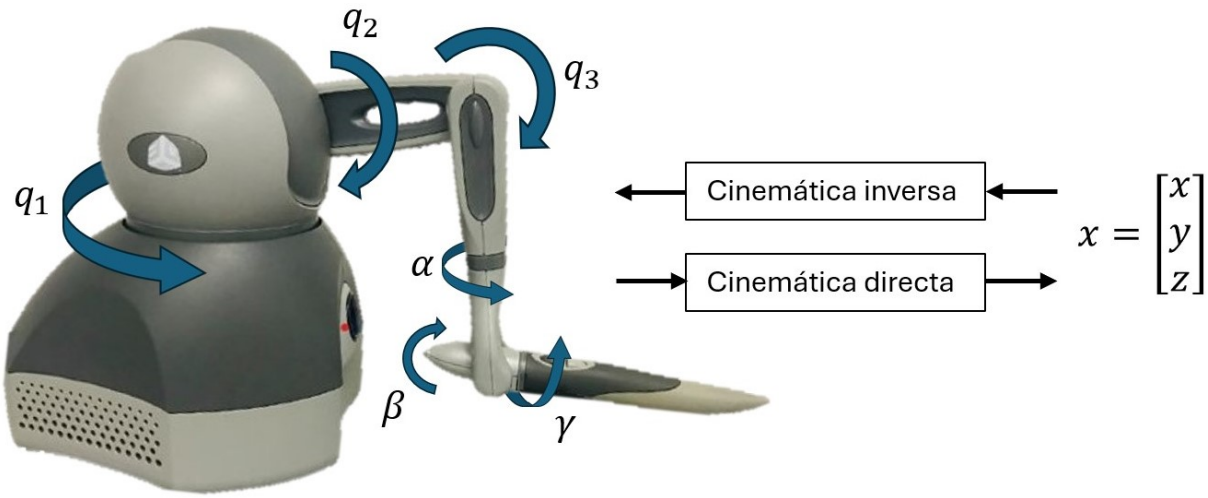



Figura 2.2: Cinemática directa e inversa.

En el cálculo de la posición, se encuentra una relación entre las coordenadas cartesianas y articulares, es decir, la posición de una coordenada del efector final y su orientación con los ángulos de las articulaciones. Se realizan dos tipos de análisis: la cinemática directa

y la inversa, como se ilustra en la Figura 2.2.

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 [45].

Los aportes del dispositivo háptico Touch requieren del modelo cinemático directo e inverso. Los modelos permiten conocer el desempeño del operador humano y su representación en el mundo virtual, así como la evaluación de técnicas de detección de contacto y deformación en casos particulares.

A continuación se presenta el enfoque de la cadena cinemática del dispositivo háptico Touch y los modelos cinemáticos (directo e inverso) de posición y sus derivadas.

### 2.3.1. Modelo cinemático directo de posición (MCDP)

El MCDP establece las relaciones entre las coordenadas operativas (posición y orientación del efector final) y las variables articulares (proporcionadas por codificadores ópticos), como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$x = f(q), \tag{2.1}$$

donde $x \in \mathbb{R}^{3\times1}$ denota el vector de coordenadas operativas y $q \in \mathbb{R}^{3\times1}$ es el vector de coordenadas articulares.

La cadena cinemática del dispositivo háptico Touch y la representación de variables y constantes involucradas en el modelo se muestran en la Figura 2.3. Donde $L_1 = L_2 = 0.135$ m representan la longitud de sus eslabones, $A = 0.035$ m, $L_4 = L_1 + A$ y $L_3 = 0.025$ m representan variables auxiliares para obtener el modelo cinemático [23].

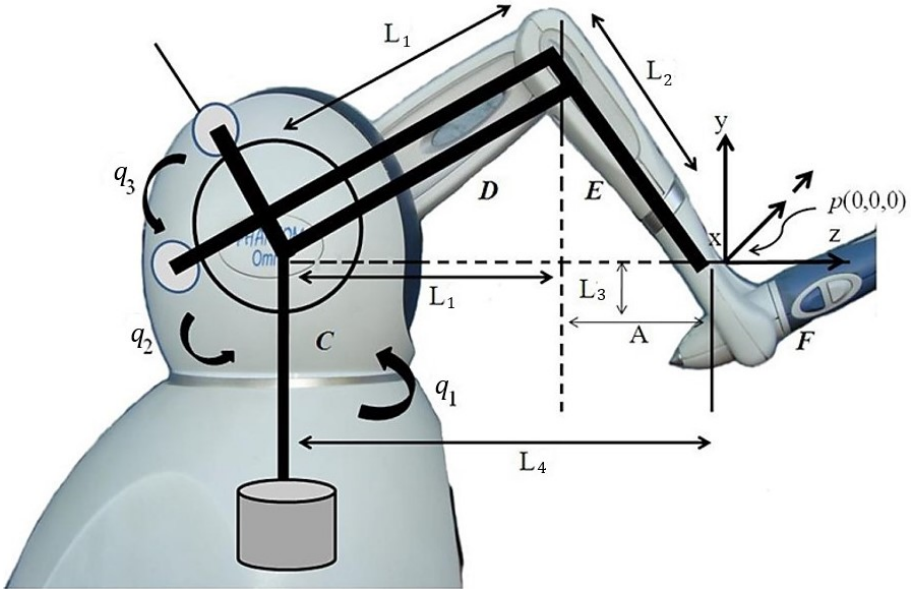



Figura 2.3: Cadena cinemática del dispositivo háptico Touch [23].

Los elementos del vector de posición correspondiente al MCDP, se dan como en el conjunto de Ecuaciones 2.2:

$$\begin{aligned} x =& - s_1(L_1c_2 + L_2s_3), \\ y =& L_3 - L_2c_3 + L_1s_2, \\ z =& - L_4 + c_1\left(L_1c_2 + L_2s_3\right), \end{aligned} \tag{2.2}$$

donde $c_i = cos(q_i)$ y $s_i = sin(q_i)$ y si es el caso $c_{i-j} = cos(q_i - q_j)$ y $s_{i-j} = sin(q_i - q_j)$ con $i, j = 1, 2, 3$.

### 2.3.2. Modelo cinemático inverso de posición (MCIP)

El MCIP es el cálculo de los ángulos $q_i$ con $i = 1, 2, 3$ de cada articulación en función de la posición del efector final en coordenadas cartesianas y está definido por la Ecuación 2.3 [23].

$$q = f^{-1}(x), \tag{2.3}$$

la cual es la solución que define $q_1, q_2$ y $q_3$ en función de las coordenadas cartesianas $x, y$ y $z$.

Los elementos del vector de posición articular correspondiente al MCIP se dan como en el conjunto de Ecuaciones 2.4 [49].

$$\begin{aligned} q_1 =& - atan2(x, z + L_4), \\ q_2 =& \gamma + \beta, \\ q_3 =& q_2 + \alpha - \frac{\pi}{2}, \end{aligned} \tag{2.4}$$

las cuales se determinan con el uso del siguiente conjunto de Ecuaciones (2.5) obtenidas por ley de senos y cosenos según corresponda:

$$\begin{aligned} R =& \sqrt{x^2 + (z + L_4)^2}, \\ r =& \sqrt{x^2 + (z + L_4)^2 + (y - L_3)^2}, \\ \beta =& atan2(y - L_3, R), \\ \gamma =& cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + r^2 - 2L_2^2}{2L_1 r}\right), \\ \alpha =& cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - r^2}{2L_1 L_2}\right). \end{aligned} \tag{2.5}$$

### 2.3.3. Modelo cinemático directo de velocidad (MCDV)

El MCDV se define como se muestra en la Ecuación 2.6 [45]:

$$\dot{x} = J\dot{q}, \tag{2.6}$$

donde $\dot{x} \in \mathbb{R}^{3\times1}$ denota el vector de velocidades operacionales, $J(q) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ representa la matriz Jacobiana del dispositivo háptico y $\dot{q} \in \mathbb{R}^{3\times1}$ es el vector de velocidades articulares. Ordenando de forma matricial la Ecuación 2.6 se obtiene la Ecuación 2.7 [23].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_3} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_3} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q_1} \\ \dot{q_2} \\ \dot{q_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1(L_1c_2 + L_2s_3) & L_1s_1s_2 & -L_2s_1c_3 \\ 0 & L_1c_2 & L_2s_3 \\ -s_1(L_1c_2 + L_2s_3) & -L_1c_1s_2 & L_2c_1c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q_1} \\ \dot{q_2} \\ \dot{q_3} \end{bmatrix}. \tag{2.7}$$

### 2.3.4. Modelo cinemático inverso de velocidad (MCIV)

El MCDV se define como se muestra en la Ecuación 2.8, obtenida de la Ecuación 2.6:

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{x}, \tag{2.8}$$

donde $J(q)^{-1} \in \mathbb{R}^{3\times3}$ corresponde a la inversa de la matriz Jacobiana y está dada como (2.9):

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{det(J)}, \tag{2.9}$$

donde $adj(J)$ define la adjunta de la matriz Jacobiana y $det(J)$ define su determinante, como en la Ecuación (2.11):

$$adj(J) = \begin{bmatrix} L_1L_2c_1c_{2-3} & 0 & L_1L_2s_1c_{2-3} \\ -L_2s_1s_3\left(L_1c_2 + L_2s_3\right) & -L_2c_3\left(L_1c_2 + L_2s_3\right) & L_2c_1s_3\left(L_1c_2 + L_2s_3\right) \\ L_1s_1c_2\left(L_1c_2 + L_2s_3\right) & -L_1s_2\left(L_1c_2 + L_2s_3\right) & -L_1c_1c_2\left(L_1c_2 + L_2s_3\right) \end{bmatrix}, \tag{2.10}$$

$$det(J) = -L_1L_2\left(L_1c_2 + L_2s_3\right)c_{2-3}. \tag{2.11}$$

### 2.3.5. Modelo cinemático directo de aceleración (MCDA)

El MCDA se define como en la Ecuación (2.12), obtenida de la derivada de la Ecuación 2.6:

$$\ddot{x} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left\{J\dot{q}\right\} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}, \tag{2.12}$$

donde $\ddot{x} \in \mathbb{R}^{3\times1}$ denota el vector de aceleraciones operativas, $\dot{J}(q,\dot{q}) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ representa la derivada temporal de la matriz Jacobiana del dispositivo háptico y $\ddot{q} \in \mathbb{R}^{3\times1}$ es el vector de aceleraciones articulares. La matriz $\dot{J}(q,\dot{q})$ del dispositivo háptico Touch se muestra a continuación en la Ecuación (2.13):

$$\dot{J}(q,\dot{q}) = \begin{bmatrix} s_1\left(L_1c_2 + L_2s_3\right)\dot{q}_1 + c_1\left(L_1s_2\dot{q}_2 - L_2c_3\dot{q}_3\right) & L_1c_1s_2\dot{q}_1 + L_1s_1c_2\dot{q}_2 & L_2s_1s_3\dot{q}_3 - L_2c_1c_3\dot{q}_1 \\ 0 & -L_1s_2\dot{q}_2 & L_2c_3\dot{q}_3 \\ -c_1\left(L_1c_2 + L_2s_3\right)\dot{q}_1 + s_1\left(L_1s_2\dot{q}_2 - L_2c_3\dot{q}_3\right) & L_1s_1s_2\dot{q}_1 - L_1c_1c_2\dot{q}_2 & -L_2s_1c_3\dot{q}_1 - L_2c_1s_3\dot{q}_3 \end{bmatrix}. \tag{2.13}$$

### 2.3.6. Modelo cinemático inverso de aceleración (MCIA)

El MCIA se define como en la Ecuación (2.14), obtenida de la Ecuación 2.12:

$$\ddot{q} = J^{-1}\left\{\ddot{x} - \dot{J}\dot{q}\right\}, \text{ donde } |J| \neq 0. \tag{2.14}$$

### 2.3.7. Simulación digital

En esta sección se evalúa el modelo cinemático del sistema.
Con el uso del software MATLAB y de las ecuaciones anteriormente mostradas en esta sección se procede con la simulación numérica y comprobar el comportamiento del sistema, por lo cual son necesarios considerar una serie de pasos a seguir los cuales se muestran en forma de diagrama de flujo en la Figura 2.4:

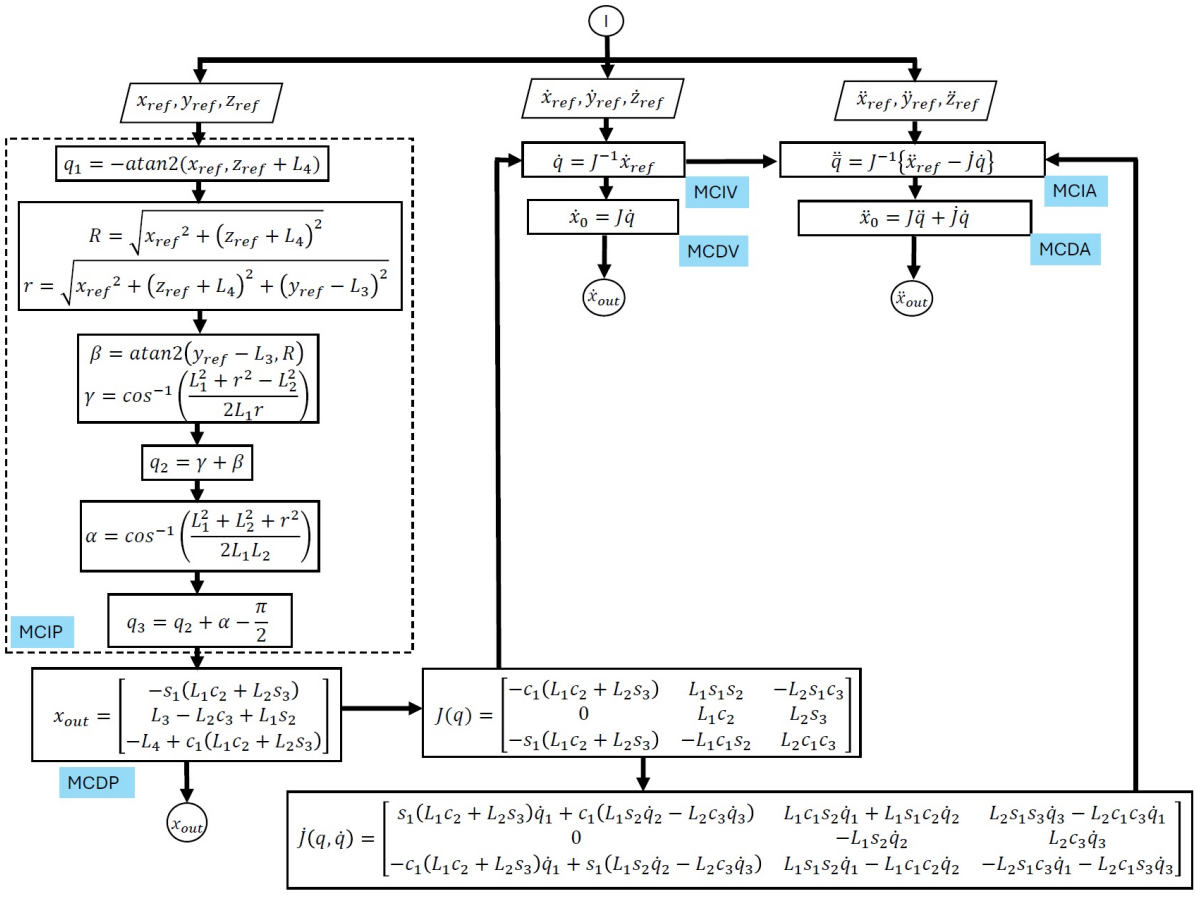



Figura 2.4: Diagrama de flujo de la cinemática del dispositivo háptico Touch.

En el diagrama se muestra que es necesario definir una posición o una ruta de referencia, la cual es establecida por el usuario, y de esta se derivan sus velocidades y aceleraciones, aplicando el MCIP se obtienen sus posiciones articulares, por lo cual el robot usa esta información para ubicar los eslabones en la posición deseada usando la señal de sus codificadores ópticos, una vez posicionado el efector final en la posición deseada se usa el MCDP para verificar que el efector final se encuentre correctamente en la posición, de igual manera con el uso del Jacobiano se obtienen velocidad y aceleración articulares y cartesianas usando los modelos inversos y directos del sistema respectivamente.

Para el inicio de la simulación se optó por una trayectoria en forma de rosa de ocho pétalos, la cual se desplaza por el área de trabajo de forma más amplia a que si usáramos solo una circunferencia permitiendo verificar el desempeño del robot basado en la manipulabilidad cinemática, a continuación se muestra la Ecuación 2.15 utilizada y su respuesta obtenida comparando la referencia y la señal de salida en la Figura 2.5.

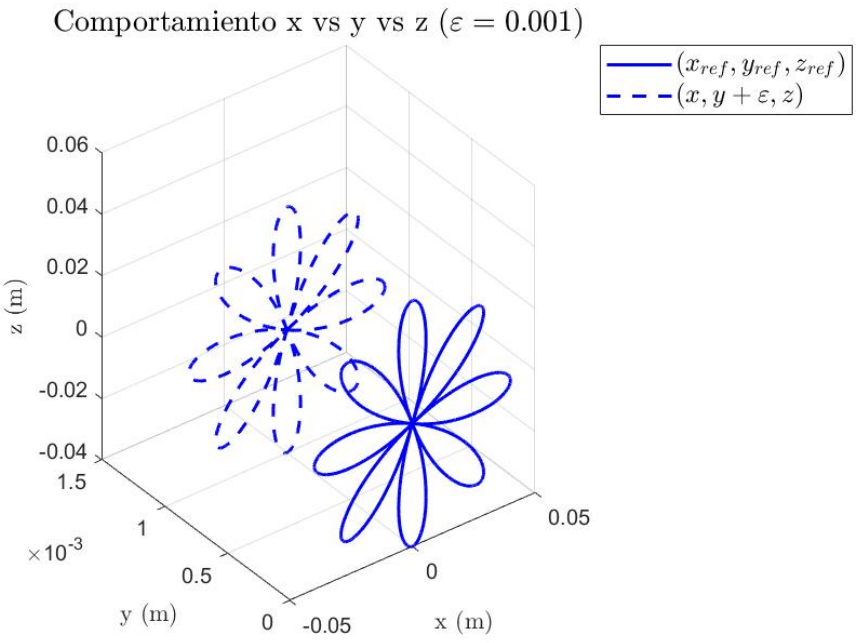
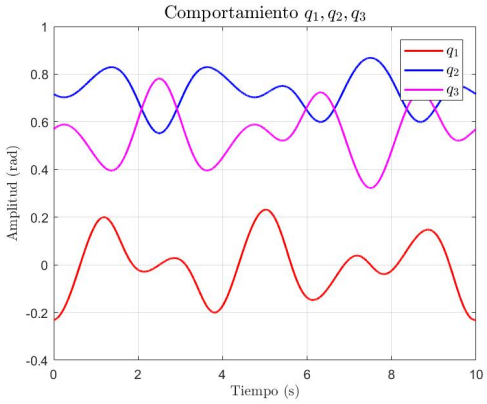



Figura 2.5: Cinemática en $x$ vs $y$ vs $z$ con trayectoria en forma de rosa de 8 pétalos.

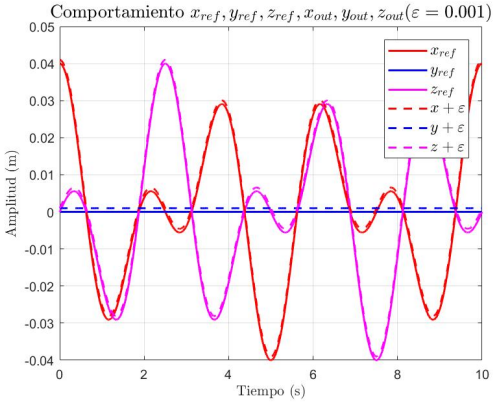
$$\begin{aligned} x_{ref} &= h + rcos(\eta\omega t)cos(\omega t), \\ y_{ref} &= 0, \\ z_{ref} &= k + rcos(\eta\omega t)sin(\omega t), \end{aligned} \tag{2.15}$$

donde $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia con periodo $T = 10$ s, $r = 0.04$ m es el radio de la rosa, $h = 0$ y $k = 0$ son sus coordenadas $(x, z)$ del centro, $\eta = 4$ define el número de pétalos y para este caso se le dio un valor constante a $y = 0$.

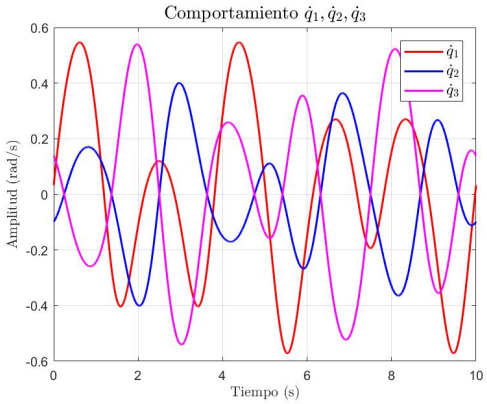
Para una mejor comprensión de los resultados, al verificar el mapeo correcto de la cinemática inversa a directa e inversamente llegando al mismo resultado. Para evitar obtener la misma respuesta en algunas figuras, se hace uso de un desfase llamado $\varepsilon$, el cual se muestra en el título de algunas gráficas junto a su valor respectivo, el cual permite visualizar las señales que, de no ser por este, estarían sobrepuestas. Usando las ecuaciones de cinemática mostradas anteriormente, se muestran las respuestas comparando la referencia y la respuesta del modelo inverso tanto de posición (Figura 2.6b), velocidad (Figura 2.6d) y aceleración (Figura 2.7b) como también se muestran sus posiciones (Figura 2.6a), velocidades (Figura 2.6c) y aceleraciones articulares (Figura 2.7a) del modelo directo.



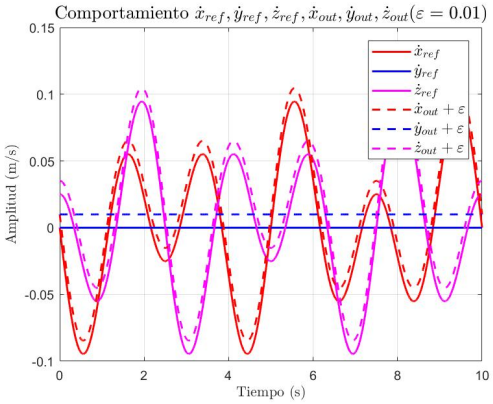

(a) Cinemática posición de $q$.




(b) Cinemática posición de $x$.

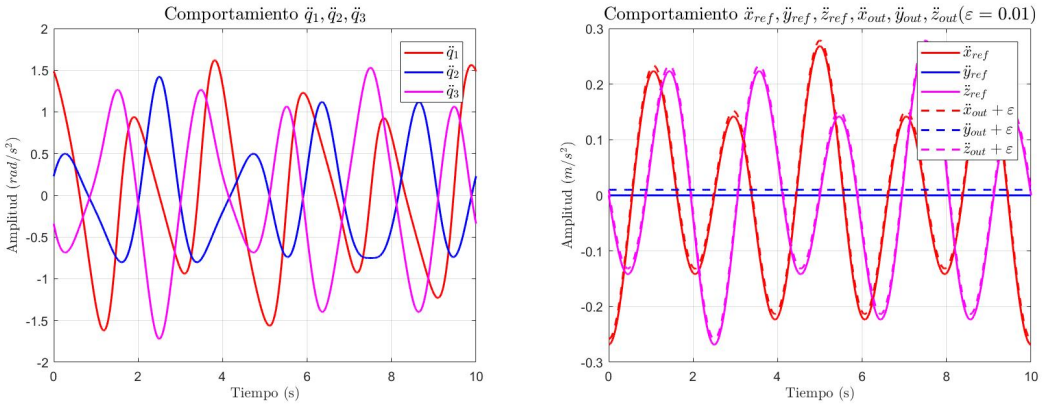



(c) Cinemática velocidad de $q$.




(d) Cinemática velocidad de $x$.

Figura 2.6: Resultados del modelo cinemático (posición y velocidad).




(a) Cinemática de aceleración de $q$. (b) Cinemática de aceleración de $x$.

Figura 2.7: Resultados del modelo cinemático (aceleración).

### 2.3.8. Manipulabilidad de Yoshikawa

El concepto de relación de manipulabilidad de los robots se propone como una relación cuantitativa de su capacidad de manipular la posición y orientación del efector final, que tiene en cuenta la cinemática del robot. Esta relación se define sobre el uso del Jacobiano del robot [55], como se muestra en la Ecuación 2.16.

$$w = \sqrt{det(JJ^{-1})}, \tag{2.16}$$

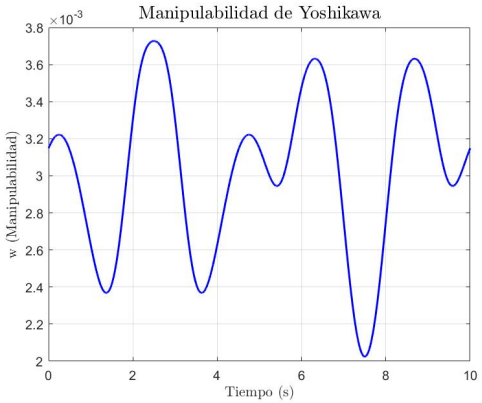



Figura 2.8: Manipulabilidad según Yoshikawa.

La respuesta numérica de la manipulabilidad se muestra en la Figura 2.8, donde se pueden apreciar 5 picos máximos debido a que 5 pétalos de la roza se encuentran en el

área de alta manipulabilidad comparados con los 3 pétalos restantes con picos mínimos con baja manipulabilidad.

## 2.4. Modelo dinámico

La ecuación que describe la dinámica del dispositivo háptico para estudio experimental de la propuesta de control es representada por la ecuación estándar asociada a un robot manipulador (Ecuación 2.17).

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = \tau, \tag{2.17}$$

donde $H(q) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ es la matriz de fuerzas inerciales, $C(q) \in \mathbb{R}^{3\times3}$ la matriz que considera las fuerzas centrífugas y de Coriolis, $G(q) \in \mathbb{R}^{3\times1}$ el vector de efectos gravitacionales, $F(\dot{q}) \in \mathbb{R}^{3\times1}$ el vector de fricción viscosa-Coulomb y $\tau \in \mathbb{R}^{3\times1}$ el vector de pares generalizados actuando en las articulaciones.

En la Ecuación 2.18 se muestra la representación matricial de la Ecuación 2.17 para el dispositivo háptico Touch

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}, \tag{2.18}$$

donde:

$$\begin{aligned}
H_{11} =& \theta_1 + \theta_2 c_{22} + \theta_3 s_{23} + \theta_4 c_2 s_3, \\
H_{12} =& \theta_5 s_2, \\
H_{13} =& 0, \\
H_{21} =& \theta_5 s_2, \\
H_{22} =& \theta_6, \\
H_{23} =& -0.5\theta_4 s_{2-3}, \\
H_{31} =& 0, \\
H_{32} =& -0.5\theta_4 s_{2-3}, \\
H_{33} =& \theta_7,
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
C_{11} =& -\theta_2\dot{q}_2 s_{22} - \theta_3\dot{q}_3 s_{23} - 0.5\theta_4\dot{q}_2 s_2 s_3 + 0.5\theta_4\dot{q}_3 c_2 c_3,\\
C_{12} =& -\theta_2\dot{q}_1 s_{22} + 0.5\theta_5\dot{q}_2 c_2 - 0.5\theta_4\dot{q}_1 s_2 s_3,\\
C_{13} =& -\theta_3\dot{q}_1 s_{23} + 0.5\theta_4\dot{q}_1 c_2 c_3,\\
C_{21} =& \theta_2\dot{q}_1 s_{22} + 0.5\theta_4\dot{q}_1 s_2 s_3,\\
C_{22} =& 0,\\
C_{23} =& 0.5\theta_4\dot{q}_3 c_{2-3},\\
C_{31} =& \theta_3\dot{q}_1 s_{23} + 0.5\theta_4\dot{q}_1 c_2 c_3,\\
C_{32} =& -0.5\theta_4\dot{q}_2 c_{2-3},\\
C_{33} =& 0,
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
G_1 =& 0,\\
G_2 =& \theta_8 c_2 + \theta_{10}(q2 - 0.5\pi),\\
G_3 =& \theta_9 s_3,
\end{aligned}
$$

Los parámetros dinámicos $\theta_1, \cdots, \theta_{10}$ son definidos en la Tabla 2.2. El vector de fuerzas $F(\dot{q})$ de fricción viscosa-Coulomb [45], es descrito en la Ecuación 2.19,

$$F(\dot{q}) = b\dot{q} + f_c sgn(\dot{q}), \tag{2.19}$$

en donde, $b = b^T \in \mathbb{R}^{3\times3}$, es una matriz diagonal y definida positiva, con los coeficientes de fricción articular; $f_c = f_c^T \in \mathbb{R}^{3\times3}$, es una matriz diagonal y definida positiva, con los coeficientes de fricción seca o de Coulomb; $\dot{q} = \begin{bmatrix}\dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \dot{q}_3\end{bmatrix}^T$ corresponde al vector de velocidades articulares, y $sgn(\dot{q}) = \begin{bmatrix}sgn(\dot{q}_1) & sgn(\dot{q}_2) & sgn(\dot{q}_3)\end{bmatrix}^T$, corresponde al vector de funciones de saturación, cuya aproximación en tareas de simulación, compensación o inyección dinámica a través de una estrategia de control, es definida como:

$$\lim_{\beta\to\infty} tanh(\beta\dot{q}) = sgn(\dot{q}) \tag{2.20}$$

Para un dispositivo háptico, el diseño del mecanismo de eslabones articulados procura una mínima o poco significativa magnitud de $b$ y $f_c$, particularmente para tareas de exploración háptica (retroalimentación de fuerza kinestésica); sin embargo, en tareas de guido háptico, la inyección de fricción para asegurar condiciones de pasividad en lazo cerrado con el operador humano en el lazo, es requerido.

| Parámetros | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| $\theta_1$ | $1.798x10^{-3}$ | $Kgm^2$ |
| $\theta_2$ | $0.864x10^{-3}$ | $Kgm^2$ |
| $\theta_3$ | $0.4586x10^{-3}$ | $Kgm^2$ |
| $\theta_4$ | $2.766x10^{-3}$ | $Kgm^2$ |
| $\theta_5$ | $0.308x10^{-3}$ | $Kgm^2$ |
| $\theta_6$ | $2.526x10^{-3}$ | $Kgm^2$ |
| $\theta_7$ | $0.652x10^{-3}$ | $Kgm^3/s^2$ |
| $\theta_8$ | $164.158x10^{-3}$ | $Kgm^3/s^2$ |
| $\theta_9$ | $94.050x10^{-3}$ | $Kgm^3/s^2$ |
| $\theta_{10}$ | $117.294x10^{-3}$ | $Kgm^3/s^2$ |

Tabla 2.2: Parámetros del modelo dinámico del dispositivo háptico Touch [49].

### 2.4.1. Propiedades del modelo dinámico

**Propiedad 1.** Existe una constante real positiva $\alpha$ tal que:

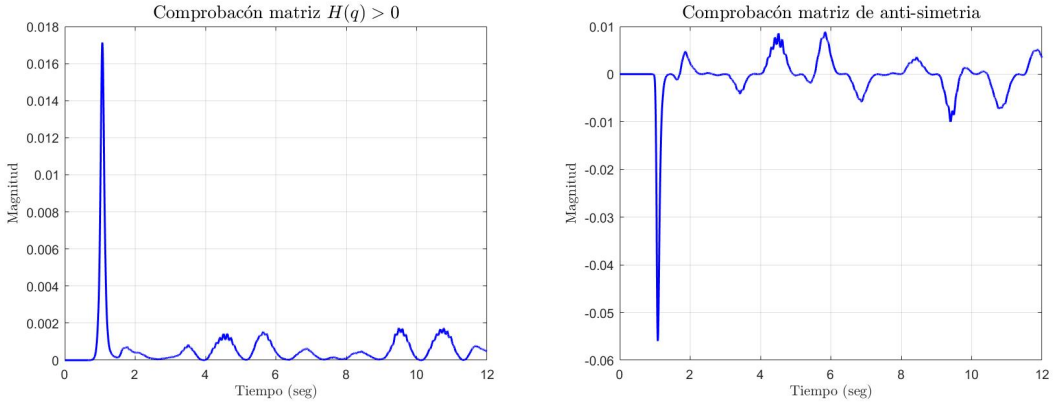
$$H(q) \geq \alpha I \qquad \forall q \in \mathbb{R}^n, \tag{2.21}$$

donde $I$ denota la matriz identidad de dimensión $n \times n$. La matriz $H(q)$ existe si y solo si $H(q)^{-1}$ existe y es definida positiva (validación experimental Figura 2.9a).

**Propiedad 2.** La matriz $C(q, \dot{q})$ está relacionada con la matriz de inercia $H(q)$ por la expresión:

$$x^T \left[ \frac{1}{2} \dot{H}(q) - C(q, \dot{q}) \right] x \equiv 0 \qquad \forall q, \dot{q}, x \in \mathbb{R}^n, \tag{2.22}$$

y $\frac{1}{2}\dot{H}(q) - C(q, \dot{q})$ es una matriz antisimétrica [27] (validación experimental, Figura 2.9b).




(a) Prueba de la propiedad 1. (b) Prueba de la propiedad 2.

Figura 2.9: Pruebas numéricas de las propiedades basadas en el experimento de la rosa de 8 pétalos (Figura 2.5).

### 2.4.2. Diseño del filtro de velocidad

El uso de filtros es de suma importancia debido a que se utiliza para la eliminación de interferencia, ruido no deseado, limitar el ancho de banda, sintonización de señales, procesamiento de señales, acondicionamiento.
Para nuestro caso es importante el uso de un filtro, dado que durante la adquisición de datos del dispositivo háptico Touch, se obtiene ruido al procesar la información de la velocidad operacional, por lo cual se hace uso de uno de los filtros más usados que es el filtro de Butterworth.
El filtro de Butterworth es uno de los filtros clásicos, diseñado para obtener la respuesta más plana posible hasta la frecuencia de corte [7].

**Diseño del filtro Butterworth.**

Si llamamos H a la función de transferencia, se debe cumplir que las 2N-1 primeras derivadas de $|H(w)^2|$ sean cero para $w = 0$ y $w = \infty$. Únicamente posee polos y el cuadrado de la magnitud de la función de transferencia (para el filtro pasa baja de ganancia unitaria en la banda de paso) es [38]:

$$|H(w)|^2 = \frac{1}{1 + (w/w_c)^{2N}}, \tag{2.23}$$

donde N es el orden del filtro, $w_c$ es la frecuencia de corte (en la que la respuesta cae

unos 3 dB por debajo de la banda pasante) y $w$ es la frecuencia angular.
La función de transferencia para dicho filtro pasa bajos es:

$$H(s) = \frac{1}{\prod_n^{k=1}(s - s_k)/w_c}, \tag{2.24}$$

siendo $s_k$ los polos del filtro, cuya expresión es:

$$s_k = w_c e^{\frac{j(2k+n-1)\pi}{2n}}, k = 1, 2, 3, ..., n. \tag{2.25}$$

Algunos polinomios de Butterworth de orden 1, 2 y 3, normalizados haciendo $\omega_c = 1$, son:

$$H(s) = \frac{1}{s+1}, \tag{2.26}$$

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}, \tag{2.27}$$

$$H(s) = \frac{1}{(s+1)(s^2+s+1)}. \tag{2.28}$$

**Aplicación del filtro Butterworth de 2° orden.**

Para nuestro caso haremos uso de la función de transferencia del filtro Butterworth de segundo orden mostrado en la Ecuación 2.27. En configuración pasa baja se obtendría la ecuación siguiente:

$$H(s) = \frac{w_c^2}{s^2 + \sqrt{2}w_c s + w_c^2}. \tag{2.29}$$

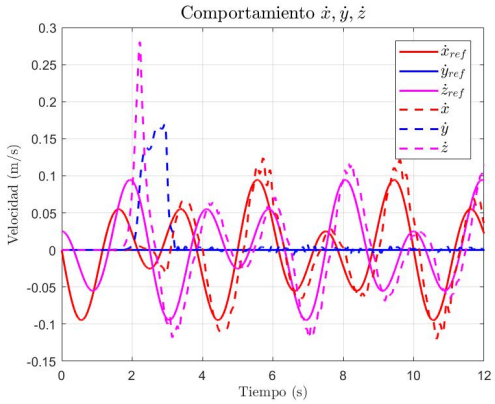
La Ecuación 2.29 se discretiza considerando una frecuencia de corte de $w_c = 0.005\ rad/s$ y un tiempo de muestreo de $T_s = 0.001\ s$ para poder usarla en la simulación, por lo que necesitamos la función de transferencia en Z, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} H(z) =& \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + b(3)z^{-2}}{a(1) + a(2)(k-1) + a(3)(k-2)} \\ =& \frac{6.1006e-5 + 1.2202e-4z^{-1} + 6.1006e-5z^{-2}}{1 - 1.9778(k-1) + 0.978(k-2)}, \end{aligned} \tag{2.30}$$

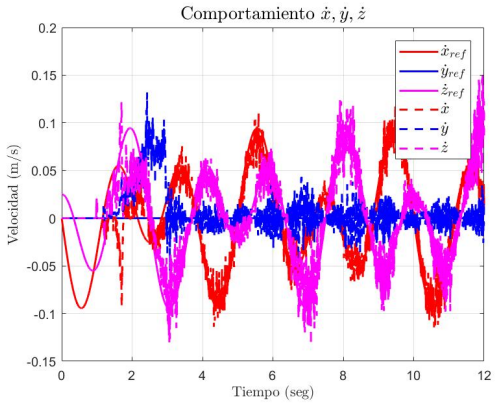
donde M es la salida y E es la entrada del filtro, a la cual le corresponde una ecuación en diferencias como se muestra a continuación:

$$M(k) = 6.1006e-5E(k) + 1.2202e-4E(k-1) + 6.1006e-5E(k-2) \\ +1.9778M(k-1) - 0.978M(k-2). \tag{2.31}$$

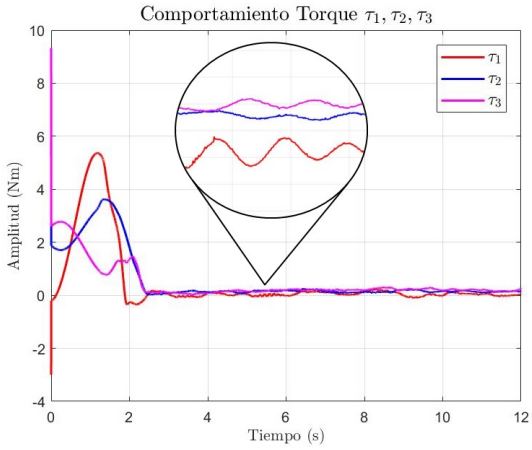
Para poder visualizar más fácilmente la importancia del filtro en el sistema, se hizo una comparación de algunas señales obtenidas de la respuesta experimental con el dispositivo háptico Touch sin el uso del filtro y la respuesta con el uso del filtro Butterworth de segundo orden, como se observa en la Figura 2.10.



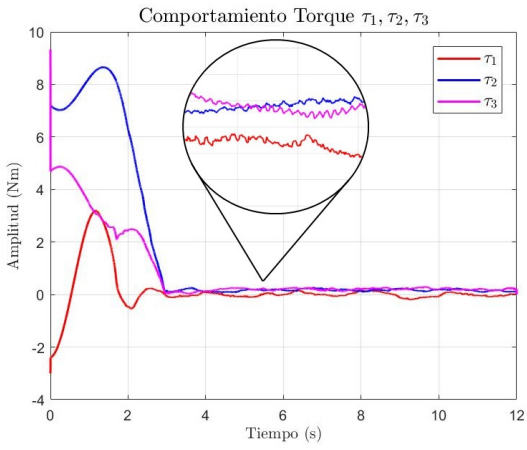

(a) Respuesta $\dot{x}$ con filtro.




(b) Respuesta $\dot{x}$ sin filtro.




(c) Respuesta $\tau$ con filtro con zoom en un punto específico.




(d) Respuesta $\tau$ sin filtro con zoom en un punto específico.

Figura 2.10: Comparación del uso del filtro Butterworth 2° orden.

### 2.4.3. Control PD+

En esta sección se da la información utilizada sobre el control PD con compensación de la dinámica gravitacional o PD+, el cual es capaz de satisfacer el objetivo de control de posición en forma global para robots de $n$ grados de libertad. En esta ley de control se requiere el conocimiento previo de una parte del modelo dinámico del robot a ser controlada, puesto que usa el vector de pares gravitacionales $G(q)$.
La ley de control PD con compensación de la gravedad está representada por la Ecuación 2.32:

$$\tau = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}} + G(q), \tag{2.32}$$

donde $\tau \in \mathbb{R}^{3\times1}$ es el vector de pares generalizados actuando en las articulaciones; $K_p = K_p^T > 0 \in \mathbb{R}^{3\times3}$, y $K_d = K_d^T > 0 \in \mathbb{R}^{3\times3}$ corresponden a las matrices de ganancias de control. La ley de control (Ecuación 2.32) requiere datos sobre la posición deseada $q_d(t)$ y la velocidad deseada $\dot{q}_d$, así como medición de la posición $q(t)$ y la velocidad $\dot{q}(t)$ a cada instante. La Figura 2.11 muestra el diagrama de bloques correspondiente al control PD con compensación de gravedad de robots [27].

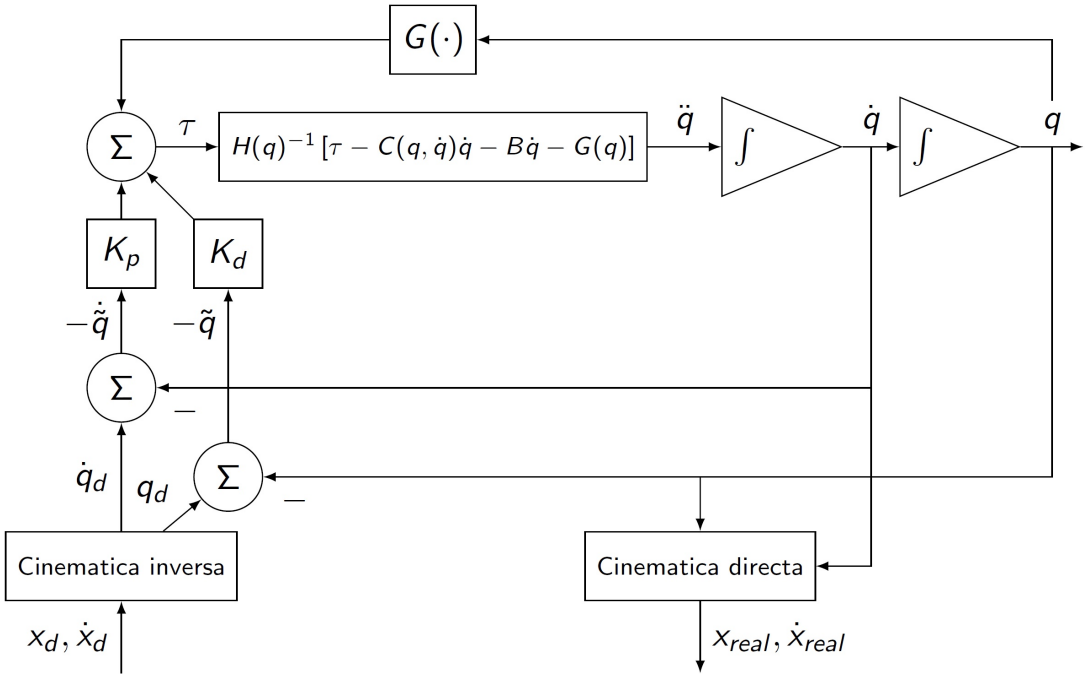



Figura 2.11: Diagrama de bloques del control PD con compensación de gravedad.

La ecuación que gobierna el comportamiento en lazo cerrado se obtiene sustituyendo la acción de control $\tau$ de la ley de control (Ecuación 2.32) en la ecuación general de un robot manipulador (Ecuación 2.17).

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}}. \tag{2.33}$$

### 2.4.4. Análisis de la estabilidad del control PD+

Para analizar la estabilidad del control PD+ en lazo cerrado, se considera la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\tilde{q},\dot{q}) = \frac{1}{2}\dot{q}^T H(q)\dot{q} + \frac{1}{2}\tilde{q}^T K_p\tilde{q}, \tag{2.34}$$

que es definida positiva porque tanto la matriz de inercia $H(q)$, como una matriz de posición (o proporcional) $K_p$ son definidas positivas.
Derivando la Ecuación 2.34 con respecto al tiempo, se obtiene:

$$\dot{V}(\tilde{q},\dot{q}) = \dot{q}^T H(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T\dot{H}(q)\dot{q} + \tilde{q}^T K_p\dot{\tilde{q}}. \tag{2.35}$$

Despajando $H(q)\ddot{q}$ de la ecuación de lazo cerrado (Ecuación 2.33) y sustituyendo en la Ecuación 2.35 se llega a:

$$\dot{V}(\tilde{q},\dot{q}) = -\dot{q}^T K_d\dot{q} \leq 0, \tag{2.36}$$

donde el término $\dot{q}^T[\frac{1}{2}\dot{H} - C]\dot{q}$ ha sido eliminado por la Propiedad de Antisimétrica (Ecuación 2.22). Se asegura la estabilidad del punto de equilibrio de la ecuación de lazo cerrado (Ecuación 2.33) definiendo a $K_d > 0$ definida positiva [27].

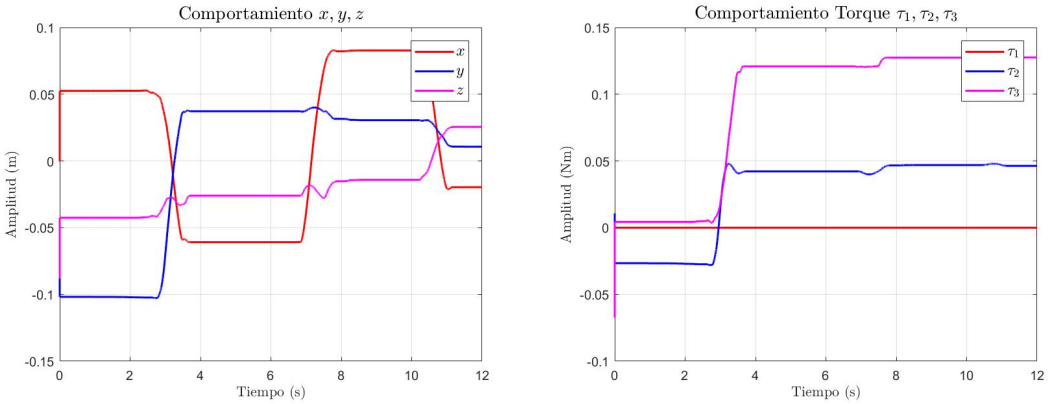
### 2.4.5. Prueba experimental de la compensación del vector de fuerzas gravitacionales

Para esta prueba se demuestra el comportamiento del sistema ante la compensación de la gravedad haciendo uso de la Ecuación 2.32 tomando en cuenta las siguientes consideraciones: de la ecuación $\tilde{q} = q - q_d$, $q_d = q =$ constante, por lo que $\tilde{q} = 0$ y su derivada, $\dot{\tilde{q}} = \dot{q}$ por lo que se obtiene la siguiente ley de control:

$$\tau = -K_d\dot{q} + G(q), \tag{2.37}$$

la cual se divide en dos partes, la primera es una inyección dinámica de fricción establecida por la matriz $K_d$ y la compensación de la gravedad por $G(q)$, se obtiene la ecuación en lazo cerrado, sustituyendo en la Ecuación 2.17 mostrada a continuación:

$$\begin{aligned} H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) &= -K_d\dot{q} + G(q) \\ H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + K_d\dot{q} &= 0 \end{aligned} \tag{2.38}$$




(a) Respuesta de $x$ con compensación de gravedad.

(b) Respuesta de $\tau$ con compensación de gravedad.

Figura 2.12: Resultado experimental de uso de compensación de gravedad.

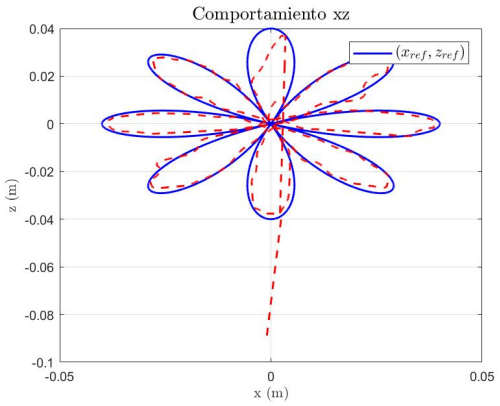
En el grupo de Figuras anteriores (Figura 2.12) se muestran los resultados del experimento del uso de la ley de control para compensación de gravedad (Ecuación 2.37), en los cuales se hacen cambios en la posición del efector final. La ley de control se permite mantener la posición de forma constante en los instantes $t = 0$ s, $t = 3.4$ s, $t = 7.8$ s y $t = 11.14$ s, demostrando de este modo el efecto de compensación de gravedad.

### 2.4.6. Resultado experimental usando control PD+

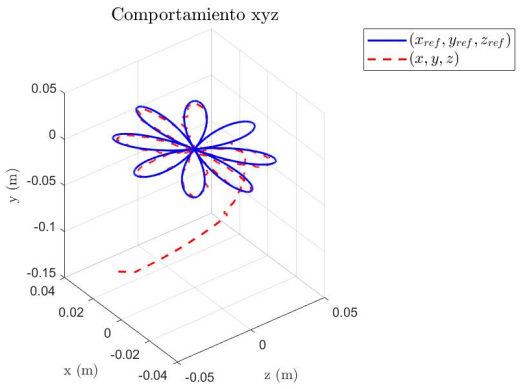
Usando la información de las ecuaciones de cinemática mostradas anteriormente, la referencia de la rosa de 8 pétalos (Ecuación 2.15) y la ecuación dinámica del dispositivo háptico Touch (Ecuación 2.17), se hicieron algunas pruebas experimentales, y así poder

obtener el desempeño del sistema dinámico con el uso de un control PD+.

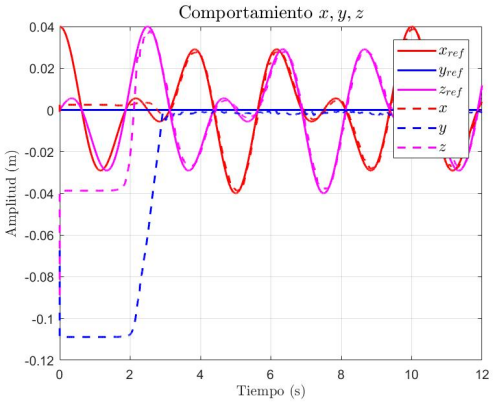
Es importante analizar la robustez del control ante la presencia de perturbaciones, por lo cual se tomaron los datos del seguimiento de la trayectoria sin la presencia de perturbaciones, como también los datos del experimento aplicando una perturbación contante a partir de 8.3 segundos hasta finalizar el experimento (Figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16).



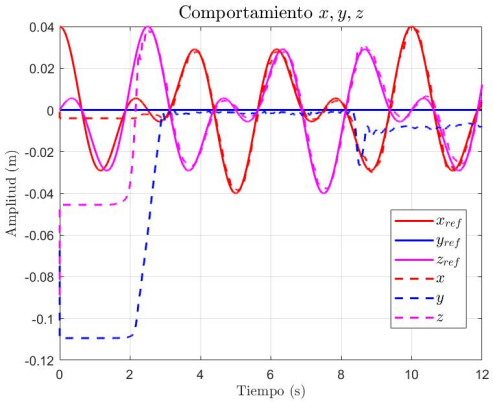

(a) Respuesta experimental plano de trabajo xz.




(b) Respuesta experimental espacio de trabajo xyz.

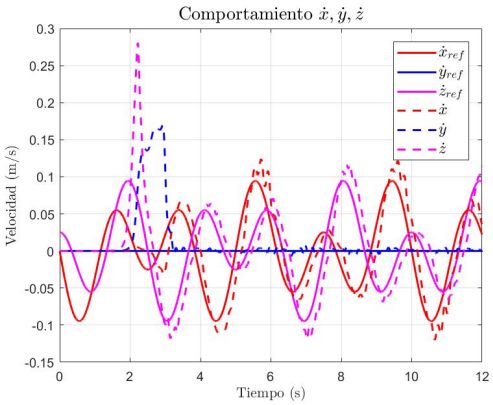



(c) Respuesta experimental $x$ sin perturbaciones.

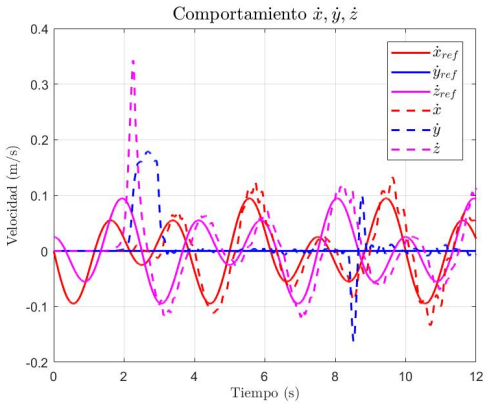



(d) Respuesta experimental $x$ con perturbación constante en 8.3 s.

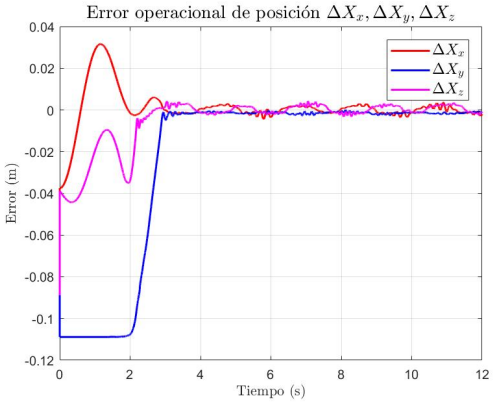
Figura 2.13: Resultado experimental con control PD+, parte 1.



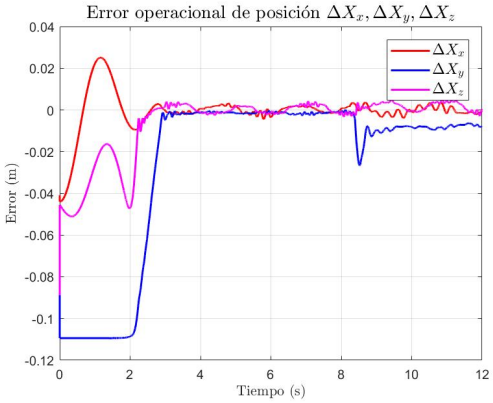

(a) Respuesta experimental $\dot{x}$ sin perturbaciones.



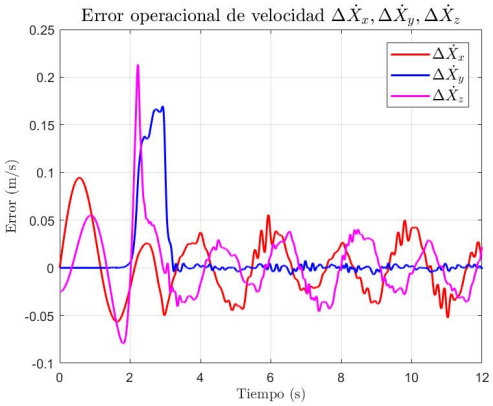

(b) Respuesta experimental $\dot{x}$ con perturbación constante en 8.3 s.



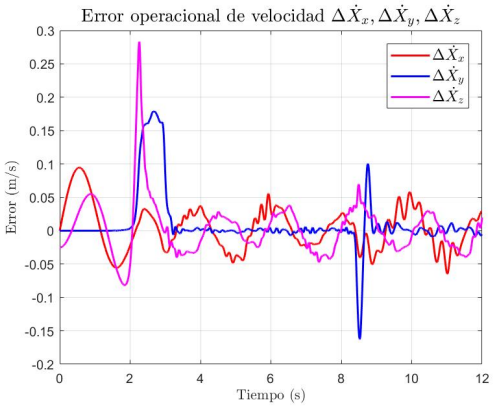

(c) Respuesta experimental $\Delta x$ sin perturbaciones.




(d) Respuesta experimental $\Delta x$ con perturbación constante en 8.3 s.

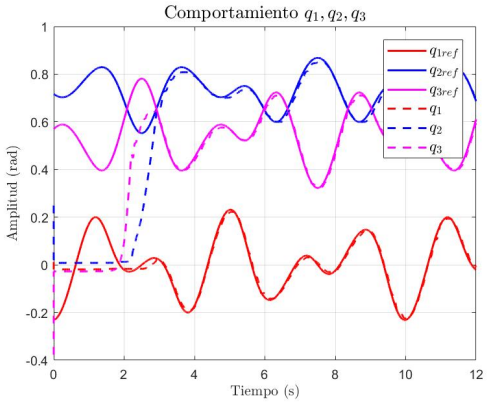



(e) Respuesta experimental $\Delta \dot{x}$ sin perturbaciones.

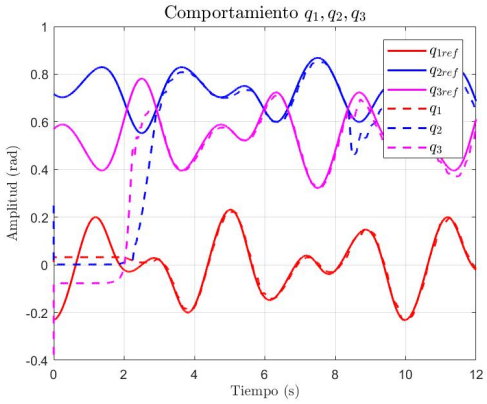



(f) Respuesta experimental $\Delta \dot{x}$ con perturbación constante en 8.3 s.

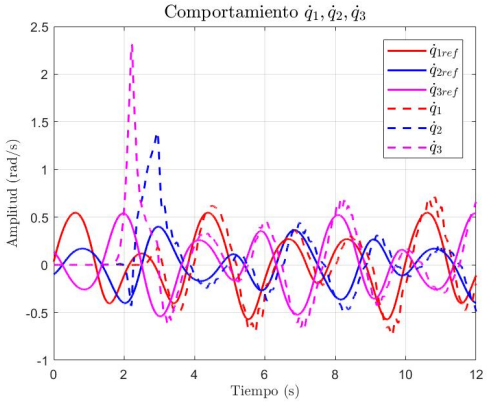
Figura 2.14: Resultado experimental con control PD+, parte 2.



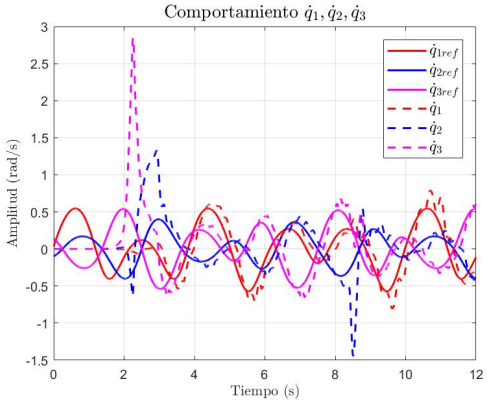

(a) Respuesta experimental $q$ sin perturbaciones.



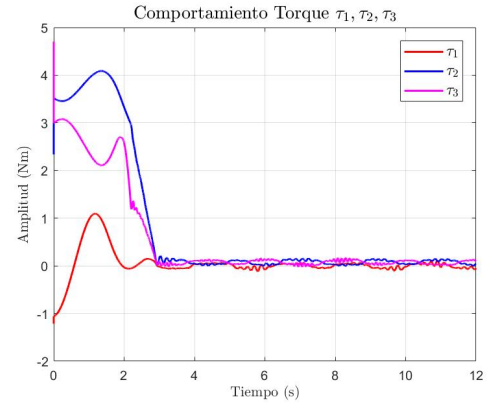

(b) Respuesta experimental $q$ con perturbación constante en 8.3 s.



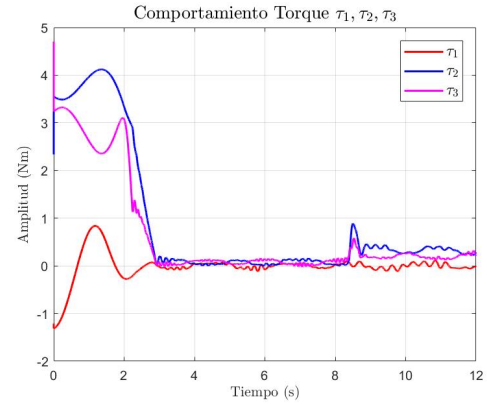

(c) Respuesta experimental $\dot{q}$ sin perturbaciones.




(d) Respuesta experimental $\dot{q}$ con perturbación constante en 8.3 s.

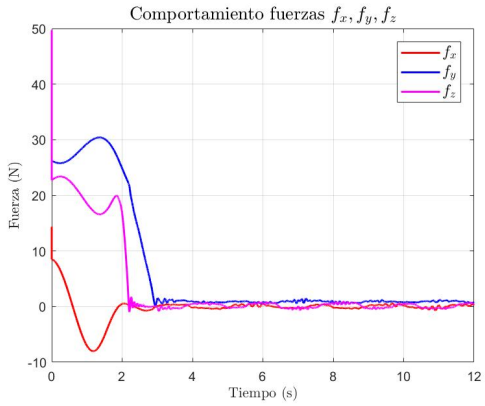



(e) Respuesta experimental $\tau$ sin perturbaciones.

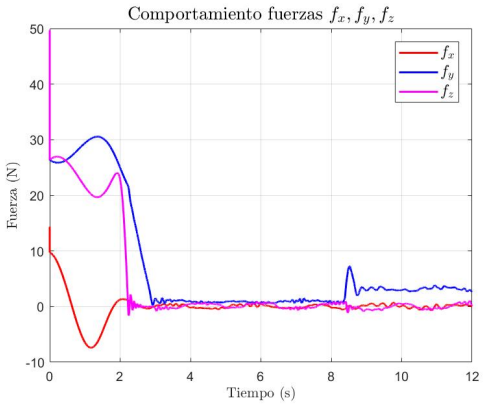



(f) Respuesta experimental $\tau$ con perturbación constante en 8.3 s.

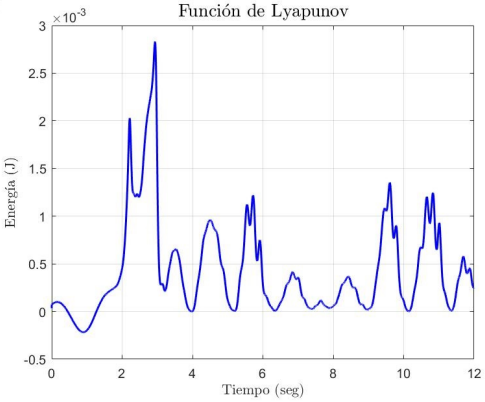
Figura 2.15: Resultado experimental con control PD+, parte 3.



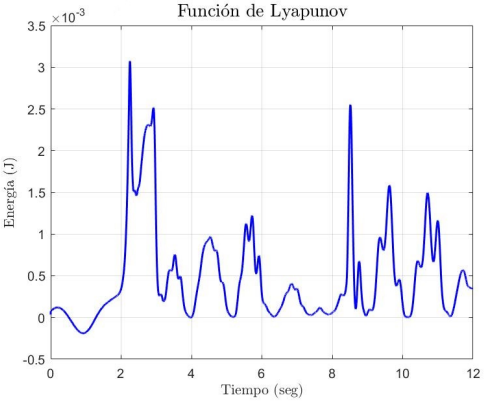

(a) Respuesta experimental de las fuerzas del robot sin perturbaciones.



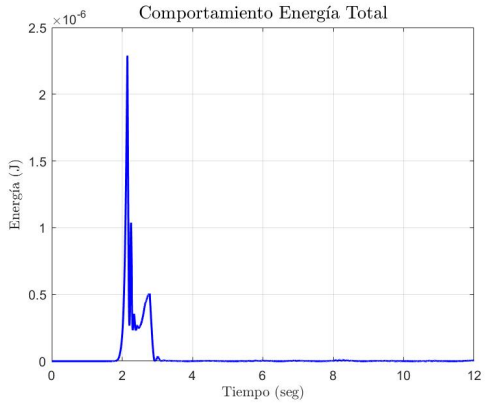

(b) Respuesta experimental de las fuerzas del robot con perturbación constante en 8.3 s.



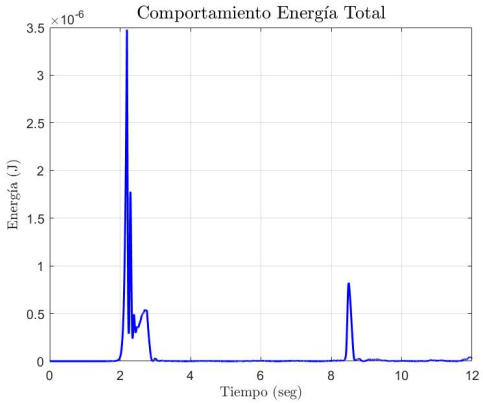

(c) Función de Lyapunov sin perturbaciones.




(d) Función de Lyapunov con perturbación constante en 8.3 s.




(e) Respuesta a la energía consumida sin perturbaciones.




(f) Respuesta de la energía consumida con perturbación constante en 8.3 s.

Figura 2.16: Resultado experimental con control PD+, parte 4.

### 2.4.7. Generador de Tiempo Base

Con el objetivo de resolver el problema de regular el comportamiento transitorio de la trayectoria generada con respecto al tiempo de ejecución de la tarea del robot y la forma del perfil de velocidad para su aplicación en guiado háptico, se hace uso de un sistema Generador de Tiempo Base (TBG, por sus siglas en inglés: Time Base Generator). Para ello, el sistema se aproxima a una ecuación diferencial de primer orden variante en el tiempo,

$$\dot{z} + \alpha(t)z = 0 \rightarrow \dot{z} = -\alpha(t)z, \tag{2.39}$$

donde

$$\alpha(t) = \alpha_0 \frac{\dot{\xi}}{1 - \xi + \rho}, \tag{2.40}$$

donde $\alpha_0 = 1 + \epsilon$; $0 < \epsilon \ll 1$, $0 < \rho \ll 1$, $0 \leq \xi \leq 1$ es una función escalar variante en el tiempo que se diseña para ir suavemente desde 0 a 1 en un tiempo finito $t = t_b > 0$ y $\dot{\xi}$ es la derivada de $\xi$ tal que $\dot{\xi}(t_0) = \dot{\xi}(t_b) = 0$ (Figura 2.17). La solución de la Ecuación 2.39 tiene la forma

$$\xi(t_b) = z(t_0)[(1 - \xi) + \delta]^{1+\epsilon}, \tag{2.41}$$

y la ganancia $\alpha(t)$ puede ser $\alpha(t_b) > 0$ con $t_b$ independientemente de la condición inicial, esto hará que $\xi(t_b) = 1$ y propicia que $z(t_b) = z(t_0)\rho^{1+\epsilon} > 0$ pero tan pequeño como se necesite, dependiendo de la capacidad del sistema dinámico, así como, el procesamiento de datos. Si el controlador produce una ecuación similar a $\dot{z} = -\alpha(t)z$, para $z$ (errores de seguimiento de posición del sistema).

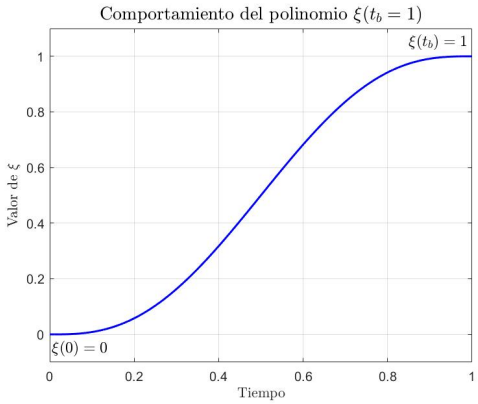
Para garantizar la convergencia en tiempo finito en el intervalo $t_0 \leq t \leq t_b$, se diseña $\xi(t)$ como un polinomio de quinto grado (Ecuación 2.42), de tal modo que sus derivadas $\dot{\xi}(t)$, $\ddot{\xi}(t)$ inicien en cero y finalicen en cero (Ecuaciones 2.43 y 2.44).

$$\xi(t) = a_3 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^3} - a_4 \frac{(t - t_0)^4}{(t_b - t_0)^4} + a_5 \frac{(t - t_0)^5}{(t_b - t_0)^5}, \tag{2.42}$$

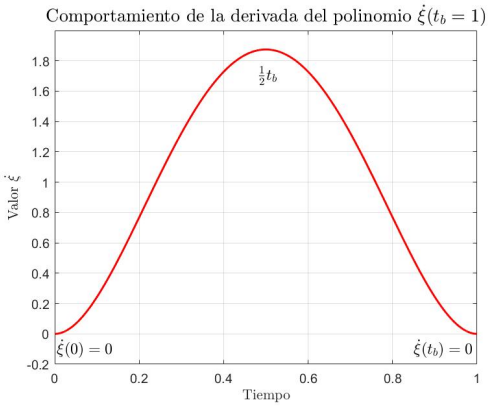
$$\dot{\xi}(t) = 3a_3 \frac{(t - t_0)^2}{(t_b - t_0)^3} - 4a_4 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^4} + 5a_5 \frac{(t - t_0)^4}{(t_b - t_0)^5}, \tag{2.43}$$

$$\ddot{\xi}(t) = 6a_3 \frac{(t - t_0)}{(t_b - t_0)^3} - 12a_4 \frac{(t - t_0)^2}{(t_b - t_0)^4} + 20a_5 \frac{(t - t_0)^3}{(t_b - t_0)^5}, \tag{2.44}$$

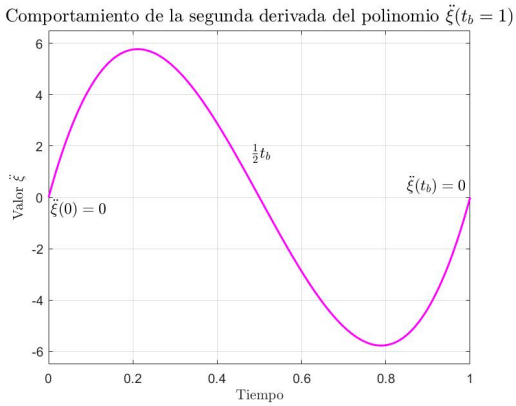
donde $t$ es el tiempo, $t_b > 0$ es el tiempo de convergencia, el denominador $(t_b - t_0) > 0$ está definido positivo para evitar indeterminaciones y $a_3 = 10$, $a_4 = 15$, $a_5 = 6$ son los coeficientes del polinomio.




(a) Respuesta de $\xi$.




(b) Respuesta de $\dot{\xi}$.




(c) Respuesta de $\ddot{\xi}$.

Figura 2.17: Pruebas numéricas de las propiedades del modelo dinámico.

Donde los polinomios $\xi(t)$, $\dot{\xi}(t)$ y $\ddot{\xi}(t)$ corresponden a trayectorias suaves de inicio a fin, lo cual su comportamiento sobre el error extendido rompe los efectos inerciales debido al estado de reposo y movimiento [2].

### 2.4.8. Control por modos deslizantes cartesiano

El control por modos deslizantes (SMC, por sus siglas en inglés: Sliding Mode Control) es una estrategia basada en la realimentación de salida y una acción de control de

conmutación de alta frecuencia que, en condiciones ideales, es infinita. SMC es un control de estructura variable que garantiza la estrategia de control a pesar de la incertidumbre. Esencialmente, esta ley de control de alta velocidad puede llevar las trayectorias del sistema a un subespacio del espacio de estados (comúnmente asociado a una superficie deslizante con propiedades que aseguren la estabilidad). En promedio, la dinámica controlada puede considerarse idealmente restringida a la superficie mientras adopta todas sus características geométricas deseables. De esta manera, al realizar un diseño apropiado de la superficie deslizante, es decir, incorporando los objetivos de control en la función de control que da origen a dicha superficie, es posible lograr objetivos de control convencionales como estabilidad global, optimización, seguimiento, regulación, etc. [26][28].

Para la tarea de guiado háptico pasivo, se propone el uso de un control de movimiento para el dispositivo háptico Touch para la tarea de seguimiento de $X_d(t) = [x_d, y_d, z_d]^T$ en tiempo finito, sin conocimiento del sistema dinámico. En esta sección se hace uso un control PD por modos deslizantes cartesiano [14].

La estrategia de control no considera la dinámica; sin embargo, para estudios de simulación y validación teórica es empleada. Para el control, la inversa de la matriz Jacobiana analítica del dispositivo háptico $J(q)^{-1}$ es empleada; y parcialmente el uso de la cinemática de posición y diferencial, para la planificación de movimiento. La Ecuación 2.45 parametriza el sistema de control propuesto.

$$\tau = f(q, \dot{q}, X_d, \alpha(t), J^{-1}(q)), \tag{2.45}$$

donde $\alpha(t)$ es la ganancia de retroalimentación variante en el tiempo que define al Generador de Tiempo Base que permite la convergencia en tiempo finito. Considerando el modelo dinámico del robot en lazo cerrado, está dado por el control dado por:

$$\tau = -K_d J(q)^{-1} S_{rx}, \tag{2.46}$$

o $\tau$ como una función dependiente del estado:

$$\begin{aligned} \tau = &-K_d J(q)^{-1}\Delta\dot{X} - K_d J(q)^{-1}\alpha(t)\Delta X + K_d J(q)^{-1} S(t_0) e^{-k(t-t_0)} \\ &-K_d J(q)^{-1}\gamma \int_{t_0}^{t} sgn(\Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X - S(t_0)e^{-k(t-t_0)})dt, \end{aligned} \tag{2.47}$$

donde $K_d \in \mathbb{R}^{3\times3}$ es una matriz diagonal simétrica definida positiva, $X_d \in \mathbb{R}^{3\times1}$ corresponde al vector asociado a la trayectoria de referencia, $\Delta X = X - X_d$, representa el error de seguimiento, como también su derivada $S_{rx} = \dot{X} - \dot{X}_d$, $S = \Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X$ denota el error extendido y $S(t_0)$ es el valor inicial de $S(t)$ en $t = t_0$, utilizando $k > 0$, $\gamma \in \mathbb{R}^{3\times3}$ es una matriz diagonal definida positiva, la función $sgn(\varphi)$ representa la función discontinua de entrada $\varphi \in \mathbb{R}^3$. La Figura 2.18 muestra el diagrama de bloques correspondiente al control PD por modos deslizantes cartesiano [14].

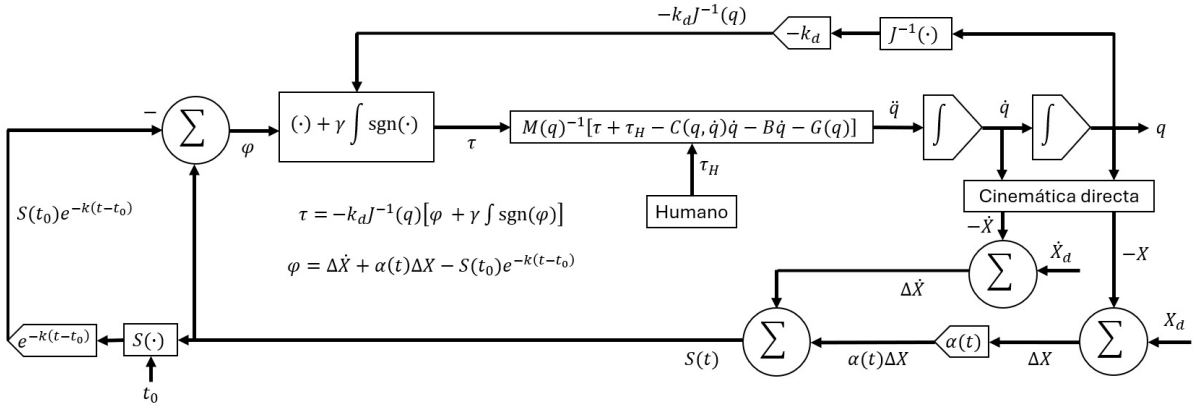



Figura 2.18: Diagrama de bloques del control por modos deslizantes.

### 2.4.9. Análisis de estabilidad

En esta sección se realiza la prueba de estabilidad considerando la función de Lyapunov obtenida de [14], mostrada en la Ecuación 2.48, y la prueba numérica se muestra en la Figura 2.22c.

$$V = \frac{1}{2}S_r^T H(q) S_r, \tag{2.48}$$

y su derivada

$$\dot{V} = S_r^T H(q)\dot{S}_r + \frac{1}{2}S_r^T \dot{H}(q) S_r, \tag{2.49}$$

donde $S_r = J^{-1}(q)(\dot{X} - \dot{X}_d)$.

Con estas consideraciones, y con la ecuación $S_{rx} = \dot{X} - \dot{X}_d$ donde $S_{rx} \longrightarrow \varepsilon$ considerando $t \longrightarrow \infty$, lo cual se cumple en una vecindad de $\varepsilon$ con un radio $r_1 > 0$ centrado en el equilibrio $S_{rx} = 0$. Con estas condiciones y el uso de la ecuación $S = \Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X$ con el uso del TBG, se obtiene

$$\Delta\dot{X} + \alpha(t)\Delta X = 0 \longrightarrow \Delta\dot{X} = -\alpha(t)\Delta X, \tag{2.50}$$

y la solución de la Ecuación 2.50, mostrada a continuación:

$$\Delta X(t) = \Delta X(t_0)[(1-\xi)+\delta]^{1+\epsilon}. \tag{2.51}$$

Donde se puede observar que la respuesta es muy similar a la Ecuación 2.41.

### 2.4.10. Resultado experimental usando control por modos deslizantes cartesiano

**TBG para seguimiento de trayectoria.**

Al ser una trayectoria de seguimiento, la convergencia en tiempo finito asocia la convergencia a una región de la trayectoria a partir de la condición inicial, empleando $\alpha(t)$, y $\alpha(t) = \alpha$ constante, en el seguimiento (Ecuación 2.52), y la respuesta de $\alpha(t)$ es presentada en la Figura 2.17.

$$\alpha = \begin{cases} (1+\varepsilon)\frac{\dot{\xi}}{1-\xi+\rho}; & t \leq t_{\alpha_{max}} \\ \frac{K_p}{K_d}; & t > t_{\alpha_{max}} \end{cases}. \tag{2.52}$$

Las ganancias usadas en el experimento se muestran en la Tabla 2.3.

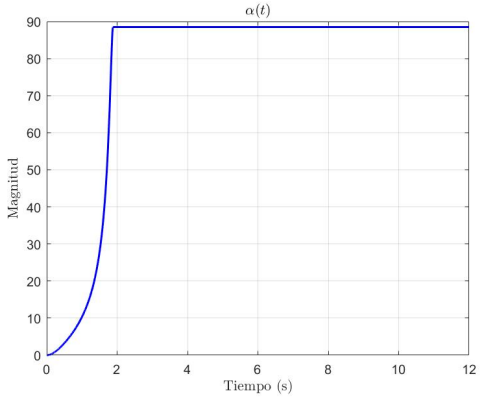
Tabla 2.3: Parámetros para la simulación.

| Ganancia | Valor | Ganancia | Valor |
|---|---|---|---|
| $k = K_{p1} = K_{p2}$ | 3 | TBG | |
| $K_{p3}$ | 1.5 | $t_b$ | 2 |
| $K_{d1} = K_{d2} = K_{d3}$ | 0.0575 | $\alpha_0$ | 1.001 |
| $K_{i1} = K_{i3}$ | 0.01 | $\rho$ | 0.001 |
| $K_{i2}$ | 0.007 | $\varepsilon$ | 0.001 |

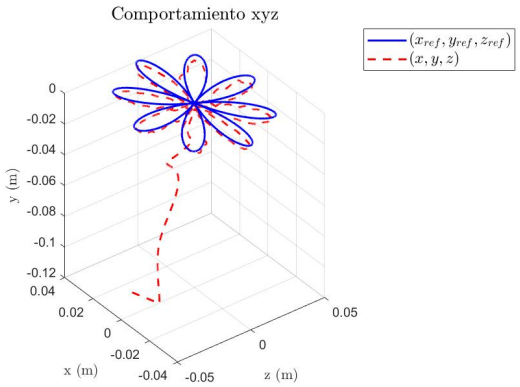
**Resultados.**

El experimento se realizó usando el TBG con $t_b = 2$ segundos, con el propósito de asegurar la convergencia en el tiempo deseado con el control por modos deslizantes. El

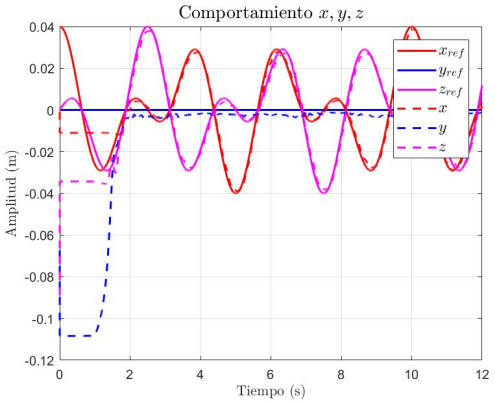
desempeño de seguimiento cartesiano en posición y velocidad operacional es mostrado en las Figuras 2.19c y 2.20a, en ellas se aprecia la convergencia en tiempo finito a 2 segundos. Para analizar la robustez del control ante la presencia de perturbaciones, se tomaron los datos del seguimiento de la trayectoria sin la presencia de perturbaciones, como también los datos del experimento aplicando una perturbación contante a partir de 8.1 segundos hasta finalizar el experimento (Figuras 2.19, 2.20, 2.21, 2.22).



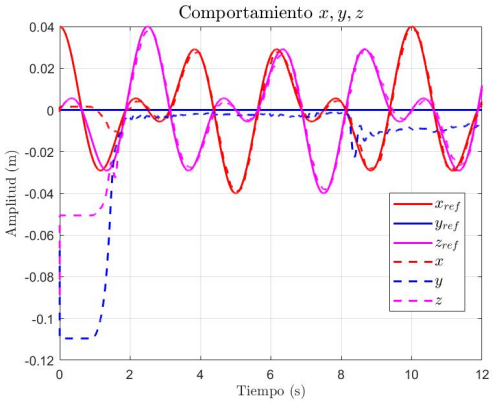

(a) Comportamiento de alfa utilizado.




(b) Respuesta experimental espacio de trabajo xyz.

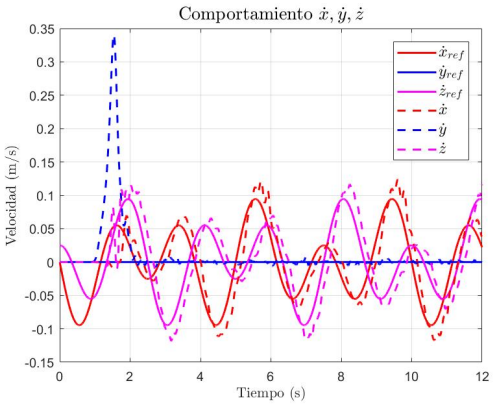



(c) Respuesta experimental $x$ sin perturbación.

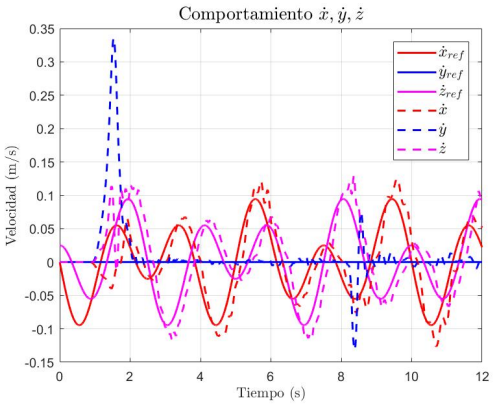



(d) Respuesta experimental $x$ con perturbación constante en 8.1 s.

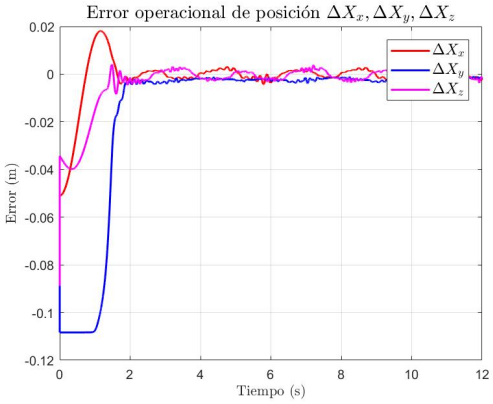
Figura 2.19: Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 1.



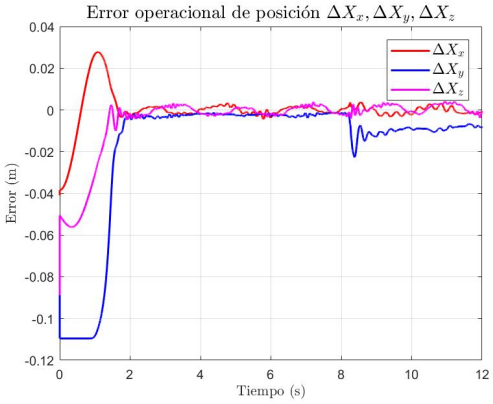

(a) Respuesta experimental $\dot{x}$ sin perturbación.



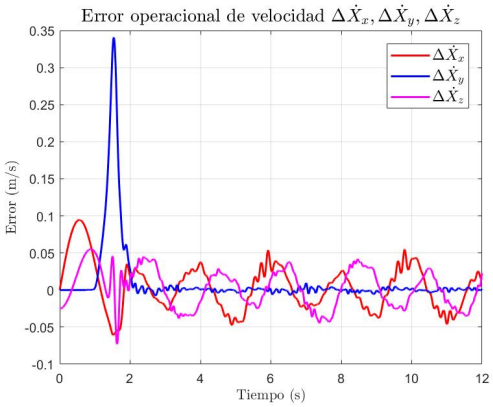

(b) Respuesta experimental $\dot{x}$ con perturbación constante en 8.1 s.



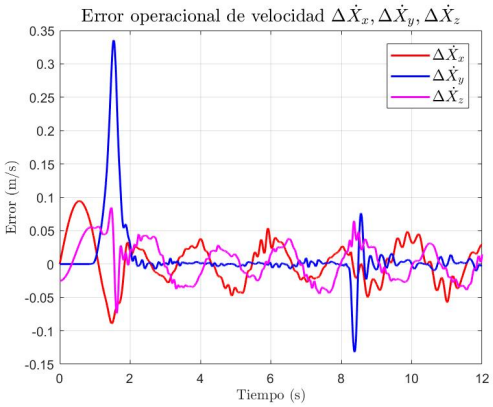

(c) Respuesta experimental $\Delta x$ sin perturbación.




(d) Respuesta experimental $\Delta x$ con perturbación constante en 8.1 s.

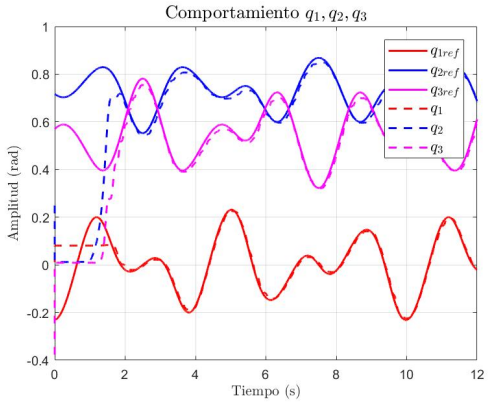



(e) Respuesta experimental $\Delta \dot{x}$ sin perturbación.

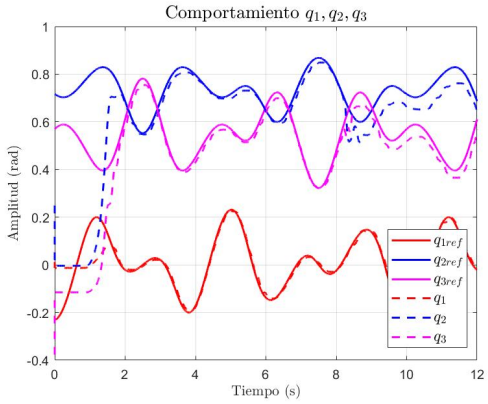



(f) Respuesta experimental $\Delta \dot{x}$ con perturbación constante en 8.1 s.

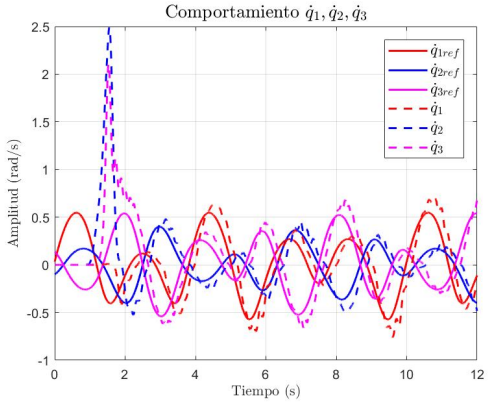
Figura 2.20: Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 2.



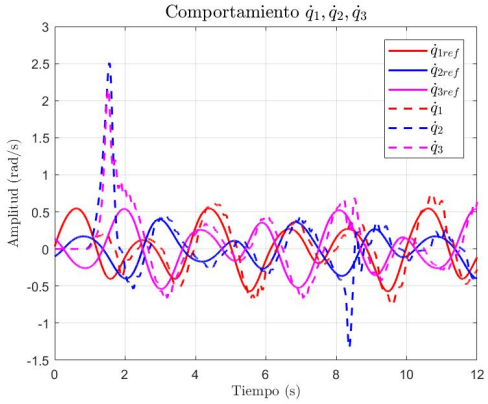

(a) Respuesta experimental $q$ sin perturbación.



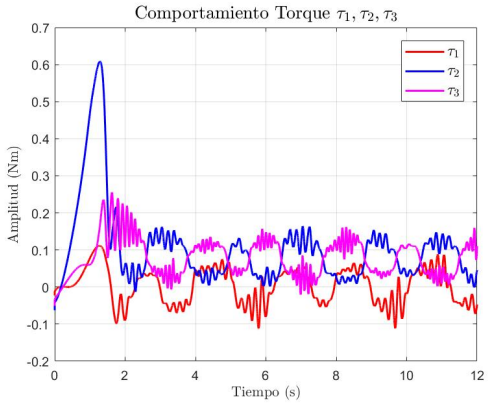

(b) Respuesta experimental $q$ con perturbación constante en 8.1 s.



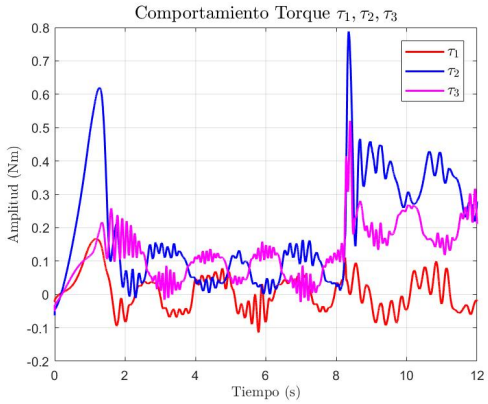

(c) Respuesta experimental $\dot{q}$ sin perturbación.




(d) Respuesta experimental $\dot{q}$ con perturbación constante en 8.1 s.

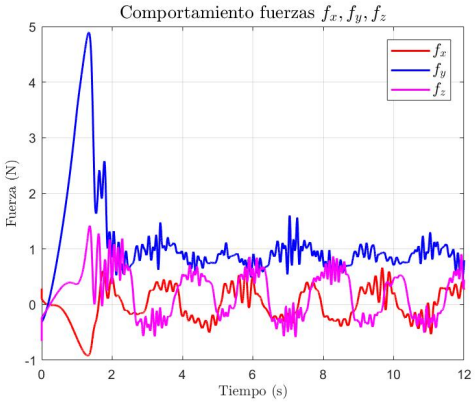



(e) Respuesta experimental $\tau$ sin perturbación.

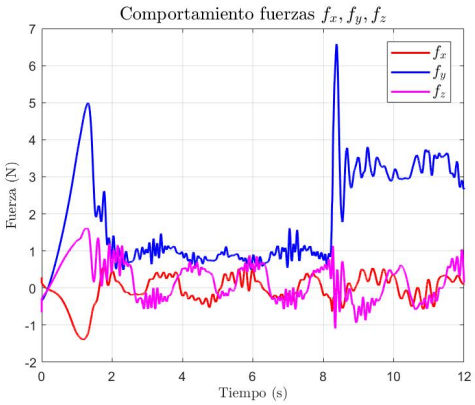



(f) Respuesta experimental $\tau$ con perturbación constante en 8.1 s.

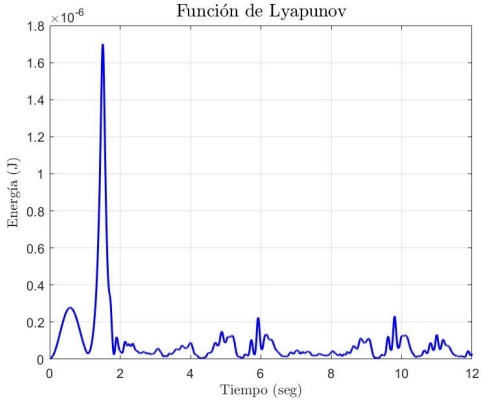
Figura 2.21: Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 3.



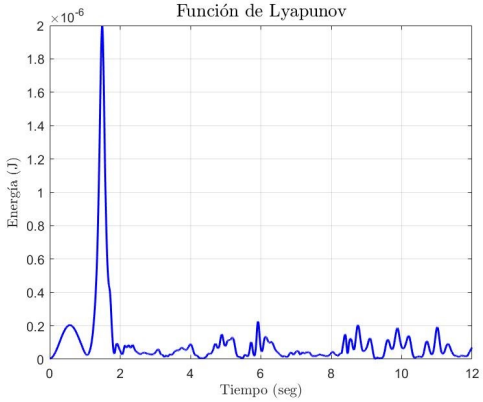

(a) Respuesta experimental de las fuerzas del robot sin perturbación.



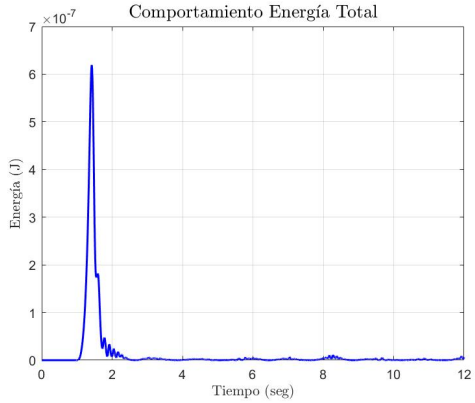

(b) Respuesta experimental de las fuerzas del robot con perturbación constante en 8.1 s.



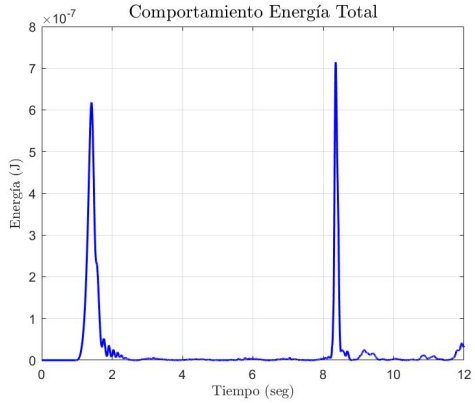

(c) Función de Lyapunov sin perturbación.




(d) Función de Lyapunov con perturbación constante en 8.1 s.




(e) Respuesta a la energía consumida sin perturbación.




(f) Respuesta de energía consumida con perturbación constante en 8.1 s.

Figura 2.22: Resultado experimental con control por modos deslizantes, parte 4.

### 2.4.11. Índices de desempeño

Uno de los índices de desempeño más conocidos es el valor eficaz o raíz cuadrática media (RMS, por sus siglas en inglés: Root Mean Square), el cual está denominado como el valor cuadrático medio de una magnitud. El cual es aplicado en este caso al parámetro $\Delta X$, el cual permite comparar un control con otro de forma escalar, mientras que el uso de la energía $\mathcal{E}(\dot{q}, q)$ es una magnitud que está ligada al estado dinámico de un sistema, el cual es el gasto energético consumido al usar el sistema con el control dado [40]. Ambos parámetros del RMS y la energía consumida dan información de qué tan adecuado es el uso de un control para un sistema y considerando cuál es el objetivo de tu control, las ecuaciones de ambos parámetros se muestran a continuación:

$$\Delta X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \|\Delta X\|^2} \approx \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \|\Delta X_i\|^2}, \tag{2.53}$$

$$\mathcal{E}(\dot{q}, q) = \int_0^T \dot{q}^T \tau dt \approx \sum_{i=1}^{n} \dot{q}_i^T \tau_i, \tag{2.54}$$

donde $T$ representa el tiempo de experimentación, $n$ es el número de muestras y $\Delta x$ es la diferencia entre el valor de referencia y el valor deseado, $\tau \in \mathbb{R}^{3\times 1}$ es el vector de pares generalizados actuando en las articulaciones y $\dot{q} \in \mathbb{R}^{3\times 1}$ es el vector de velocidades articulares.

A continuación se muestra una tabla comparativa de los índices de desempeño de cada control utilizado durante este proyecto (Tabla 2.4):

| Control | $\Delta X_{RMS}$ | $\Delta \dot{X}_{RMS}$ | $\mathcal{E} = \int_0^{12} \dot{q}^T \tau dt$ |
|---|---|---|---|
| **Sin perturbación** | | | |
| PD+G | 0.0510 | 0.0626 | 1.0165 J |
| Modos deslizantes | 0.0386 | 0.0627 | 0.734 J |
| **Con perturbación constante** | | | |
| PD+G | 0.0525 | 0.0705 | 1.1992 J |
| Modos deslizantes | 0.0406 | 0.0665 | 0.9037 J |

Tabla 2.4: Comparación de índices de desempeño.

## 2.5. Discusión y conclusiones

La validación, tanto de la cinemática como de la dinámica del dispositivo háptico, se realizó mediante evaluación numérica y experimental. Esto tiene el propósito de asegurar el correcto funcionamiento de la plataforma y proporcionar confiabilidad en los datos obtenidos durante cada experimento. En caso de no realizar una adecuada validación, esto podría dar lugar a valores inciertos y evaluaciones erróneas o imprecisas.

Hacer una adecuada selección de herramientas computacionales (software y hardware) es una acción indispensable para manejar de forma satisfactoria el procesamiento de los datos que son enviados al dispositivo háptico permitiéndole a este moverse a la posición adecuada en cada instante de tiempo, considerando al operador humano en el lazo de control y a su vez por medio de sensores se recopilan los datos reales. Al comparar los datos esperados y los reales, se establece el error, aunque no es posible que este sea cero. Esto muchas veces se debe a las capacidades limitadas del procesador implementado, limitaciones físicas, el consumo de energía y el propósito al cual se desea aplicar. El uso de un adecuado del control en lazo cerrado puede ofrecer valores del error adecuados para el correcto funcionamiento de la plataforma háptica.

En este capítulo, se comparan 2 diferentes tipos de controles: el control PD con compensación de la gravedad y el control por modos deslizantes cartesiano. Ambos controles permiten un adecuado funcionamiento de la plataforma; sin embargo, el control por modos deslizantes se destaca en un menor consumo de energía, además de que se reconoce como un control robusto, asociado al uso de funciones de saturación, y haciendo uso de una superficie de deslizamiento que reduce el valor del error contra la presencia de incertidumbre dinámica. La robustez es una característica importante dado que la plataforma es afectada por perturbaciones generadas por los pacientes con discapacidad cerebral, que en algunos casos sufren de movimientos involuntarios, a los cuales la plataforma debe poder mitigar y permitir una adecuada rehabilitación.

# Capítulo 3

# Ambiente virtual interactivo con retroalimentación de fuerza kinestésica

El desarrollo de la plataforma experimental está conformado por la implementación de un sistema háptico con un ambiente virtual a partir de 5 laberintos usados para evaluación y diagnóstico neuropsicológico de pacientes [17]. Los laberintos cuentan con niveles de dificultad básicos, intermedios y avanzados. Se implementa el uso de retroalimentación kinestésica, visual y auditiva. La intención del uso de laberintos en realidad virtual es facilitar el diagnóstico del paciente y minimizar problemas de evaluación, evitando con esto la información subjetiva que puede dar lugar a un diagnóstico que en ocasiones no resulta del todo verdadero.

El ambiente virtual es una parte fundamental en la implementación de la plataforma; de este depende el grado de inmersión que el paciente tenga al usar la plataforma. En la actualidad existe una amplia diversidad de programas útiles para la creación de la plataforma virtual. A continuación se muestra información sobre el software más popular para la creación de videojuegos.

## 3.1. Aplicaciones para el desarrollo de videojuegos

Actualmente, existen más de tres mil millones de personas establecidas en el mundo de los videojuegos en todo el mundo. Si se desea diseñar y crear algún videojuego, existe una amplia variedad de software especializado. A continuación se mencionan algunos de los más populares [19], de los cuales se seleccionó el más adecuado para la implementación del ambiente virtual para la plataforma háptica bimanual.

### 3.1.1. Unity

El 38 % de los desarrolladores de videojuegos utiliza Unity como su motor principal, ya que este se encuentra entre las mejores opciones y actualmente es el más popular. Ofrece la capacidad de crear juegos tanto en 2D como 3D para casi cualquier plataforma e incluso incorporar Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA).

Unity resulta bastante fácil de usar, incluso con poco conocimiento en programación. Incorpora un conjunto útil y variado de herramientas. La tienda de Unity ofrece todo tipo de diseños prefabricados, tanto gratuitos como de pago, que facilitan la creación de su videojuego [58].

### 3.1.2. Unreal Engine

El 43 % de los desarrolladores utilizan Unreal Engine como su motor principal, actualmente es una de las opciones más recientes para la creación de juegos.

La versión actual, Unreal Engine 5, fue desarrollada por la compañía para el diseño de videojuegos en 3D. No requiere conocimientos de programación, pero en ciertos aspectos se puede requerir experiencia para entender características complejas [15].

### 3.1.3. GameMaker Studio 3

GameMaker es una aplicación creada para el desarrollo de videojuegos, es útil para principiantes y desarrolladores profesionales, permite controlar cada parte del proceso de diseño del juego con herramientas adecuadas.

No es necesaria la experiencia en programación. Se ofrece una versión gratuita que permite publicar juegos, pero con el uso de una marca de agua sobre ellos [62].

### 3.1.4. RPG Maker MV

RPG Maker MV es perfecto para los creadores primerizos que desean trabajar en crear un juego. Es una de las opciones populares en la creación de juegos en mundo abierto o juegos de rol.

Ofrece el uso de una versión gratuita y una de paga con precios que varían entre $ 544 MXN y $ 1,739 MXN dependiendo de la versión que prefieras [20].

### 3.1.5. Godot

El 5 % de los desarrolladores usan Godot como su motor principal y el 20 % como complemento para otro software. Adecuado para la creación en 2D, pero se puede necesitar

Unity o Unreal Engine para que manejen algún elemento en 3D. Utiliza un lenguaje incorporado llamado GDscript.

Godot tiene una gran capacidad que ha pasado desapercibida, ya que es un motor gráfico gratuito y de código abierto, lo que lo convierte en una de opción viable para que todos diseñen y editen sus juegos libremente [33].

Al final al comparar todas las aplicaciones más conocidas para el desarrollo de videojuegos, se optó por el uso de Unity para la creación de ambiente virtual con laberintos, algunas de las razones para elegir este programa fue su popularidad, por lo tanto, se dispone de diversos medios para solucionar casi cualquier problema. Unity permite integrar dispositivos externos mediante librerías personalizadas, facilitando la comunicación en tiempo real entre el entorno virtual y el sistema háptico, su motor gráfico 3D proporciona una visualización realista e inmersiva, esencial para experimentos que combinan estímulos visuales y táctiles y ya cuenta con ejemplos creados para el uso con el dispositivo háptico Touch. Además, su flexibilidad en programación con C# y la amplia comunidad de desarrollo permiten adaptar y escalar el proyecto según las necesidades específicas de investigación.

## 3.2. Características del equipo tecnológico

En esta sección se muestran algunas especificaciones de los dispositivos utilizados necesarios en caso de querer replicar los experimentos aplicados.

En la adquisición, el procesamiento de datos y el control de la plataforma experimental se implementan haciendo uso de determinado hardware y software requeridos para el adecuado funcionamiento del experimento, como se listan a continuación.

### 3.2.1. Hardware

1. **Especificaciones del PC.** Sistema operativo: Windows 10 (64 bits), Procesador: AMD Ryzen 7, Memoria RAM: 16 GB.

2. **Especificaciones del dispositivo háptico Touch.** Mostradas en una sección anterior en la Tabla 2.1.

### 3.2.2. Software

1. **Unity 2020.3.22f1.** Este software es un motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies, el cual es necesario para crear el laberinto en realidad virtual [58].

2. **Visual studio code 1.94.2.** Este programa es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft, y es necesario, ya que muchas de las operaciones lógicas programadas en Unity se sustentan en programación por código C# [34].

3. **MATLAB R2017a.** Este programa es un sistema de cómputo numérico, el cual, por sus herramientas de generación de gráficos, es utilizado para crear cada una de las gráficas del experimento usando los datos exportados de Unity y facilitar su interpretación [53].

4. **Controladores del dispositivo háptico Touch, Software para calibración del dispositivo háptico (Touch Smart Setup) y Software de enlace del dispositivo háptico con Unity (OpenHaptics Developer Edition v3.5.0).** Estos programas se pueden obtener de la página oficial de 3D Systems [63].

## 3.3. Ambiente de Realidad Virtual en Unity

En esta sección se mencionan consideraciones tomadas para la creación de la plataforma bimanual para su aplicación en tareas de neurorrehabilitación, implementando el ambiente de un laberinto con realidad virtual, tomando en cuenta directrices para el diseño y la construcción de videojuegos serios educativos. Se tomó en cuenta el diseño de un laberinto en RV, que permita al usuario tener una experiencia interactiva y hacer uso del razonamiento lógico mientras se resuelve el ejercicio.

Los laberintos se pueden usar para evaluar la capacidad del usuario, para respetar límites (control de impulsividad) y planear la ejecución motriz, como también llegar a una meta especificada [51]. También permite evaluar la capacidad de planear mediante la conducta visoespacial [57].

En [31] se estudió la sensibilidad de este tipo de pruebas en 276 niños con traumatismo craneoencefálico entre 9 y 12 años, y se encontró sensibilidad para el daño circunscrito a la corteza frontal, en particular, hallaron una relación significativa entre las lesiones en el giro orbital, el giro recto y los errores de seguimiento de reglas. En la prueba se le pide al sujeto que resuelva los laberintos en el menor tiempo posible, sin tocar las paredes ni atravesarlas, y procurando no levantar el lápiz una vez que ha iniciado. Se registra el número de veces que toca las paredes, que las atraviesa y que entra a un camino sin salida (error de planificación). Igualmente, se registró el tiempo de ejecución.

### 3.3.1. Características principales del ambiente virtual

**Interfaz.** La interfaz del laberinto es intuitiva y fácil de utilizar para el usuario, haciendo uso de metáforas visuales familiares para el jugador, se provee información y ayuda clara sobre los modos de juego y posibles configuraciones, se incluyen colores, efectos de sonido, una disposición adecuada de elementos en pantalla, lo cual propicia la inmersión, concentración y motivación al jugador en el juego [50]. Los juegos de rehabilitación deben introducir variabilidad en los elementos, diversión, sorpresa y desafíos adecuados para que las tareas repetitivas sean soportables y atractivas [4].

Haciendo uso de algunos diseños gratuitos tomados de Unity Store se implementó una interfaz con colores llamativos, elementos visuales que proporcionan información útil sobre el juego, como es una barra de vida, un contador de tiempo de juego, un contador de monedas y un botón de pausa que detiene el juego y abre el menú secundario que posee opciones que te permiten salir del nivel o reiniciarlo, como se observa en la Figura 3.1.

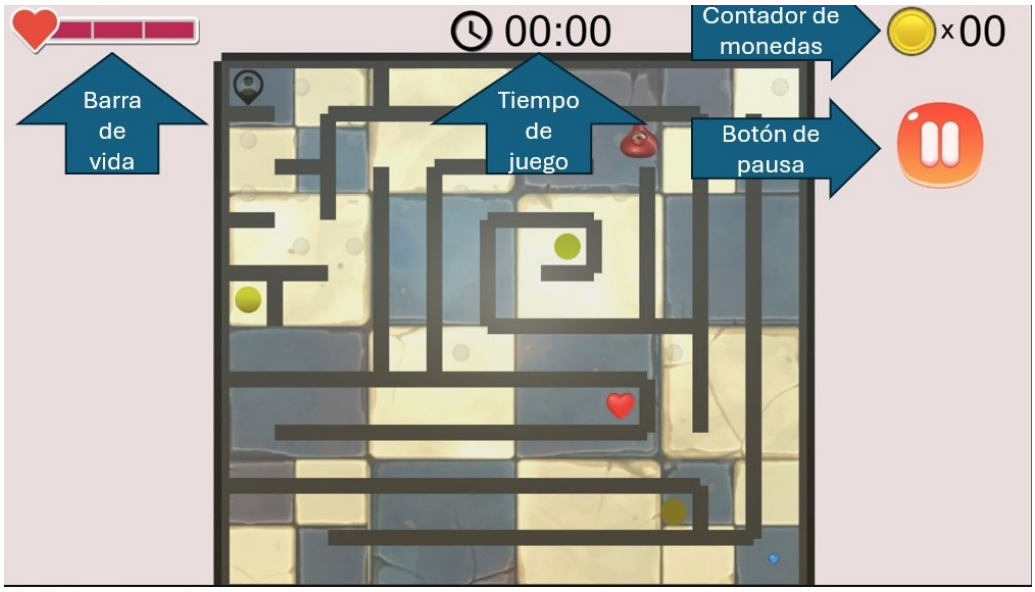
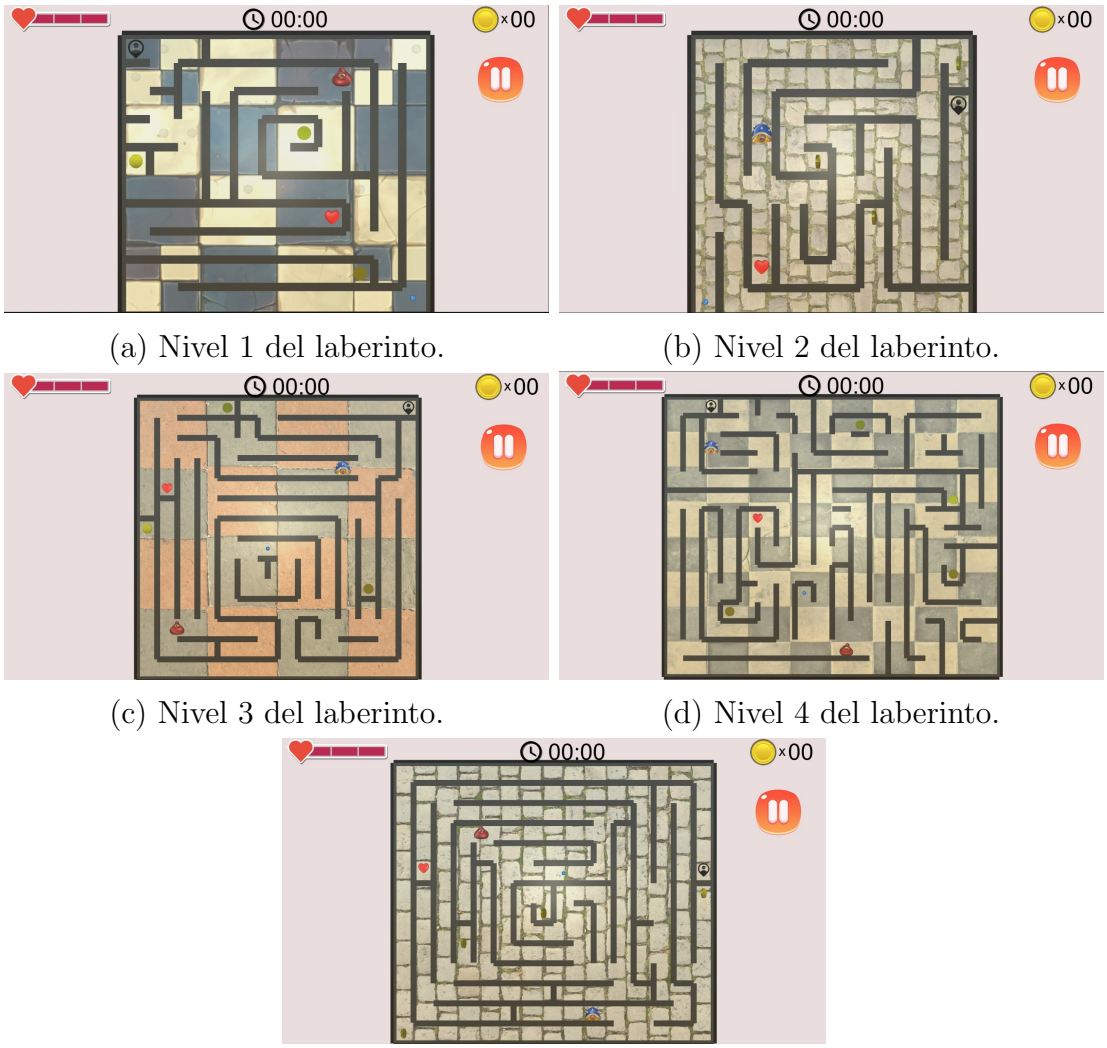



Figura 3.1: Interfaz gráfica de usuario: componentes del laberinto virtual.

**Niveles.** El laberinto tiene niveles definidos y consistentes, con un cambio moderado en la dificultad conforme se avanza de nivel, manteniendo el objetivo del juego y un ejercicio divertido para el usuario [50]. La dificultad aumenta a medida que el participante progresa en la evaluación, pero evitando exceder la capacidad de los pacientes [48] y la intervención es interactiva para que el paciente se mantenga involucrado en el juego [39], mostrados en el conjunto de Figuras 3.2.




(a) Nivel 1 del laberinto.

(b) Nivel 2 del laberinto.

(c) Nivel 3 del laberinto.

(d) Nivel 4 del laberinto.

(e) Nivel 5 del laberinto.

Figura 3.2: Conjunto de niveles de la plataforma háptica propuesto.

**Interacción.** El juego usa comandos convencionales e intuitivos con un nivel de respuesta y sensibilidad adecuados para adaptarse al usuario. El escenario de juego es adecuado, consistente y relevante para el desarrollo adecuado de los objetivos planteados [50].
Existen diversos pacientes con diferentes problemas, como delirio, dolor, deterioro cognitivo, discapacidad física, etc. Para obtener los mejores resultados, el juego debe diseñarse para adaptarse a las capacidades específicas de los pacientes a fin de proporcionar la cantidad correcta de desafío [4][39].

**Errores en el ejercicio.** En el juego se intenta prevenir los posibles errores que el usuario puede cometer, y en caso de que el jugador cometa algún error, se le dan indicaciones claras que permitan al jugador volver a un estado estable [50].

**Objetos de interacción.** El laberinto incorpora en el escenario representaciones visuales que corresponden a un entorno intuitivo, incluyendo diferentes objetos y elementos en el escenario, con un comportamiento predecible [50]. Se puede identificar cada una de estas partes en la Figura 3.3.

Figura 3.3: Objetos de interacción en el laberinto.

1. Enemigos. Hace referencia a objetos que hacen daño y se deben evitar.

2. Monedas. Hace referencia a objetos que ofrecen una recompensa.

3. Corazón. Hace referencia a un objeto que cura y regenera vida.

4. Salida. Hace referencia a un objeto que al completar el nivel permite avanzar o terminar el juego, según sea el caso.

5. Paredes del laberinto. Restringen el movimiento del usuario aumentando el nivel de dificultad, como también evitan que el usuario acceda a lugares inaccesibles.

**Datos experimentales.** El juego permite la recopilación de datos referentes al desempeño del jugador en los diferentes niveles del laberinto y, consecuentemente, obtener métricas útiles para verificar el seguimiento entre los objetivos del juego y la rehabilitación del usuario. Los pacientes llevan a cabo una evaluación que mide su desempeño de forma cuantitativa, por lo que el juego debe ser similar y ajustarse según los resultados obtenidos [39].

**Modos de juego.** El juego posee dos tipos de modos de interacción:

1. **Modo exploración háptica activa.** En este modo se le permite al usuario navegar libremente por el laberinto e interactuar con todos los elementos que lo conforman. El modo de juego ofrece una ausencia de fuerza de retroalimentación, excepto cuando hay detección de contacto entre el efector final del dispositivo háptico y algún elemento del ambiente virtual.

2. **Modo guiado háptico pasivo.** En este modo de configuración se promueve el entrenamiento del usuario, ya que es guiado a través de las trayectorias establecidas por el dispositivo háptico, que permiten completar la tarea de resolver el laberinto, ofreciendo retroalimentación de fuerza al usuario aplicando el control por modos deslizantes cartesiano antes mencionado. Este modo es adecuado para la rehabilitación física de pacientes que sufren de baja movilidad en miembros superiores.

**Número de mandos.** El juego ofrece la opción de usar un mando único o hasta el uso de dos dispositivos hápticos simultáneos, aprovechando el efecto de coordinación mano-ojo con ambas manos, combinado con la función espejo, mejorando el resultado de la neurorrehabilitación, el entorno virtual del modo bimanual se muestra en la Figura 3.4.

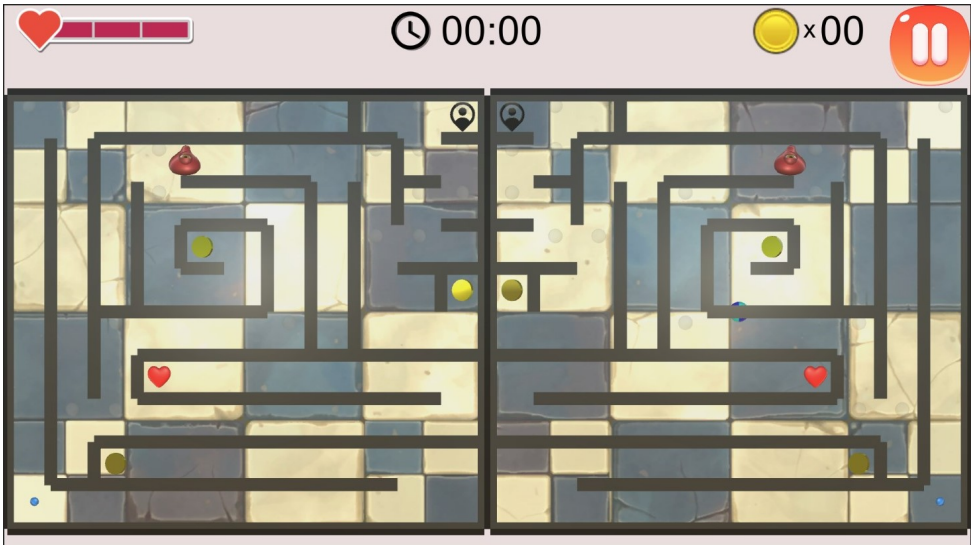



Figura 3.4: Modo bimanual de la plataforma: operación simultánea de dos dispositivos hápticos.

**Menú principal de la plataforma.** Al iniciar el juego se muestra un menú principal (Figura 3.5) en el cual se muestra el nombre del juego, como también algunas opciones a elegir según las necesidades o gustos del paciente; como es el modo de juego, el número de dispositivos hápticos a utilizar, como también la opción de registrar datos, para la ocasión en la que el especialista desee obtener información del comportamiento del paciente a través de cada uno de los niveles y poder proseguir con algún diagnóstico.

Figura 3.5: Menú principal de la plataforma.

**Menú secundario de la plataforma.** El menú secundario se muestra una vez ya iniciado el ejercicio (Figura 3.6), al presionar el botón de pausa. Cuando este menú se muestra, el juego se pausa para evitar cualquier inconveniente que pueda ocurrir, como también se fija la última posición del dispositivo háptico. En el menú secundario se pueden elegir algunas opciones como reanudar el juego después de haberlo pausado, volver al menú principal o reiniciar el nivel según se requiera.

Figura 3.6: Menú secundario de la plataforma.

### 3.3.2. Lógica detrás del juego

En esta sección se muestran las consideraciones tomadas para el diseño lógico del juego, basándose en algunas características básicas de videojuegos comerciales y partes complementarias necesarias para un adecuado funcionamiento.

**Diagrama de flujo del juego.** Para facilitar la comprensión de cómo funcionan los niveles de la plataforma y la lógica detrás de ellos, permitiendo un comportamiento sencillo, pero consistente, descrito como se muestra en la Figura 3.7. Se incluye un diagrama complementario que muestra información específica de la interfaz y de los elementos de interacción sin importar el nivel, como se muestra en la Figura 3.8.

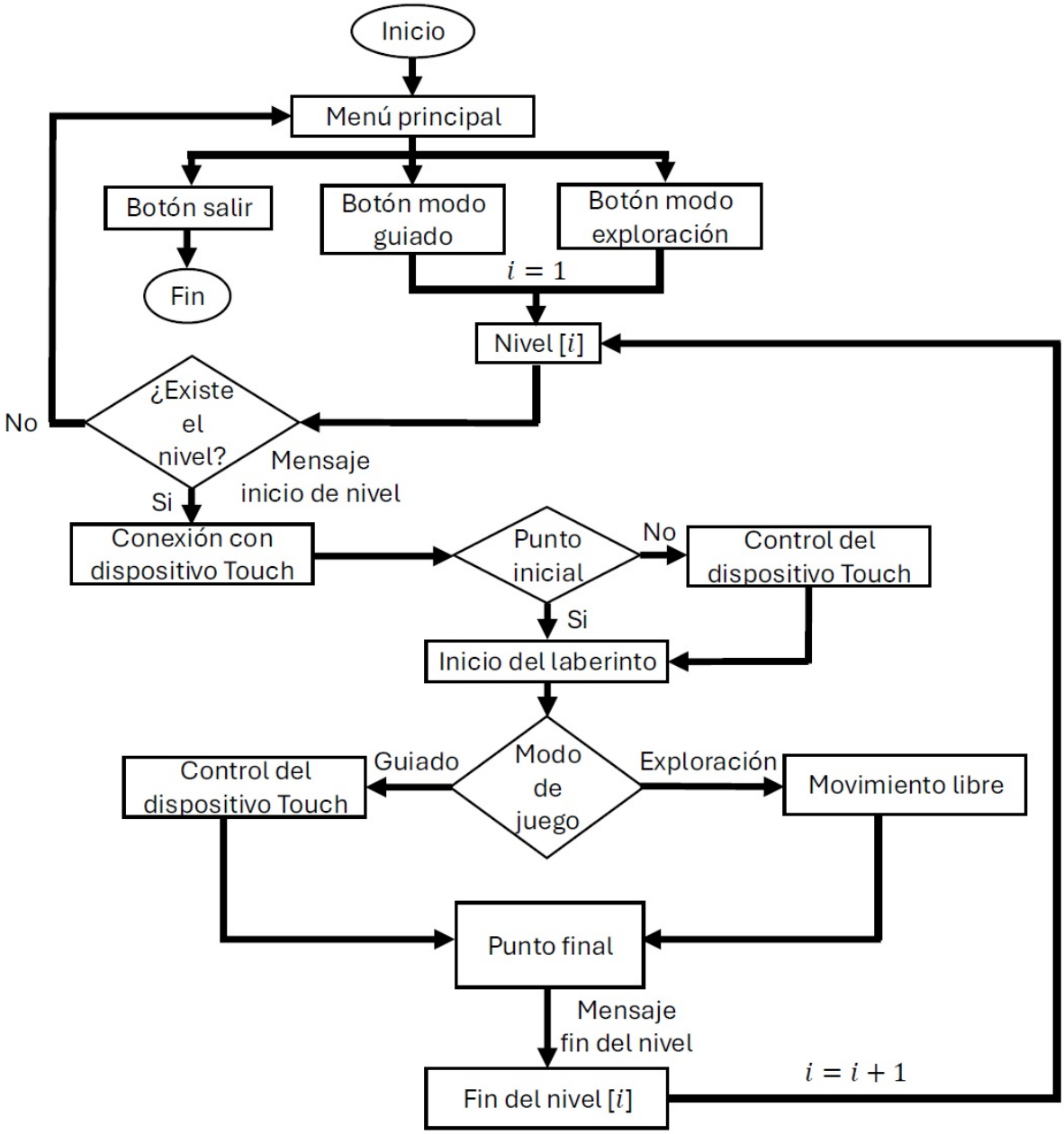



Figura 3.7: Diagrama de flujo general del juego.

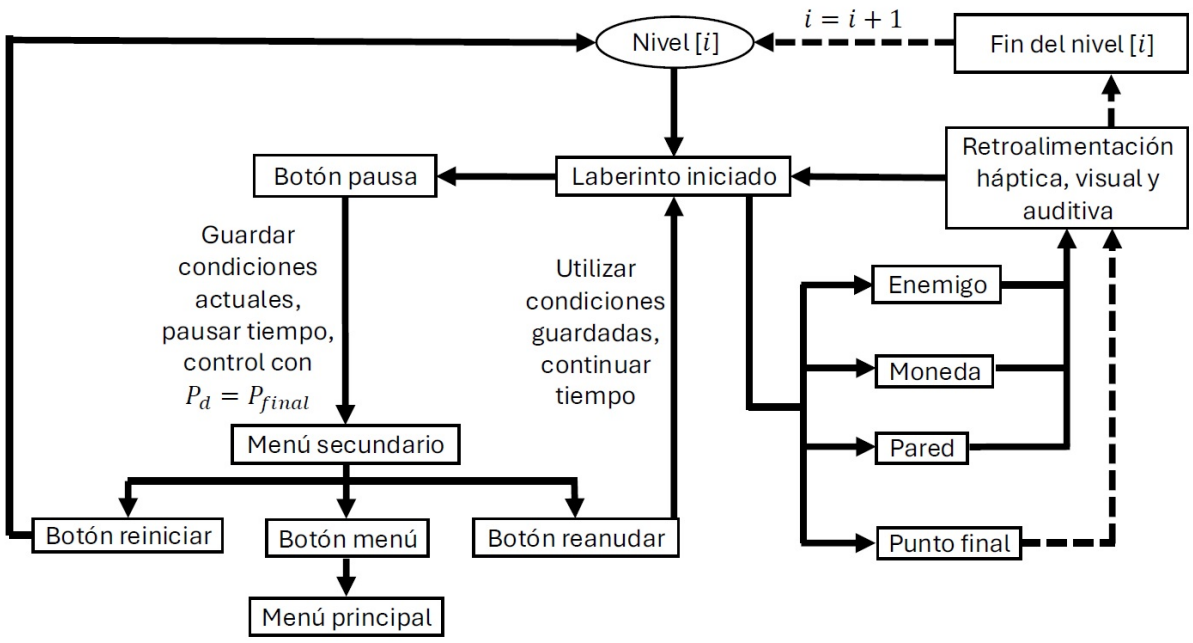



Figura 3.8: Diagrama de flujo complementario.

## 3.4. Discusión y conclusiones

Una adecuada rehabilitación en los usuarios con discapacidad cerebral muchas veces requiere que estos hagan ejercicios de fisioterapia durante más de una hora al día para permitir una rápida recuperación; por lo tanto, se tiene la estrategia del uso de la robótica con la realidad virtual que permite facilitar el proceso de rehabilitación. Este proceso hace uso de un dispositivo háptico que permite la retroalimentación kinestésica y en conjunto con un diseño de un ambiente virtual interactivo permite al usuario establecer una inmersión en el ejercicio y aumentar la motivación, asegurando que el paciente continúe con el tratamiento el tiempo requerido.

En este capítulo se estableció la interfaz de un juego de un laberinto virtual interactivo con 5 niveles diferentes, el cual tiene dos modos de juego diferentes; el modo guiado pasivo, en el cual el dispositivo háptico proporciona la fuerza para guiar al usuario de un punto inicial a un punto final por una trayectoria preestablecida facilitándole finalizar la tarea en cada nivel del juego. El segundo modo de juego es el modo de exploración activa, en el cual el usuario puede navegar por el laberinto de forma libre, únicamente limitado por las paredes del laberinto. En ambos modos del juego se pueden recolectar datos del comportamiento del usuario durante el ejercicio, permitiendo con esto registrar los progresos

del paciente y establecer la utilidad de la plataforma en el proceso de neurorrehabilitación.

El uso del motor de videojuegos Unity proporciona herramientas útiles y de fácil manejo para la creación del ambiente virtual, el cual permite usar efectos visuales y auditivos necesarios para construir una interfaz con laberintos virtuales atractivos e intuitivos para el usuario.

# Capítulo 4

# Evaluación experimental

La evaluación experimental es una etapa esencial en el proceso de validación de tecnologías interactivas aplicadas a la rehabilitación motora, ya que permite analizar de manera sistemática la usabilidad, funcionalidad y aceptación de la solución propuesta en un entorno controlado. En este capítulo se describe el diseño, implementación y resultados de una prueba piloto llevada a cabo con una plataforma de exergaming bimanual, la cual integra dos dispositivos hápticos y un entorno de realidad virtual inmersiva (Figura 4.1).

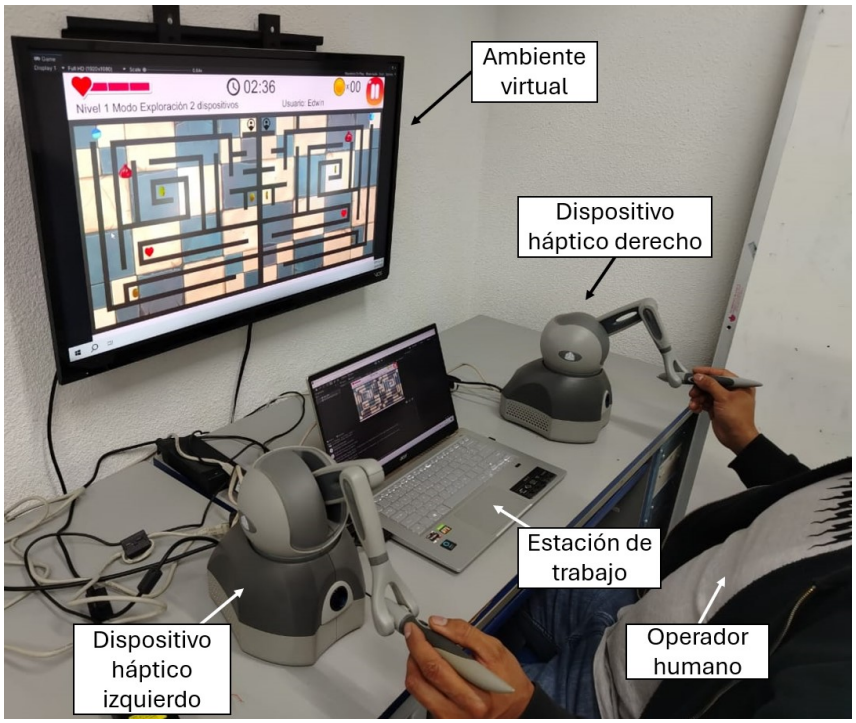



Figura 4.1: Plataforma háptica bimanual.

Esta prueba piloto tuvo como objetivo principal identificar el desempeño técnico del sistema, así como recopilar información preliminar sobre la experiencia de uso y la respuesta motora de los participantes. A través de este estudio exploratorio, se busca obtener evidencias iniciales que respalden la viabilidad del sistema, al mismo tiempo que se detectan áreas susceptibles de mejora antes de su aplicación en contextos clínicos o estudios con mayor rigurosidad metodológica.

## 4.1. Metodología para el uso de la plataforma en el usuario

En esta sección se propone una metodología para la aplicación de la plataforma háptica, independientemente de la condición física y mental del usuario. El diseño del procedimiento se muestra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 4.2).

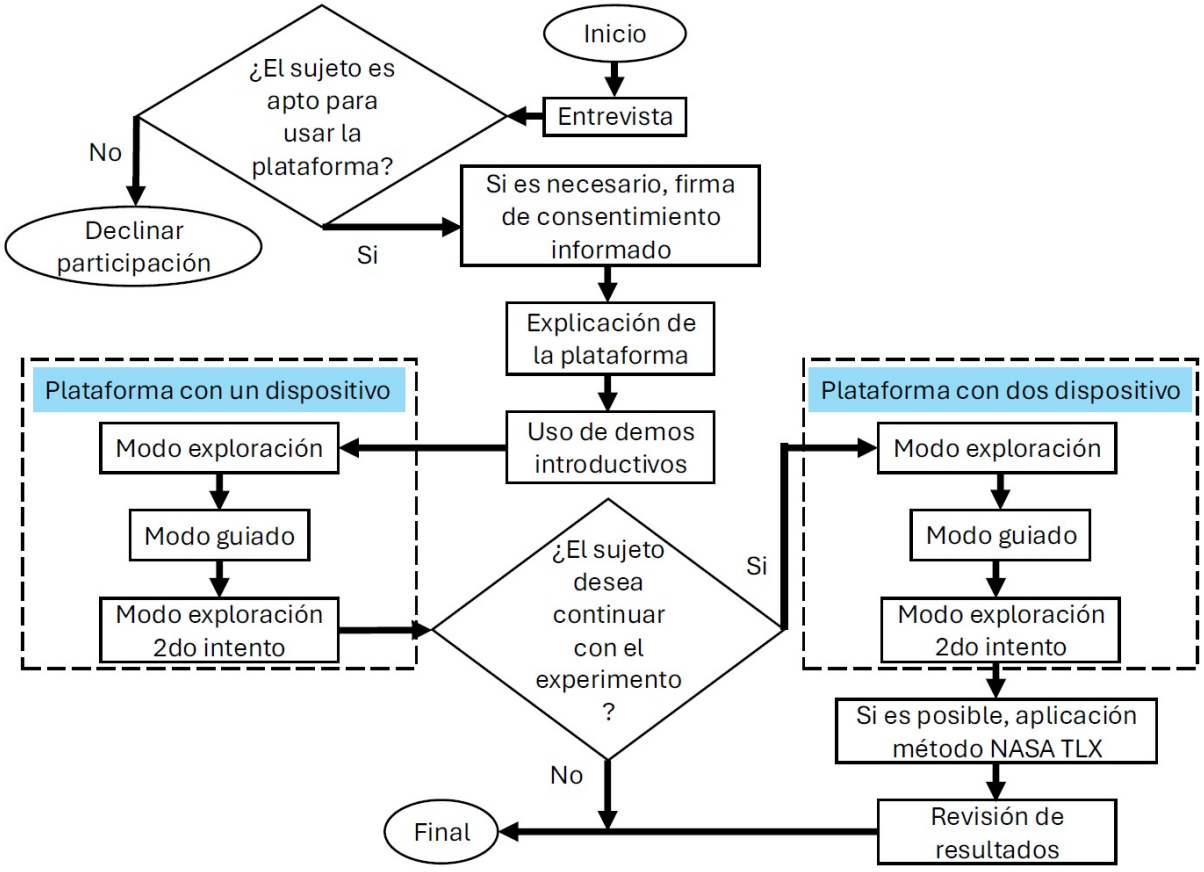



Figura 4.2: Diagrama de flujo de la aplicación del experimento.

### 4.1.1. Entrevista y firma de consentimiento informado

Se aplica al posible usuario un cuestionario que permite corroborar su aptitud para el uso de la plataforma (Apéndice A), así como también establecer su consentimiento y el de sus tutores para la realización de la tarea de rehabilitación y diagnóstico con la plataforma háptica (Apéndice B). El formato actual está basado en el documento obtenido del sitio web del Instituto Nacional de Rehabilitación [22].

### 4.1.2. Entendimiento interactivo de una interfaz háptica.

Se implementa el empleo de algunos demos simples que permitan facilitar el entendimiento en el uso de la plataforma. Tanto los demos y sus complementos fueron desarrollados por 3D systems, obtenidos de la Unity Store.

1. Demo de superficies virtuales (Figura 4.3). Permite simular la percepción de superficies con diferentes texturas en un espacio virtual, mediante retroalimentación kinestésica.

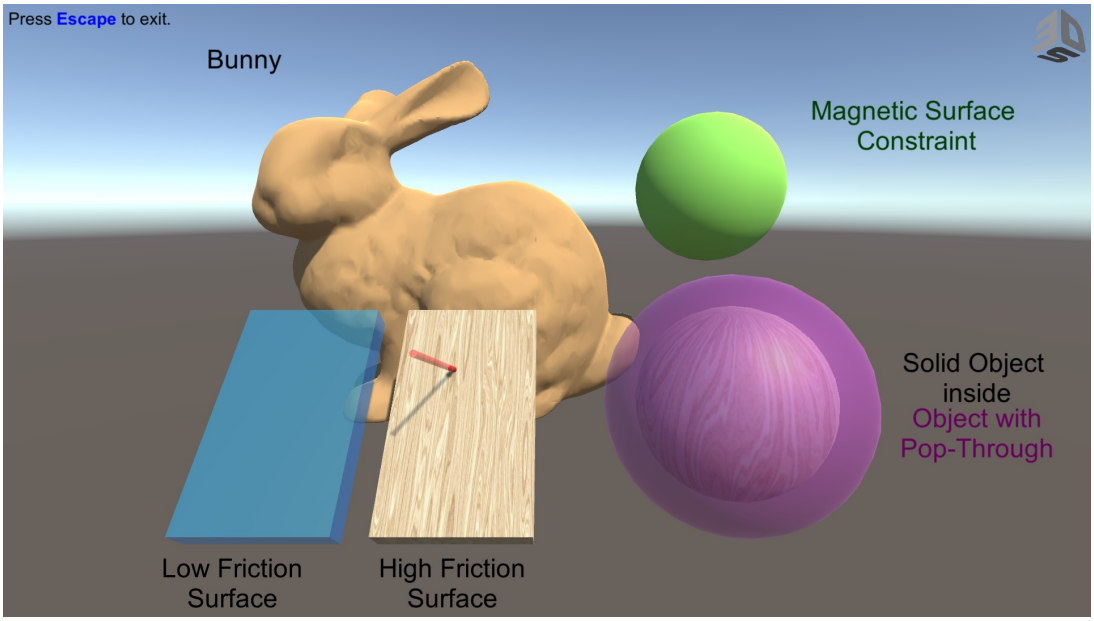



Figura 4.3: Demo de superficies virtuales para ejemplificación de una tarea háptica [63].

2. Demo de pelotas cayendo (Figura 4.4). Permite simular pelotas que caen e impactan con el objeto controlado por el usuario y permite la retroalimentación kinestésica correspondiente.

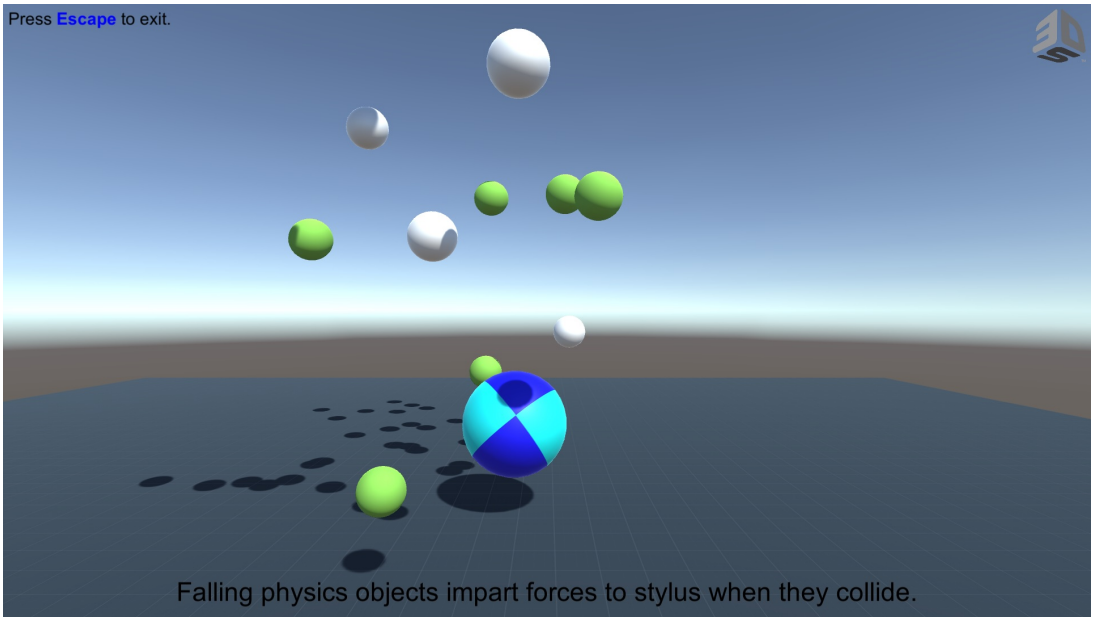



Figura 4.4: Demo de pelotas cayendo [63].

3. Demo de ensartar aros (Figura 4.5). Este demo tiene como propósito que el usuario sea capaz de mover unos aros de colores mediante una pinza controlada por el usuario, los cuales deben ser ensartados en unas varillas correspondientes a su color.

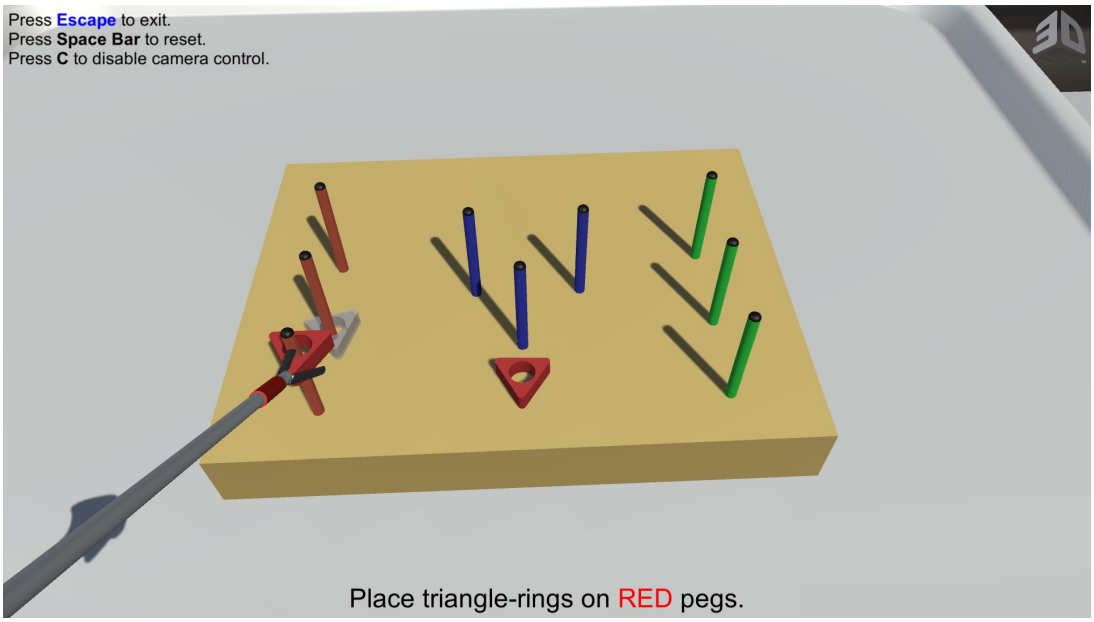



Figura 4.5: Demo ensartar aros [63].

### 4.1.3. 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:

- Uso de la plataforma con el modo exploración (1HE1). Permite registrar las capacidades del usuario para realizar la tarea en el laberinto sin entrenamiento previo.
- Uso de la plataforma con el modo guiado (1HG1). Permite al usuario ser entrenado mediante el guiado por parte del robot, utilizando una trayectoria y velocidad preestablecidas para resolver el laberinto.
- Uso de la plataforma con el modo exploración por segunda ocasión (1HE2). Permite comparar los resultados con el primer ejercicio en modo exploración y observar los efectos del entrenamiento con el modo guiado.

### 4.1.4. 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.

- Uso de la plataforma con el modo exploración con dos dispositivos (2HE1).
- Uso de la plataforma con el modo guiado con dos dispositivos (2HG1).
- Uso de la plataforma con el modo exploración por segunda ocasión con dos dispositivos (2HE2).

### 4.1.5. Estudio comparativo.

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.

Los parámetros mostrados en la Tabla 4.1 son evaluados utilizando la Raíz Cuadrática Media (RMS, por sus siglas en inglés: Root Mean Square), la cual permite obtener el valor promedio de una serie de valores muestreados, aun a pesar de contar con valores positivos como negativos. Los datos se obtienen aplicando los puntos de las Secciones 4.1.3 y 4.1.4 a cada nivel de la plataforma.

| Parámetros | Simbología | Descripción |
|---|---|---|
| Velocidad de movimiento | $V_{RMS}$ | La velocidad media con la que el usuario realizó el laberinto. |
| Fuerza | $F_{RMS}$ | La fuerza media del robot necesaria para realizar el ejercicio. |
| Error extendido | $S_{RMS}$ | La medición media 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 | $E_T$ | Es el consumo total de energía requerida por el robot durante toda la tarea. |
| Duración del ejercicio | $D_T$ | Es el tiempo total requerido para completar el nivel correspondiente. |

Tabla 4.1: Parámetros para la evaluación del desempeño del usuario.

### 4.1.6. Aplicación del método NASA TLX.

Al finalizar el ejercicio, se lleva a cabo una evaluación de la carga mental del usuario después de haber realizado la tarea con el laberinto usando el método NASA TLX (Apéndice C) [36]. Los resultados permiten corroborar la aplicación potencial de la plataforma en rehabilitación infantil.

El método NASA Task Load Index (NASA-TLX) se emplea en este estudio debido a su capacidad para evaluar de forma multidimensional la carga cognitiva y física percibida durante la interacción con interfaces hápticas, lo cual es fundamental en contextos de rehabilitación y evaluación funcional [44][56]. A diferencia de otros métodos que se centran exclusivamente en aspectos ergonómicos, usabilidad general o desempeño motor, el NASA-TLX permite desglosar la experiencia del usuario en seis dimensiones clave: exigencia mental, exigencia física, exigencia temporal, rendimiento, esfuerzo y nivel de frustración. Esta estructura ofrece una visión más completa de la experiencia del usuario, especialmente relevante en niños con discapacidad cerebral, cuyo desempeño puede verse afectado por múltiples factores cognitivos y motores. En el caso de interacción con laberintos virtuales mediante una interfaz háptica, el NASA-TLX facilita identificar si el diseño impone una carga excesiva o inadecuada en alguna de estas dimensiones, lo que puede comprometer la eficacia del entrenamiento o la motivación del usuario.

Además, el NASA-TLX ha demostrado ser sensible a diferencias entre tareas, condi-

ciones experimentales y perfiles de usuario, lo que lo convierte en una herramienta robusta para detectar ajustes necesarios en la interfaz. Su uso también ha sido validado en estudios con poblaciones pediátricas y con necesidades especiales, especialmente cuando se adapta el formato de aplicación (por ejemplo, uso de escalas visuales o acompañamiento verbal guiado), permitiendo una recolección de datos confiable en entornos clínicos y educativos [8][30][32]. Por tanto, el NASA-TLX no solo mide el desempeño observable, sino que captura la carga subjetiva del usuario, aspecto crucial en tecnologías de rehabilitación donde el balance entre desafío y tolerancia es clave para mantener la adherencia y efectividad terapéutica.

## 4.2. Uso de la plataforma en modo exploración con niños sanos

En esta sección se llevó a cabo un estudio usando el modo exploración de la plataforma, en el cual participaron 4 niños (3 niños y una niña) sin algún impedimento físico y con experiencia en el empleo de aparatos electrónicos modernos. Fue posible obtener algunos datos nominales de niños sanos con edad promedio a los 8 años, como es el caso de la velocidad media de movimiento que un niño sano emplea para realizar el ejercicio, y en consecuencia aplicar el valor de este parámetro en el modo guiado de la plataforma háptica.

Los datos obtenidos de velocidad media durante el experimento se muestran en la Tabla 4.2, obteniendo un promedio de todos los datos de 1.64 cm/s, pero se optó por redondearlo a 1.7 cm/s. Este dato es importante, ya que permite hacer uso del generador de tiempo base (TBG) y obtener los datos de referencia para el control del dispositivo, considerando que ya se conoce la trayectoria del laberinto en los diferentes niveles.

| Usuario | Edad | Mano dominante | Velocidad media(cm/s) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 | Nivel 4 | Nivel 5 |
| 1 | 10 | derecha | 1.96 | 1.84 | 1.67 | 2.07 | 1.38 |
| 2 | 8 | derecha | 1.06 | 1.52 | 1.63 | 1.73 | 1.5 |
| 3 | 7 | derecha | 1.59 | 1.37 | 2.2 | 1.74 | 1.73 |
| 4 | 4 | derecha | 1.44 | 1.44 | 1.18 | 1.88 | 1.88 |
| **Promedio general de velocidad media: 1.64 $\approx$ 1.7 cm/s** | | | | | | | |

Tabla 4.2: Comparación de velocidad de movimiento en la plataforma en modo exploración de niños sanos.

A continuación se muestran las trayectorias que los niños sanos (Figura 4.6) que aceptaron realizar el experimento con el modo exploración en cada uno de los niveles de la plataforma, como se muestra en el siguiente conjunto de Figuras 4.7. En las trayectorias se puede observar que, los niños empezaron y finalizaron correctamente en los laberintos, pero la forma de resolver el laberinto es distinta. Al resolver un laberinto, es posible obtener diferentes caminos que permitan llegar a la salida de este. A pesar de ello, no significa que el niño esté haciendo mal el ejercicio.

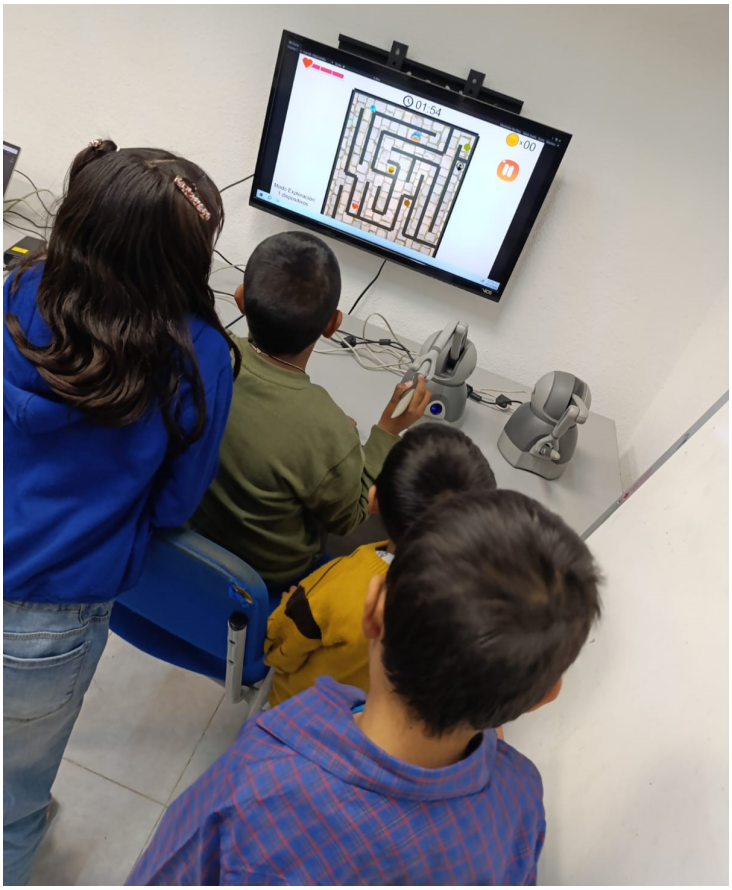
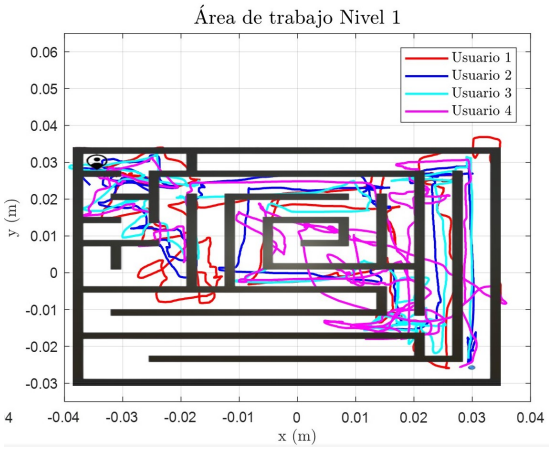
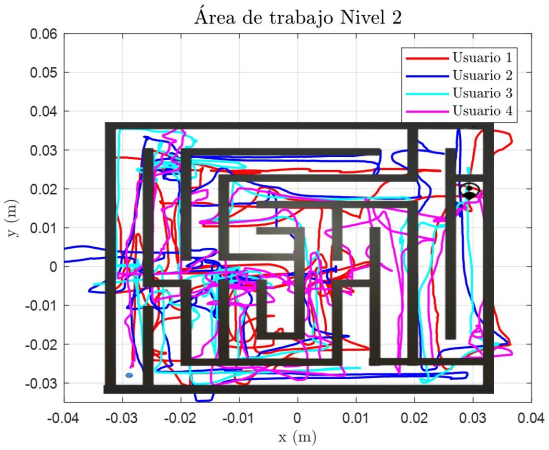



Figura 4.6: Niños sanos que participaron con el uso de la plataforma háptica.

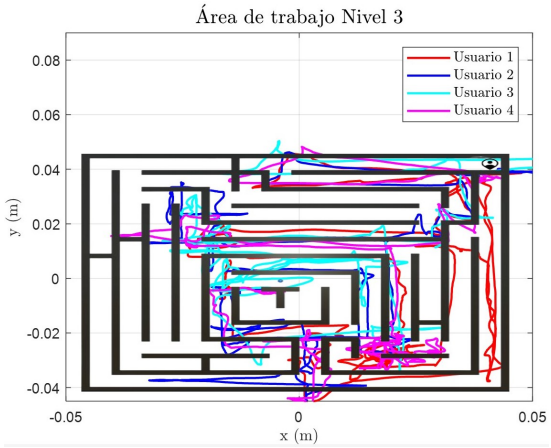
En las trayectorias de las Figuras 4.7a y 4.7c se puede observar que los niños recorrieron el laberinto yendo por la misma zona, esto dado que existe una menos diversidad de caminos que permitan llegar a la salida. Por otro lado, las trayectorias de las Figuras 4.7b, 4.7d y 4.7e los movimientos de los niños por el laberinto son mucho más diversos, observando que cada uno tomó un camino distinto para finalizar el laberinto.



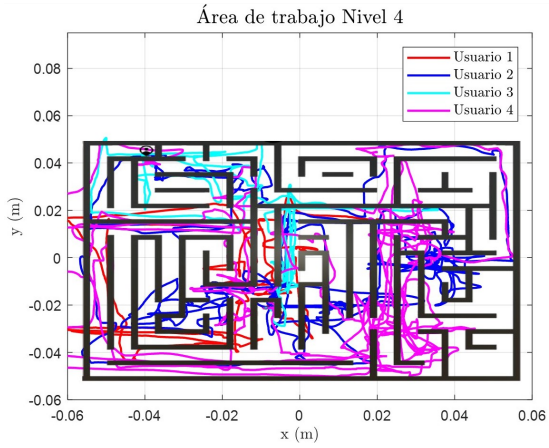

(a) Desarrollo de usuarios en el nivel 1.



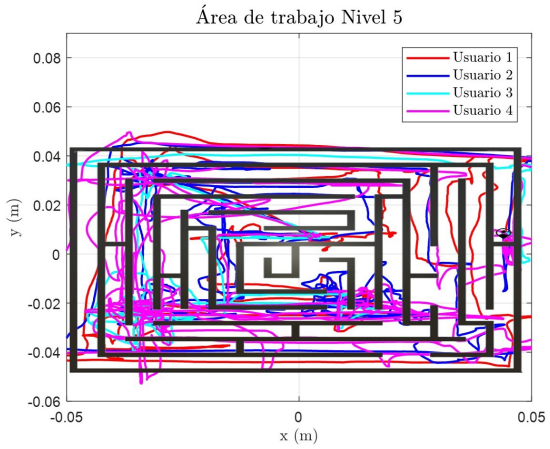

(b) Desarrollo de usuarios en el nivel 2.




(c) Desarrollo de usuarios en el nivel 3.




(d) Desarrollo de usuarios en el nivel 4.




(e) Desarrollo de usuarios en el nivel 5.

Figura 4.7: Comportamiento de niños sanos en modo exploración en cada uno de los niveles de la plataforma.

### 4.2.1. Cálculo del tiempo base a partir de la velocidad media

A continuación se muestra la obtención de la Ecuación 4.2 que permite obtener el valor de tiempo base haciendo uso de la velocidad media, dato necesario para el uso del TBG.

$$V_m = \frac{P_f - P_0}{t_b - t_0}, \tag{4.1}$$

y despejando $t_b$ se obtiene

$$t_b = \frac{P_f - P_0}{V_m} + t_0 \tag{4.2}$$

donde $t_b$ es el tiempo de convergencia, $t_0$ es el tiempo inicial de cada trayectoria, $V_m$ es la velocidad media, $P_0$ es la posición inicial y $P_f$ la posición final de cualquier segmento del laberinto, de este modo se asegura que el modo guiado se realiza con una velocidad media adecuada para aplicarse en niños de 7 a 10 años o más.

## 4.3. Trayectorias en el laberinto

Para el uso del modo guiado pasivo con el dispositivo háptico se necesita que el laberinto cuente con una navegación y operación consistentes y lógicas, se implementaron rutas preestablecidas para el seguimiento de trayectorias con el control por modos deslizantes cartesiano considerando la ruta más corta para recorrer y finalizar el laberinto para cada nivel de la plataforma háptica.

### 4.3.1. Tarea de movimiento del nivel 1 de la plataforma

En el nivel 1 de la plataforma se establecieron 18 segmentos requeridos para recorrer el laberinto, considerando que de cada segmento se conoce tanto su posición inicial y final. Se hace uso de la Ecuación 4.2 y la velocidad media ($V_m$) de 1.7 cm/s para obtener los datos requeridos para el TBG (Sección 2.4.7), como se muestra en la Tabla 4.3 y la trayectoria diseñada para el nivel 1 se muestra en la Figura 4.8.

| $P_0$ | $P_f$ | $\|P_f - P_0\|$ (cm) | $t_0$ (seg.) | $t_b$ (seg.) | $t_b - t_0$ (seg.) |
|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ | $P_2$ | 5.32 | 0 | 3.13 | 3.13 |
| $P_2$ | $P_3$ | 0.6 | 3.13 | 3.48 | 0.35 |
| $P_3$ | $P_4$ | 4.2 | 3.48 | 5.96 | 2.48 |
| $P_4$ | $P_5$ | 0.6 | 5.96 | 6.3 | 0.34 |
| $P_5$ | $P_6$ | 1.2 | 6.3 | 7 | 0.7 |
| $P_6$ | $P_7$ | 2.4 | 7 | 8.41 | 1.41 |
| $P_7$ | $P_8$ | 1.8 | 8.41 | 9.46 | 1.05 |
| $P_8$ | $P_9$ | 1.8 | 9.46 | 10.51 | 1.05 |
| $P_9$ | $P_{10}$ | 0.6 | 10.51 | 10.86 | 0.35 |
| $P_{10}$ | $P_{11}$ | 3 | 10.86 | 12.62 | 1.76 |
| $P_{11}$ | $P_{12}$ | 1.2 | 12.62 | 13.32 | 0.7 |
| $P_{12}$ | $P_{13}$ | 0.6 | 13.32 | 13.67 | 0.35 |
| $P_{13}$ | $P_{14}$ | 0.6 | 13.67 | 14.02 | 0.35 |
| $P_{14}$ | $P_{15}$ | 0.6 | 14.02 | 14.37 | 0.35 |
| $P_{15}$ | $P_{16}$ | 0.6 | 14.37 | 14.72 | 0.35 |
| $P_{16}$ | $P_{17}$ | 0.6 | 14.72 | 15.07 | 0.35 |
| $P_{17}$ | $P_{18}$ | 0.6 | 15.07 | 15.42 | 0.35 |
| $P_{18}$ | $P_{19}$ | 0.6 | 15.42 | 15.77 | 0.35 |

Tabla 4.3: Datos de la tarea del nivel 1.

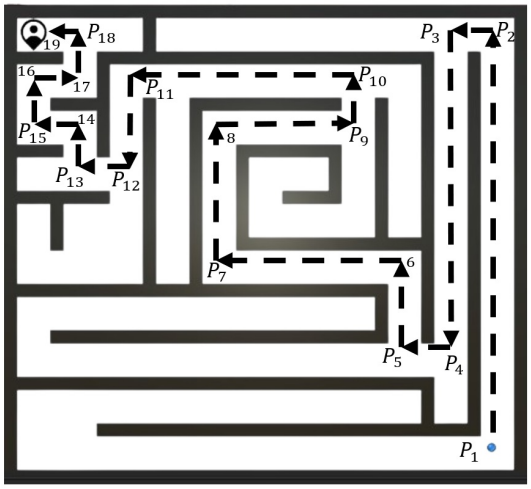



Figura 4.8: Tarea del nivel 1.

### 4.3.2. Tarea de movimiento del nivel 2 de la plataforma

En el nivel 2 de la plataforma se establecieron 13 segmentos requeridos para recorrer el laberinto, considerando que de cada segmento se conoce tanto su posición inicial y final. Se hace uso de la Ecuación 4.2 y la velocidad media ($V_m$) de 1.7 cm/s para obtener los datos requeridos para el TBG (Sección 2.4.7), como se muestra en la Tabla 4.4 y la trayectoria diseñada para el nivel 2 se muestra en la Figura 4.9.

| $P_0$ | $P_f$ | $\|P_f - P_0\|$ (cm) | $t_0$ (seg.) | $t_b$ (seg.) | $t_b - t_0$ (seg.) |
|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ | $P_2$ | 5.4 | 0 | 3.17 | 3.17 |
| $P_2$ | $P_3$ | 0.6 | 3.17 | 3.52 | 0.35 |
| $P_3$ | $P_4$ | 3 | 3.52 | 5.28 | 1.76 |
| $P_4$ | $P_5$ | 1.2 | 5.28 | 5.98 | 0.7 |
| $P_5$ | $P_6$ | 1.8 | 5.98 | 7.03 | 1.05 |
| $P_6$ | $P_7$ | 1.2 | 7.03 | 7.73 | 0.7 |
| $P_7$ | $P_8$ | 3 | 7.73 | 9.49 | 1.76 |
| $P_8$ | $P_9$ | 1.2 | 9.49 | 10.19 | 0.7 |
| $P_9$ | $P_{10}$ | 0.6 | 10.19 | 10.54 | 0.35 |
| $P_{10}$ | $P_{11}$ | 3 | 10.54 | 12.3 | 1.76 |
| $P_{11}$ | $P_{12}$ | 3.6 | 12.3 | 14.41 | 2.11 |
| $P_{12}$ | $P_{13}$ | 0.6 | 14.41 | 14.76 | 0.35 |
| $P_{13}$ | $P_{14}$ | 3.6 | 14.76 | 16.87 | 2.11 |

Tabla 4.4: Datos de la tarea del nivel 2.

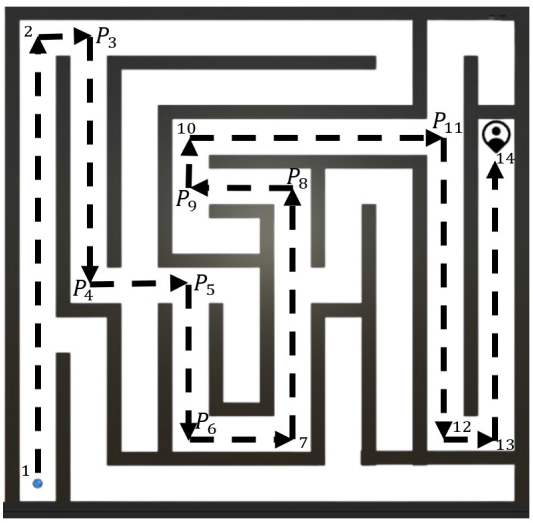



Figura 4.9: Tarea del nivel 2.

### 4.3.3. Tarea de movimiento del nivel 3 de la plataforma

En el nivel 3 de la plataforma se establecieron 15 segmentos requeridos para recorrer el laberinto, considerando que de cada segmento se conoce tanto su posición inicial y final. Se hace uso de la Ecuación 4.2 y la velocidad media ($V_m$) de 1.7 cm/s para obtener los datos requeridos para el TBG (Sección 2.4.7), como se muestra en la Tabla 4.5 y la trayectoria diseñada para el nivel 3 se muestra en la Figura 4.10.

| $P_0$ | $P_f$ | $\|P_f - P_0\|$ (cm) | $t_0$ (seg.) | $t_b$ (seg.) | $t_b - t_0$ (seg.) |
|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ | $P_2$ | 1.2 | 0 | 0.7 | 0.7 |
| $P_2$ | $P_3$ | 1.7 | 0.7 | 1.75 | 1.05 |
| $P_3$ | $P_4$ | 0.6 | 1.75 | 2.1 | 0.35 |
| $P_4$ | $P_5$ | 0.6 | 2.1 | 2.45 | 0.35 |
| $P_5$ | $P_6$ | 0.6 | 2.45 | 2.8 | 0.35 |
| $P_6$ | $P_7$ | 3.6 | 2.8 | 4.91 | 2.11 |
| $P_7$ | $P_8$ | 4.2 | 4.91 | 7.38 | 2.47 |
| $P_8$ | $P_9$ | 0.6 | 7.38 | 7.73 | 0.35 |
| $P_9$ | $P_{10}$ | 4.8 | 7.73 | 10.55 | 2.82 |
| $P_{10}$ | $P_{11}$ | 0.6 | 10.55 | 10.9 | 0.35 |
| $P_{11}$ | $P_{12}$ | 0.6 | 10.9 | 11.25 | 0.35 |
| $P_{12}$ | $P_{13}$ | 1.2 | 11.25 | 11.95 | 0.7 |
| $P_{13}$ | $P_{14}$ | 3.6 | 11.95 | 14.06 | 2.11 |
| $P_{14}$ | $P_{15}$ | 0.6 | 14.06 | 14.41 | 0.35 |
| $P_{15}$ | $P_{16}$ | 4.2 | 14.41 | 16.88 | 2.47 |

Tabla 4.5: Datos de la tarea del nivel 3.

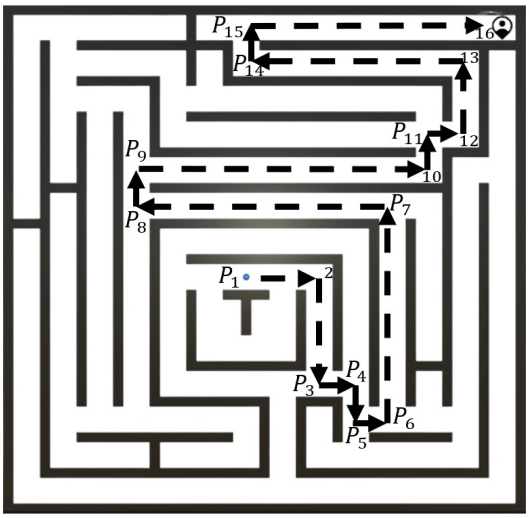



Figura 4.10: Tarea del nivel 3.

### 4.3.4. Tarea de movimiento del nivel 4 de la plataforma

En el nivel 4 de la plataforma se establecieron 22 segmentos requeridos para recorrer el laberinto, considerando que de cada segmento se conoce tanto su posición inicial y final. Se hace uso de la Ecuación 4.2 y la velocidad media ($V_m$) de 1.7 cm/s para obtener los datos requeridos para el TBG (Sección 2.4.7), como se muestra en la Tabla 4.6 y la trayectoria diseñada para el nivel 4 se muestra en la Figura 4.11.

| $P_0$ | $P_f$ | $\|P_f - P_0\|$ (cm) | $t_0$ (seg.) | $t_b$ (seg.) | $t_b - t_0$ (seg.) |
|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ | $P_2$ | 0.6 | 0 | 0.35 | 0.35 |
| $P_2$ | $P_3$ | 0.6 | 0.35 | 0.7 | 0.35 |
| $P_3$ | $P_4$ | 3 | 0.7 | 2.46 | 1.76 |
| $P_4$ | $P_5$ | 1.2 | 2.46 | 3.16 | 0.7 |
| $P_5$ | $P_6$ | 3 | 3.16 | 4.92 | 1.76 |
| $P_6$ | $P_7$ | 1.2 | 4.92 | 5.62 | 0.7 |
| $P_7$ | $P_8$ | 3.5 | 5.62 | 7.73 | 2.11 |
| $P_8$ | $P_9$ | 0.6 | 7.73 | 8.08 | 0.35 |
| $P_9$ | $P_{10}$ | 0.6 | 8.08 | 8.43 | 0.35 |
| $P_{10}$ | $P_{11}$ | 0.6 | 8.43 | 8.78 | 0.35 |
| $P_{11}$ | $P_{12}$ | 0.6 | 8.78 | 9.13 | 0.35 |
| $P_{12}$ | $P_{13}$ | 1.8 | 9.13 | 10.18 | 1.05 |
| $P_{13}$ | $P_{14}$ | 4.2 | 10.18 | 12.65 | 2.47 |
| $P_{14}$ | $P_{15}$ | 3 | 12.65 | 14.41 | 1.76 |
| $P_{15}$ | $P_{16}$ | 1.8 | 14.41 | 15.46 | 1.05 |
| $P_{16}$ | $P_{17}$ | 3 | 15.46 | 17.22 | 1.76 |
| $P_{17}$ | $P_{18}$ | 0.6 | 17.22 | 17.57 | 0.35 |
| $P_{18}$ | $P_{19}$ | 0.6 | 17.57 | 17.92 | 0.35 |
| $P_{19}$ | $P_{20}$ | 1.2 | 17.92 | 18.62 | 0.7 |
| $P_{20}$ | $P_{21}$ | 3.6 | 18.62 | 20.73 | 2.11 |
| $P_{21}$ | $P_{22}$ | 2.4 | 20.73 | 22.14 | 1.41 |
| $P_{22}$ | $P_{23}$ | 1.2 | 22.14 | 22.84 | 0.7 |

Tabla 4.6: Datos de la tarea del nivel 4.

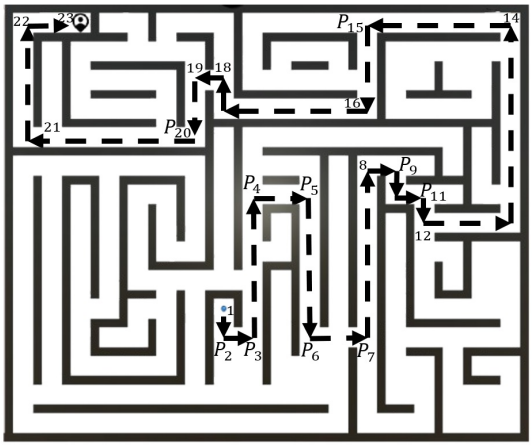



Figura 4.11: Tarea del nivel 4.

## 4.3.5. Tarea de movimiento del nivel 5 de la plataforma

En el nivel 5 de la plataforma se establecieron 18 segmentos requeridos para recorrer el laberinto, considerando que de cada segmento se conoce tanto su posición inicial y final. Se hace uso de la Ecuación 4.2 y la velocidad media ($V_m$) de 1.7 cm/s para obtener los datos requeridos para el TBG (Sección 2.4.7), como se muestra en la Tabla 4.7 y la trayectoria diseñada para el nivel 5 se muestra en la Figura 4.12.

| $P_0$ | $P_f$ | $\|P_f - P_0\|$ (cm) | $t_0$ (seg.) | $t_b$ (seg.) | $t_b - t_0$ (seg.) |
|---|---|---|---|---|---|
| $P_1$ | $P_2$ | 1.8 | 0 | 1.05 | 1.05 |
| $P_2$ | $P_3$ | 2.4 | 1.05 | 2.46 | 1.41 |
| $P_3$ | $P_4$ | 2.4 | 2.46 | 3.87 | 1.41 |
| $P_4$ | $P_5$ | 0.6 | 3.87 | 4.22 | 0.35 |
| $P_5$ | $P_6$ | 4.2 | 4.22 | 6.69 | 2.47 |
| $P_6$ | $P_7$ | 5.4 | 6.69 | 9.86 | 3.17 |
| $P_7$ | $P_8$ | 6 | 9.86 | 13.38 | 3.52 |
| $P_8$ | $P_9$ | 3 | 13.38 | 15.14 | 1.76 |
| $P_9$ | $P_{10}$ | 0.6 | 15.14 | 15.49 | 0.35 |
| $P_{10}$ | $P_{11}$ | 3 | 15.49 | 17.25 | 1.76 |
| $P_{11}$ | $P_{12}$ | 0.6 | 17.25 | 17.6 | 0.35 |
| $P_{12}$ | $P_{13}$ | 5.4 | 17.6 | 20.77 | 3.17 |
| $P_{13}$ | $P_{14}$ | 0.6 | 20.77 | 21.12 | 0.35 |
| $P_{14}$ | $P_{15}$ | 1.8 | 21.12 | 22.17 | 1.05 |
| $P_{15}$ | $P_{16}$ | 9 | 22.17 | 27.47 | 5.3 |
| $P_{16}$ | $P_{17}$ | 7.8 | 27.47 | 32.05 | 4.58 |
| $P_{17}$ | $P_{18}$ | 9 | 32.05 | 37.35 | 5.3 |
| $P_{18}$ | $P_{19}$ | 3 | 37.35 | 39.11 | 1.76 |

Tabla 4.7: Datos de la tarea del nivel 5.

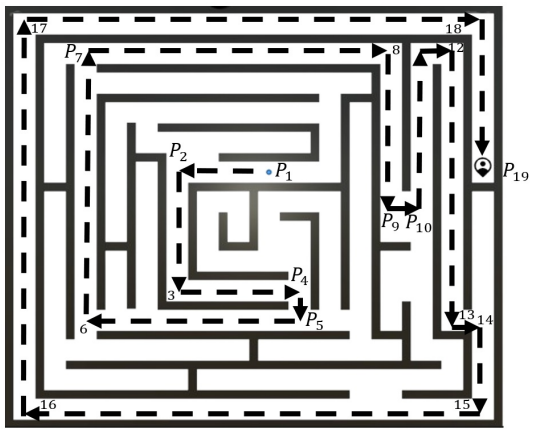



Figura 4.12: Tarea del nivel 5.

## 4.4. Prueba piloto de la plataforma en el ICBI-UAEH

En esta sección se llevó a cabo un estudio del comportamiento de la plataforma háptica (Figura 4.1), aplicado a 11 participantes, con el uso del control por modos deslizantes cartesiano. Se tiene el objetivo de buscar y corregir aspectos de la plataforma mediante la aplicación del método NASA TLX.

### 4.4.1. Trayectorias de referencia

El experimento se realiza aplicando las siguientes Ecuaciones de posición (Ecuación 4.3) y velocidad de referencia (Ecuación 4.4) que son necesarias para el control del dispositivo. Se hace uso del TBG (sección 2.4.7) y los segmentos de los niveles de la plataforma con datos de la sección 4.3.

$$\begin{aligned} x_{ref} =& (x_f - x_0)\xi + x_0, \\ y_{ref} =& (y_f - y_0)\xi + y_0, \\ z_{ref} =& 0, \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ref} =& (x_f - x_0)\dot{\xi}, \\ \dot{y}_{ref} =& (y_f - y_0)\dot{\xi}, \\ \dot{z}_{ref} =& 0, \end{aligned} \tag{4.4}$$

### 4.4.2. Parámetros del control

Para la aplicación del caso de estudio, se implementaron ganancias adecuadas para el funcionamiento del dispositivo háptico en interacción con el ambiente virtual en Unity. Se cuidó que las ganancias fueran lo suficientemente altas para el uso con los usuarios, pero sin exceder las capacidades del robot, mostradas en la Tabla 4.8

| Parámetro | Ganancia |
|---|---|
| $k$ | 3 |
| $K_{p1}$ | 4 |
| $K_{p2} = K_{p3}$ | 5 |
| $K_{d1} = K_{d2} = K_{d3}$ | 0.01 |
| $K_{i1} = K_{i3}$ | 0.01 |
| $K_{i2}$ | 0.007 |

Tabla 4.8: Parámetros del modo guiado con control por modos deslizantes.

### 4.4.3. Uso de la plataforma con estudiantes universitarios

Para una prueba piloto, se eligieron 11 voluntarios de una institución de educación superior (Figura 4.13) para el uso de la plataforma háptica, tomando en cuenta la igualdad entre hombres y mujeres. Antes de hacer el experimento, a todos ellos se les tomaron sus datos, los cuales son importantes para observar alguna tendencia o patrón en los datos obtenidos.

Figura 4.13: Voluntarios que participaron con el uso de la plataforma háptica.

En la Tabla 4.9 se muestran algunos datos personales de los participantes, mostrando que la mayoría son estudiantes de la universidad; por lo tanto, muchos de ellos están familiarizados con el uso de sistemas inteligentes y la realidad virtual. En la Tabla 4.10 se muestran antecedentes médicos de los participantes, donde se observa que, a pesar de que algunos tienen problemas de salud, ninguno tiene dificultad para utilizar la plataforma.

| 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 |

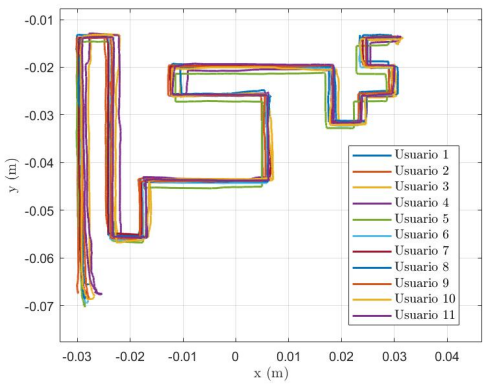
Tabla 4.9: Datos personales de los usuarios.

| 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 | Tetlaxilina | 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 |

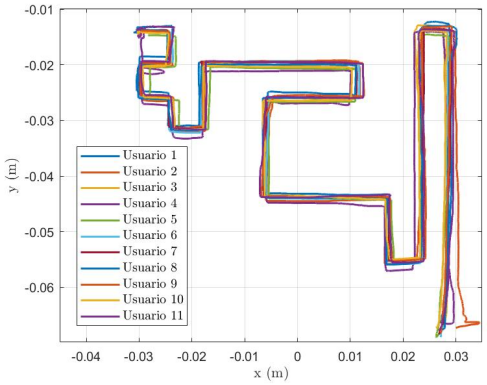
Tabla 4.10: Antecedentes médicos de los usuarios.

### 4.4.4. Resultados del modo guiado

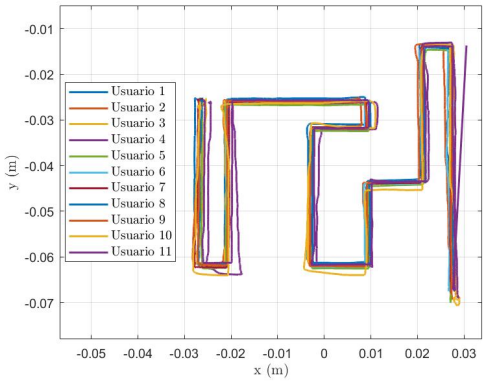
Mediante la aplicación del experimento a 11 voluntarios usando la plataforma bimanual en modo guiado con el control por modos deslizantes cartesiano y las trayectorias antes descritas para cada nivel del laberinto virtual. Se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las Figuras 4.14 y 4.15, donde se puede apreciar que la mayoría de los participantes realizaron la trayectoria adecuadamente en cada uno de los niveles al ofrecer poca oposición al movimiento del robot. En caso de aplicar oposición al robot, el control le pide al robot la fuerza para oponerse a las perturbaciones provocadas por el usuario y seguir la trayectoria adecuadamente, pero sin sobrepasar las capacidades del robot.



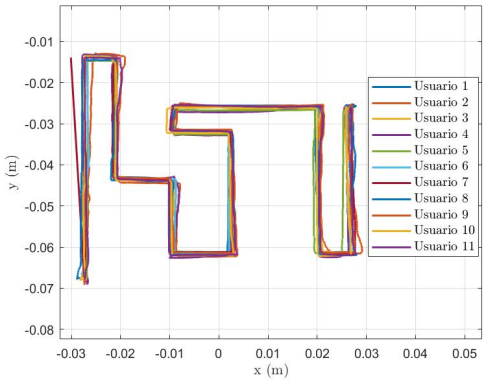

(a) Plano de trabajo del nivel 1 modo guiado lado izquierdo




(b) Plano de trabajo del nivel 1 modo guiado lado derecho

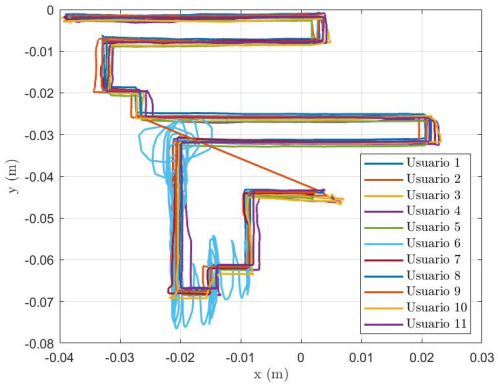



(c) Plano de trabajo del nivel 2 modo guiado lado izquierdo

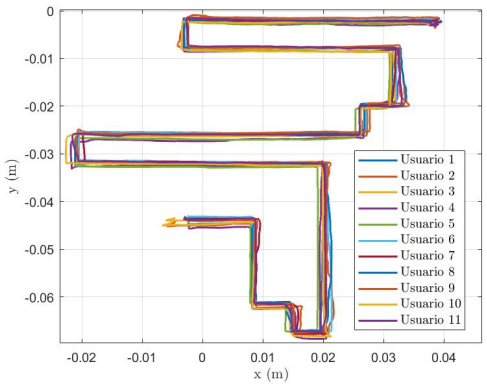



(d) Plano de trabajo del nivel 2 modo guiado lado derecho

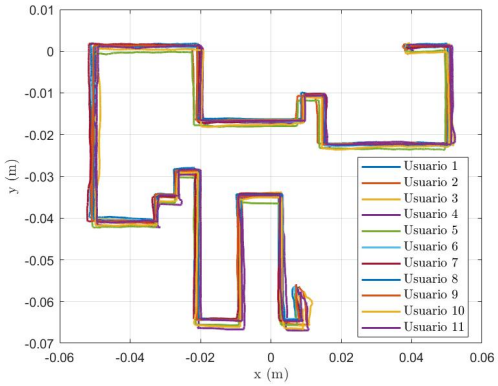
Figura 4.14: Resultado experimental de plataforma en modo guiado con control por modos deslizantes con voluntarios, parte 1.



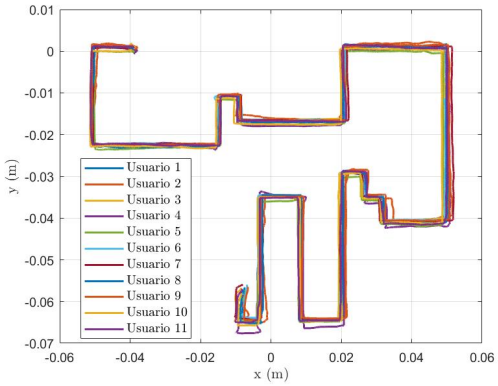

(a) Plano de trabajo del nivel 3 modo guiado lado izquierdo



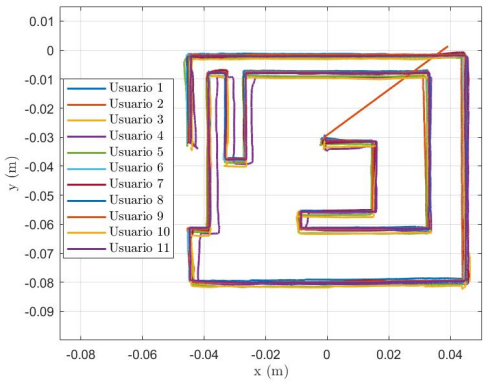

(b) Plano de trabajo del nivel 3 modo guiado lado derecho



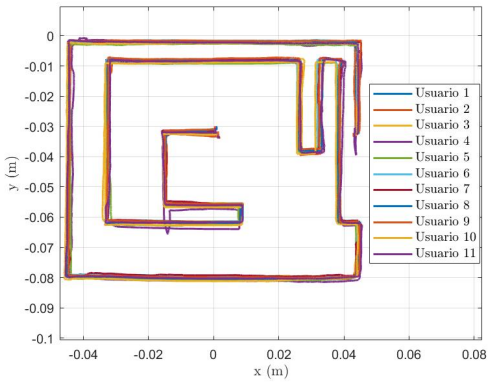

(c) Plano de trabajo del nivel 4 modo guiado lado izquierdo




(d) Plano de trabajo del nivel 4 modo guiado lado derecho




(e) Plano de trabajo del nivel 5 modo guiado lado izquierdo

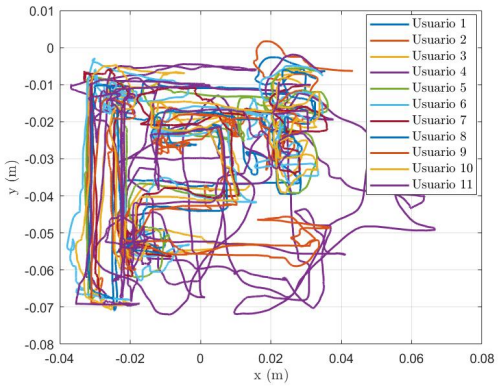



(f) Plano de trabajo del nivel 5 modo guiado lado derecho

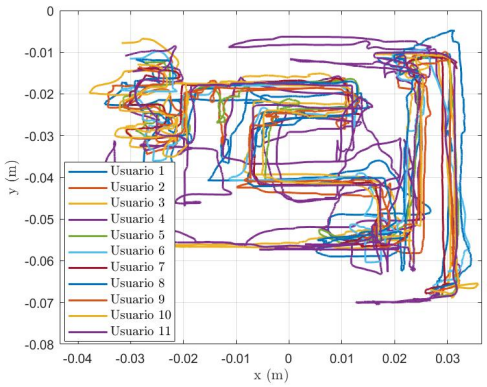
Figura 4.15: Resultado experimental de plataforma en modo guiado con control por modos deslizantes con voluntarios, parte 2.

### 4.4.5. Resultados del modo exploración

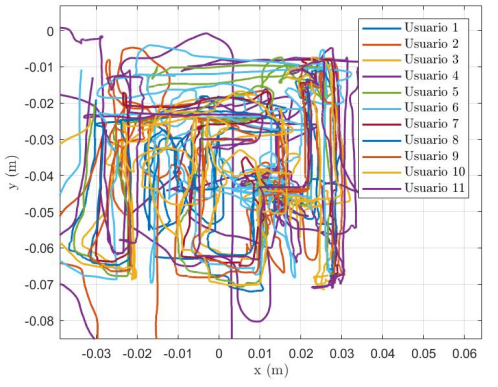
Mediante la aplicación del experimento a 11 voluntarios usando la plataforma bimanual en modo de exploración. Se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las Figuras 4.16 y 4.17, donde se puede apreciar la variedad de caminos tomados por los usuarios para completar cada uno de los niveles de la plataforma. Existen diferentes formas de resolver el ejercicio, algunos preferían resolver primero con una mano y luego con la otra, y en otros casos preferían hacerlo con ambas manos de forma simultánea, pero en general no existen problemas destacables que impidieran que los usuarios realizaran el ejercicio.



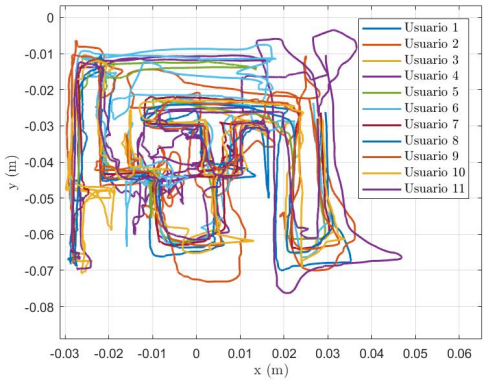

(a) Plano de trabajo del nivel 1 modo exploración lado izquierdo




(b) Plano de trabajo del nivel 1 modo exploración lado derecho

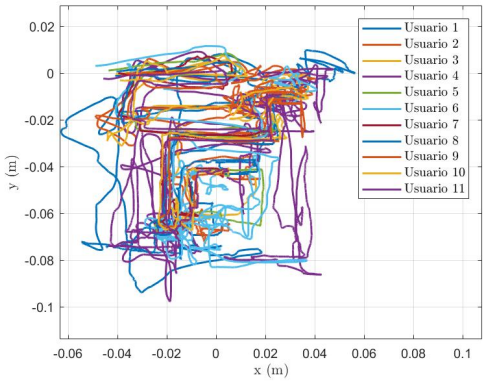



(c) Plano de trabajo del nivel 2 modo exploración lado izquierdo

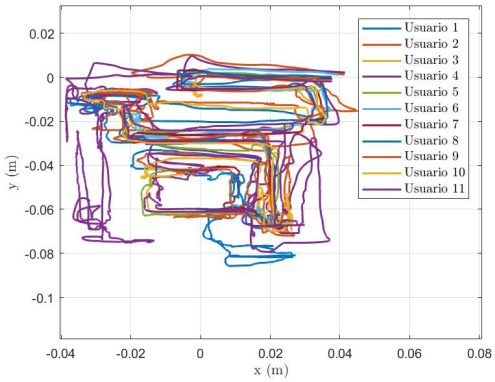



(d) Plano de trabajo del nivel 2 modo exploración lado derecho

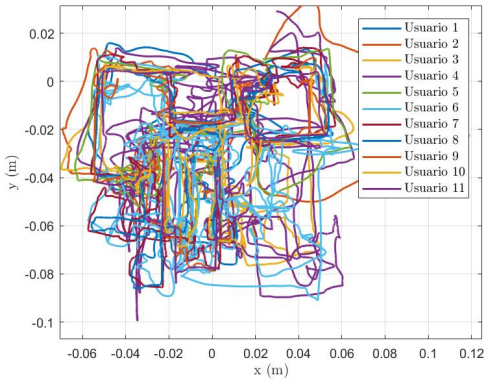
Figura 4.16: Resultado experimental de plataforma en modo exploración con compensación de la gravedad con voluntarios, parte 1.



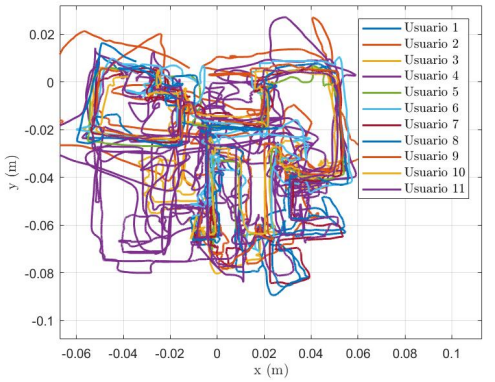

(a) Plano de trabajo del nivel 3 modo exploración lado izquierdo



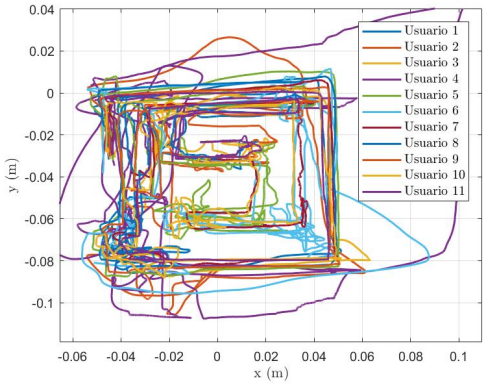

(b) Plano de trabajo del nivel 3 modo exploración lado derecho



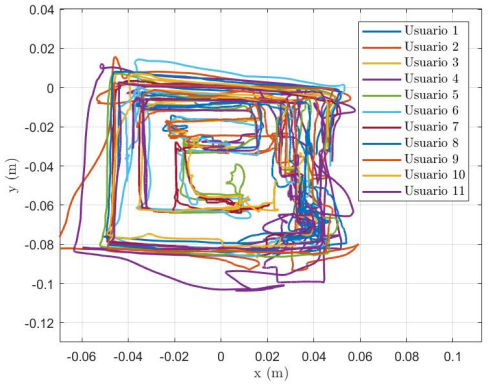

(c) Plano de trabajo del nivel 4 modo exploración lado izquierdo




(d) Plano de trabajo del nivel 4 modo exploración lado derecho




(e) Plano de trabajo del nivel 5 modo exploración lado izquierdo




(f) Plano de trabajo del nivel 5 modo exploración lado derecho

Figura 4.17: Resultado experimental de plataforma en modo exploración con compensación de la gravedad con voluntarios, parte 2.

### 4.4.6. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 1 de la plataforma.

Se midió el desempeño de los usuarios en el nivel 1 mediante métricas descritas anteriormente en la Tabla 4.1. Se registraron los resultados de cada uno de los voluntarios, donde se muestra la información obtenida de los diferentes modos de interacción de la plataforma (Tabla 4.11) y para facilitar la comparación de la información se utilizaron algunas gráficas de barras (Figura 4.18).

| Nivel 1 | Modo guiado | | Modo exploración | | Modo guiado | | Modo exploración | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der |
| **Parámetros** | **Usuario 1** | | | | **Usuario 2** | | | |
| Velocidad RMS (m/s) | 0.0166 | 0.017 | 0.0269 | 0.0223 | 0.01688 | 0.0167 | 0.0237 | 0.0237 |
| Fuerza RMS (N) | 0.1985 | 0.2084 | 0.25 | 0.236 | 0.3815 | 0.431 | 0.2327 | 0.2329 |
| Error ext. RMS (m/s) | 0.3864 | 0.4505 | 11.1633 | 11.2665 | 0.7193 | 0.8223 | 9.9203 | 12.3757 |
| Energía Total (J) | 0.0043 | 0.0028 | 0.0086 | 0.0063 | 0.0059 | 0.0086 | 0.008 | 0.0069 |
| Duración (seg.) | 18.9884 | 17.7119 | 25.9872 | 11.266 | 17.732 | 19.5 | 23.9 | 24.682 |
| | **Usuario 3** | | | | **Usuario 4** | | | |
| Velocidad RMS (m/s) | 0.0166 | 0.017 | 0.0269 | 0.0223 | 0.01688 | 0.0167 | 0.0237 | 0.0237 |
| Fuerza RMS (N) | 0.1985 | 0.2084 | 0.25 | 0.236 | 0.3815 | 0.431 | 0.2327 | 0.2329 |
| Error ext. RMS (m/s) | 0.3864 | 0.4505 | 11.1633 | 11.2665 | 0.7193 | 0.8223 | 9.9203 | 12.3757 |
| Energía Total (J) | 0.0043 | 0.0028 | 0.0086 | 0.0063 | 0.0059 | 0.0086 | 0.008 | 0.0069 |
| Duración (seg.) | 18.9884 | 17.7119 | 25.9872 | 11.266 | 17.732 | 19.5 | 23.9 | 24.682 |
| | **Usuario 5** | | | | **Usuario 6** | | | |
| Velocidad RMS (m/s) | 0.0166 | 0.017 | 0.0269 | 0.0223 | 0.01688 | 0.0167 | 0.0237 | 0.0237 |
| Fuerza RMS (N) | 0.1985 | 0.2084 | 0.25 | 0.236 | 0.3815 | 0.431 | 0.2327 | 0.2329 |
| Error ext. RMS (m/s) | 0.3864 | 0.4505 | 11.1633 | 11.2665 | 0.7193 | 0.8223 | 9.9203 | 12.3757 |
| Energía Total (J) | 0.0043 | 0.0028 | 0.0086 | 0.0063 | 0.0059 | 0.0086 | 0.008 | 0.0069 |
| Duración (seg.) | 18.9884 | 17.7119 | 25.9872 | 11.266 | 17.732 | 19.5 | 23.9 | 24.682 |
| | **Usuario 7** | | | | **Usuario 8** | | | |
| Velocidad RMS (m/s) | 0.0166 | 0.017 | 0.0269 | 0.0223 | 0.01688 | 0.0167 | 0.0237 | 0.0237 |
| Fuerza RMS (N) | 0.1985 | 0.2084 | 0.25 | 0.236 | 0.3815 | 0.431 | 0.2327 | 0.2329 |
| Error ext. RMS (m/s) | 0.3864 | 0.4505 | 11.1633 | 11.2665 | 0.7193 | 0.8223 | 9.9203 | 12.3757 |
| Energía Total (J) | 0.0043 | 0.0028 | 0.0086 | 0.0063 | 0.0059 | 0.0086 | 0.008 | 0.0069 |
| Duración (seg.) | 18.9884 | 17.7119 | 25.9872 | 11.266 | 17.732 | 19.5 | 23.9 | 24.682 |
| | **Usuario 9** | | | | **Usuario 10** | | | |
| Velocidad RMS (m/s) | 0.0166 | 0.017 | 0.0269 | 0.0223 | 0.01688 | 0.0167 | 0.0237 | 0.0237 |
| Fuerza RMS (N) | 0.1985 | 0.2084 | 0.25 | 0.236 | 0.3815 | 0.431 | 0.2327 | 0.2329 |
| Error ext. RMS (m/s) | 0.3864 | 0.4505 | 11.1633 | 11.2665 | 0.7193 | 0.8223 | 9.9203 | 12.3757 |
| Energía Total (J) | 0.0043 | 0.0028 | 0.0086 | 0.0063 | 0.0059 | 0.0086 | 0.008 | 0.0069 |
| Duración (seg.) | 18.9884 | 17.7119 | 25.9872 | 11.266 | 17.732 | 19.5 | 23.9 | 24.682 |
| | **Usuario 11** | | | | | | | |
| Velocidad RMS (m/s) | 0.0166 | 0.017 | 0.0269 | 0.0223 | | | | |
| Fuerza RMS (N) | 0.1985 | 0.2084 | 0.25 | 0.236 | | | | |
| Error ext. RMS (m/s) | 0.3864 | 0.4505 | 11.1633 | 11.2665 | | | | |
| Energía Total (J) | 0.0043 | 0.0028 | 0.0086 | 0.0063 | | | | |
| Duración (seg.) | 18.9884 | 17.7119 | 25.9872 | 11.266 | | | | |

Tabla 4.11: Índices de desempeño de 11 voluntarios en el nivel 1 de la plataforma.

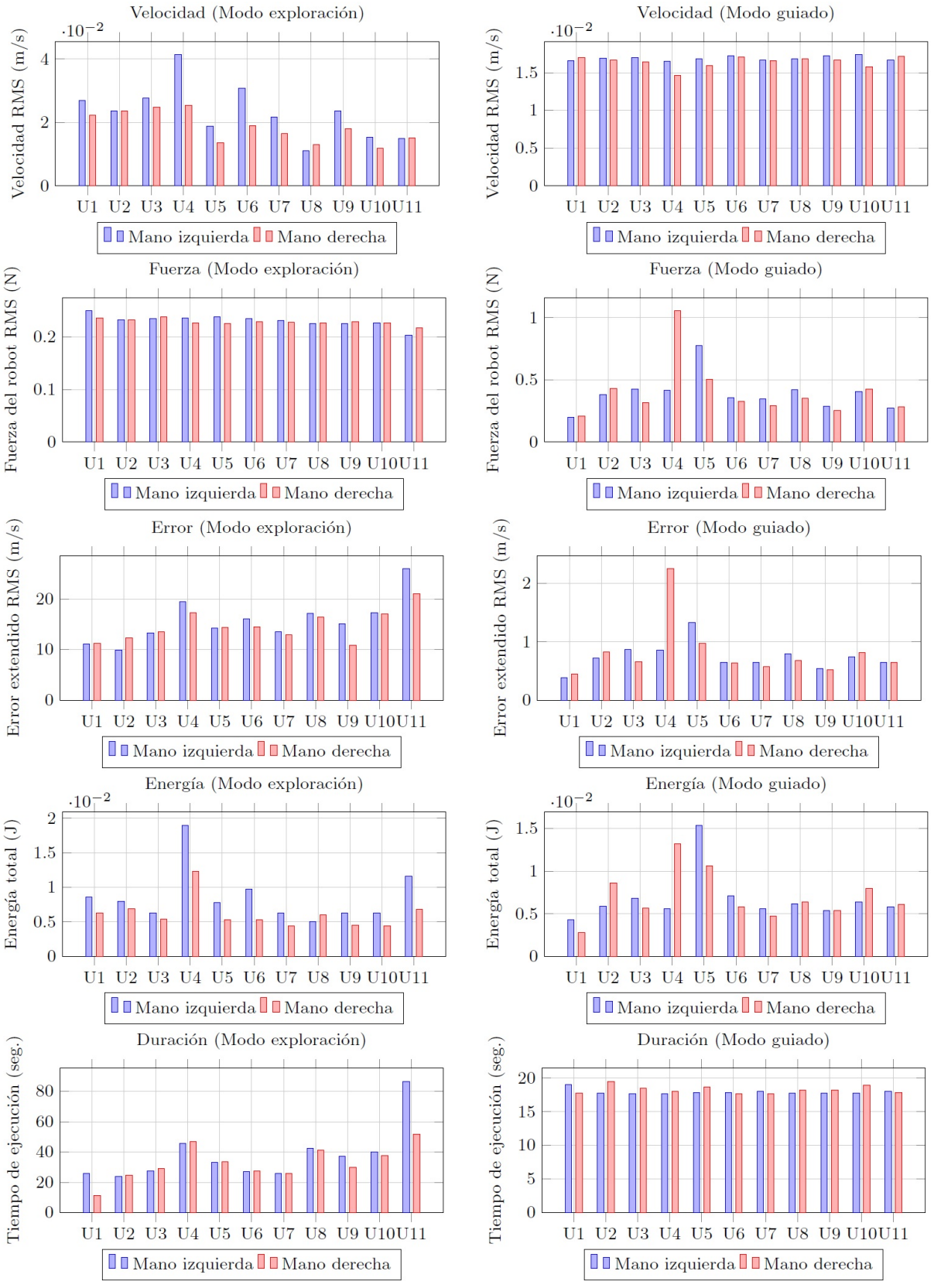



Figura 4.18: Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 1.

### 4.4.7. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 2 de la plataforma.

Se midió el desempeño de los usuarios en el nivel 2 mediante métricas descritas anteriormente en la Tabla 4.1. Se registraron los resultados de cada uno de los voluntarios, donde se muestra la información obtenida de los diferentes modos de interacción de la plataforma (Tabla 4.12) y para facilitar la comparación de la información se utilizaron algunas gráficas de barras (Figura 4.19).

| Nivel 2 | Modo guiado | | Modo exploración | | Modo guiado | | Modo exploración | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der |
| **Parámetros** | **Usuario 1** | | | | **Usuario 2** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0166 | 0,0163 | 0,027 | 0,0201 | 0,01653 | 0,0168 | 0,0405 | 0,0291 |
| Fuerza RMS | 0,1682 | 0,2583 | 0,2255 | 0,2014 | 0,3244 | 0,3562 | 0,2206 | 0,2235 |
| Error extendido RMS | 0,3864 | 0,5623 | 14,644 | 13,485 | 0,6209 | 0,7124 | 12,9817 | 12,3907 |
| Energía Total | 0,0024 | 0,005 | 0,0095 | 0,0055 | 0,0045 | 0,0056 | 0,014 | 0,0111 |
| Duración | 20,603 | 20,603 | 30,5791 | 30,337 | 20,563 | 20,563 | 27,065 | 27,053 |
| | **Usuario 3** | | | | **Usuario 4** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0168 | 0,0164 | 0,0242 | 0,0211 | 0,01699 | 0,0167 | 0,0537 | 0,02877 |
| Fuerza RMS | 0,3605 | 0,2946 | 0,2015 | 0,215 | 0,4496 | 0,431 | 0,2399 | 0,2269 |
| Error extendido RMS | 0,6807 | 0,5846 | 14,754 | 15,0964 | 1,0438 | 0,8506 | 18,117 | 12,1403 |
| Energía Total | 0,0057 | 0,0055 | 0,0059 | 0,0058 | 0,009 | 0,0082 | 0,0197 | 0,0117 |
| Duración | 20,679 | 20,679 | 30,419 | 30,712 | 20,713 | 20,713 | 36,395 | 36,705 |
| | **Usuario 5** | | | | **Usuario 6** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0163 | 0,0158 | 0,0226 | 0,0152 | 0,0172 | 0,0167 | 0,034 | 0,0237 |
| Fuerza RMS | 0,636 | 0,4721 | 0,2356 | 0,2276 | 0,3165 | 0,2792 | 0,2203 | 0,221 |
| Error extendido RMS | 1,1048 | 0,9 | 17,9917 | 16,922 | 0,5869 | 0,5598 | 17,941 | 17,204 |
| Energía Total | 0,01322 | 0,0096 | 0,0106 | 0,0052 | 0,0071 | 0,0056 | 0,0157 | 0,0102 |
| Duración | 20,745 | 20,745 | 40,211 | 40,013 | 20,647 | 20,647 | 46,835 | 46,981 |
| | **Usuario 7** | | | | **Usuario 8** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0164 | 0,0162 | 0,018 | 0,017 | 0,0164 | 0,0166 | 0,0175 | 0,0156 |
| Fuerza RMS | 0,3981 | 0,3025 | 0,221 | 0,2177 | 0,4029 | 0,3688 | 0,2114 | 0,2098 |
| Error extendido RMS | 0,7117 | 0,5925 | 14,912 | 15,14 | 0,7549 | 0,7149 | 14,7101 | 14,7057 |
| Energía Total | 0,0087 | 0,0068 | 0,0057 | 0,0057 | 0,007 | 0,0081 | 0,0071 | 0,0061 |
| Duración | 20,651 | 20,651 | 31,945 | 31,953 | 20,645 | 20,645 | 34.85 | 34,842 |
| | **Usuario 9** | | | | **Usuario 10** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0166 | 0,0163 | 0,0179 | 0,0176 | 0,0172 | 0,0163 | 0,0277 | 0,0166 |
| Fuerza RMS | 0,3018 | 0,1932 | 0,2151 | 0,219 | 0,5452 | 0,3362 | 0,2206 | 0,2156 |
| Error extendido RMS | 0,5283 | 0,3727 | 14,75 | 14,693 | 0,9814 | 0,6451 | 16,633 | 15,914 |
| Energía Total | 0,0069 | 0,0039 | 0,0056 | 0,0053 | 0,0106 | 0,0067 | 0,0121 | 0,00577 |
| Duración | 20,607 | 20,607 | 34,69 | 34,162 | 20.609 | 20,609 | 40,5 | 42,83 |
| | **Usuario 11** | | | | | | | |
| Velocidad RMS | 0,0164 | 0,0166 | 0,0132 | 0,0152 | | | | |
| Fuerza RMS | 0,2706 | 0,3326 | 0,1887 | 0,2045 | | | | |
| Error extendido RMS | 0,585 | 0,6218 | 24,288 | 14,798 | | | | |
| Energía Total | 0,0059 | 0,0074 | 0,0068 | 0,0055 | | | | |
| Duración | 20,639 | 20,639 | 65,105 | 34,584 | | | | |

Tabla 4.12: Índices de desempeño de 11 voluntarios en el nivel 2 de la plataforma.

Figura 4.19: Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 2.

### 4.4.8. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 3 de la plataforma.

Se midió el desempeño de los usuarios en el nivel 3 mediante métricas descritas anteriormente en la Tabla 4.1. Se registraron los resultados de cada uno de los voluntarios, donde se muestra la información obtenida de los diferentes modos de interacción de la plataforma (Tabla 4.13) y para facilitar la comparación de la información se utilizaron algunas gráficas de barras (Figura 4.20).

| Nivel 3 | Modo guiado | | Modo exploración | | Modo guiado | | Modo exploración | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der |
| **Parámetros** | **Usuario 1** | | | | **Usuario 2** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0164 | 0,0161 | 0,0309 | 0,0204 | 0,0166 | 0,0172 | 0,0328 | 0,0288 |
| Fuerza RMS | 0,135 | 0,3014 | 0,2652 | 0,2088 | 0,3146 | 0,4629 | 0,2357 | 0,245 |
| Error extendido RMS | 0,2807 | 0,6779 | 30,572 | 29,108 | 0,6234 | 0,9383 | 23,45 | 20,953 |
| Energía Total | 0,0022 | 0,0054 | 0,0148 | 0,0062 | 0,0046 | 0,0065 | 0,0122 | 0,0084 |
| Duración | 20,709 | 20,709 | 58,808 | 48,38 | 20,469 | 20,469 | 40,141 | 39,5 |
| | **Usuario 3** | | | | **Usuario 4** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0172 | 0,0165 | 0,0212 | 0,021 | 0,0169 | 0,0167 | 0,0356 | 0,0268 |
| Fuerza RMS | 0,4045 | 0,3266 | 0,2427 | 0,2379 | 0,5116 | 0,545 | 0,2311 | 0,2352 |
| Error extendido RMS | 0,8229 | 0,6798 | 22,267 | 19,94 | 1,0972 | 1,003 | 31,4405 | 29,897 |
| Energía Total | 0,0067 | 0,0051 | 0,0062 | 0,0046 | 0,0101 | 0,0076 | 0,0245 | 0,0203 |
| Duración | 20,595 | 20,595 | 41,486 | 41,268 | 20,765 | 20,765 | 84,353 | 89,827 |
| | **Usuario 5** | | | | **Usuario 6** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0159 | 0,0156 | 0,0208 | 0,0169 | 0,0591 | 0,0165 | 0,0385 | 0,0181 |
| Fuerza RMS | 0,652 | 0,545 | 0,23 | 0,2201 | 0,6353 | 0,2593 | 0,205 | 0,274 |
| Error extendido RMS | 1,1151 | 1,0264 | 21,741 | 20,247 | 1,2406 | 0,4817 | 27,152 | 11,825 |
| Energía Total | 0,0084 | 0,0078 | 0,0045 | 0,0035 | 0,0666 | 0,0043 | 0,0142 | 0,0048 |
| Duración | 20,715 | 20,715 | 31,101 | 30,883 | 20,619 | 20,619 | 50,919 | 51,189 |
| | **Usuario 7** | | | | **Usuario 8** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0168 | 0,0162 | 0,018 | 0,0154 | 0,0162 | 0,0162 | 0,01406 | 0,0138 |
| Fuerza RMS | 0,3802 | 0,351 | 0,217 | 0,2195 | 0,3803 | 0,3585 | 0,2438 | 0,2385 |
| Error extendido RMS | 0,681 | 0,6779 | 19,207 | 19,86 | 0,7092 | 0,6675 | 21,149 | 21,35 |
| Energía Total | 0,0049 | 0,0053 | 0,0037 | 0,0026 | 0,0049 | 0,0052 | 0,0045 | 0,0049 |
| Duración | 20,603 | 20,603 | 31,465 | 31,223 | 20,641 | 20,641 | 46,531 | 46,487 |
| | **Usuario 9** | | | | **Usuario 10** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0165 | 0,0164 | 0,0195 | 0,0173 | 0,0169 | 0,0164 | 0,0176 | 0,0144 |
| Fuerza RMS | 0,246 | 0,235 | 0,2555 | 0,2435 | 0,5435 | 0,4949 | 0,2491 | 0,2418 |
| Error extendido RMS | 0,4366 | 0,4509 | 22,224 | 18,802 | 1,0087 | 0,9755 | 21,062 | 21,511 |
| Energía Total | 0,0034 | 0,0033 | 0,0084 | 0,0045 | 0,0086 | 0,0079 | 0,0065 | 0,00415 |
| Duración | 20,575 | 20,575 | 56,108 | 38,848 | 20,609 | 20,651 | 43,107 | 44,932 |
| | **Usuario 11** | | | | | | | |
| Velocidad RMS | 0,0163 | 0,0161 | 0,0121 | 0,0151 | | | | |
| Fuerza RMS | 0,3208 | 0,3394 | 0,2142 | 0,2123 | | | | |
| Error extendido RMS | 0,6634 | 0,6682 | 24,407 | 22,757 | | | | |
| Energía Total | 0,0057 | 0,0055 | 0,005 | 0,0037 | | | | |
| Duración | 20,657 | 20,657 | 76,043 | 42,955 | | | | |

Tabla 4.13: Índices de desempeño de 11 voluntarios en el nivel 3 de la plataforma.

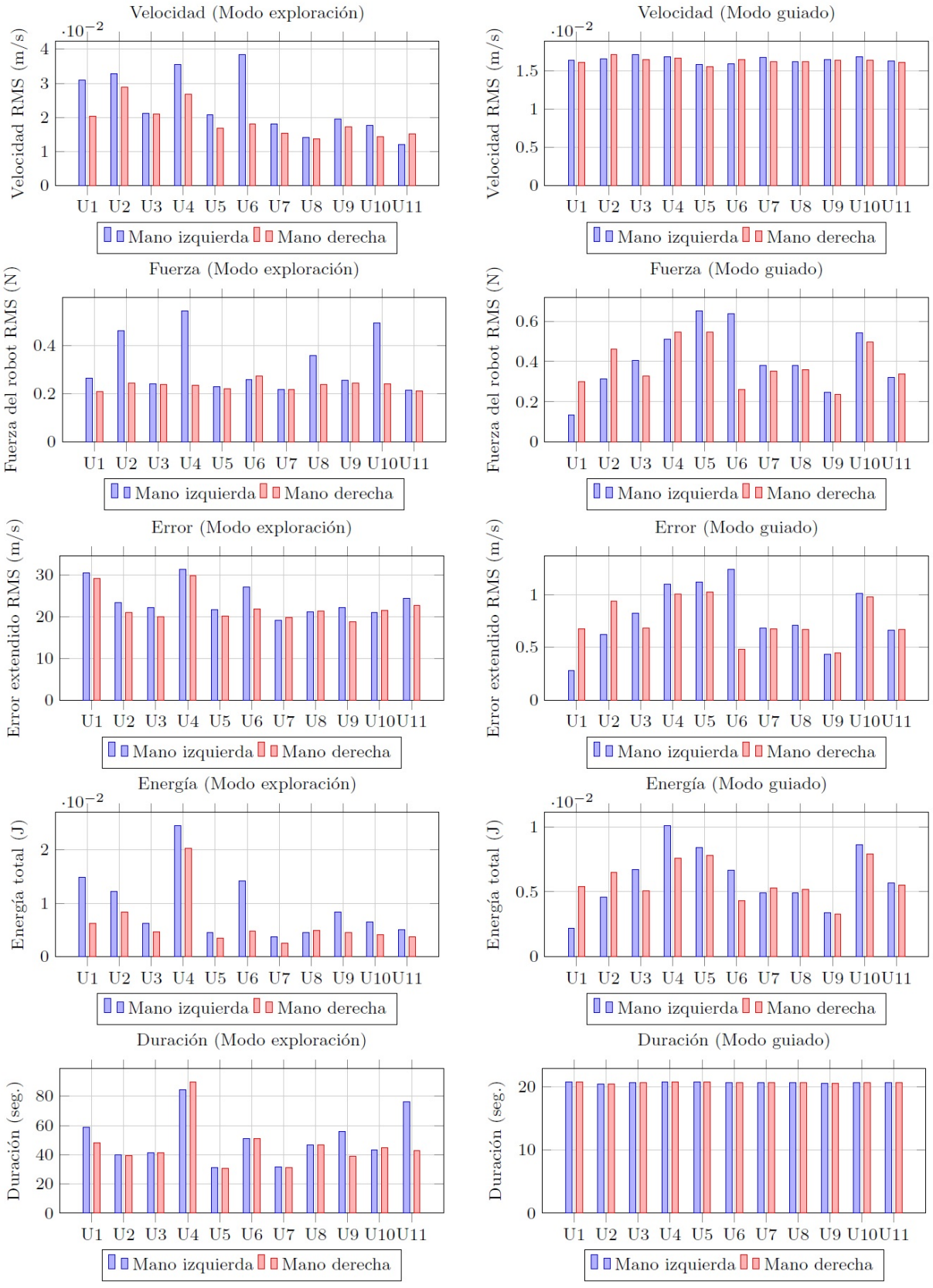



Figura 4.20: Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 3.

### 4.4.9. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 4 de la plataforma.

Se midió el desempeño de los usuarios en el nivel 4 mediante métricas descritas anteriormente en la Tabla 4.1. Se registraron los resultados de cada uno de los voluntarios, donde se muestra la información obtenida de los diferentes modos de interacción de la plataforma (Tabla 4.14) y para facilitar la comparación de la información se utilizaron algunas gráficas de barras (Figura 4.21).

| Nivel 4 | Modo guiado | | Modo exploración | | Modo guiado | | Modo exploración | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der |
| Parámetros | **Usuario 1** | | | | **Usuario 2** | | | |
| Velocidad RMS | 0,017 | 0,0167 | 0,0411 | 0,0341 | 0,01644 | 0,0166 | 0,0418 | 0,0444 |
| Fuerza RMS | 0,1989 | 0,2553 | 0,2788 | 0,2181 | 0,419 | 0,421 | 0,2519 | 0,318 |
| Error extendido RMS | 0,4378 | 0,5403 | 30,078 | 22.651 | 0,8436 | 0,8781 | 25,649 | 29,48 |
| Energía Total | 0,0028 | 0,0064 | 0,0162 | 0,0098 | 0,0125 | 0,0062 | 0,024 | 0,0292 |
| Duración | 26,733 | 26,793 | 48,342 | 26,813 | 27,742 | 26,619 | 46,573 | 43,791 |
| | **Usuario 3** | | | | **Usuario 4** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0174 | 0,0168 | 0,0229 | 0,0182 | 0,01753 | 0,0175 | 0,0486 | 0,0437 |
| Fuerza RMS | 0,3215 | 0,296 | 0,2124 | 0,2217 | 0,4901 | 0,515 | 0,235 | 0,238 |
| Error extendido RMS | 0,6541 | 0,6673 | 25,52 | 32,502 | 0,9644 | 0,9755 | 29,293 | 28,318 |
| Energía Total | 0,0069 | 0,0078 | 0,0141 | 0,0101 | 0,0119 | 0,0113 | 0,04 | 0,0625 |
| Duración | 26,743 | 26,743 | 84,64 | 84,944 | 26,823 | 26.777 | 92,78 | 133,05 |
| | **Usuario 5** | | | | **Usuario 6** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0166 | 0,0163 | 0,0247 | 0,0164 | 0,0171 | 0,0167 | 0,0424 | 0,0211 |
| Fuerza RMS | 0,733 | 0,632 | 0,2289 | 0,2365 | 0,2854 | 0,282 | 0,2408 | 0,2131 |
| Error extendido RMS | 1,2708 | 1,1536 | 26,795 | 23,212 | 0,5327 | 0,5835 | 24,129 | 25,16 |
| Energía Total | 0,0204 | 0,0173 | 0,0139 | 0,0091 | 0,0073 | 0,0069 | 0,0348 | 0,0157 |
| Duración | 26,767 | 26,859 | 55,053 | 54,707 | 26.791 | 26,755 | 95,546 | 99,164 |
| | **Usuario 7** | | | | **Usuario 8** | | | |
| Velocidad RMS | 0,017 | 0,0168 | 0,023 | 0,0166 | 0,0168 | 0,0168 | 0,0169 | 0,0208 |
| Fuerza RMS | 0,3695 | 0,3812 | 0,229 | 0,2312 | 0,4153 | 0,3832 | 0,2341 | 0,231 |
| Error extendido RMS | 0,7123 | 0,798 | 26,82 | 26,814 | 0,803 | 0,735 | 26,815 | 26,389 |
| Energía Total | 0,0062 | 0,009 | 0,0119 | 0,0075 | 0,0074 | 0,0093 | 0,0087 | 0,0116 |
| Duración | 26,745 | 26,795 | 54,713 | 56,866 | 26,781 | 26,781 | 54,56 | 54.58 |
| | **Usuario 9** | | | | **Usuario 10** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0171 | 0,0168 | 0,0204 | 0,0202 | 0,017 | 0,0165 | 0,0202 | 0,0138 |
| Fuerza RMS | 0,2378 | 0,2052 | 0,244 | 0,25 | 0,5892 | 0,4913 | 0,2457 | 0,2528 |
| Error extendido RMS | 0,4365 | 0,4051 | 18,375 | 17.789 | 1,0743 | 0,986 | 24,927 | 23,057 |
| Energía Total | 0,0064 | 0,0052 | 0,0087 | 0,0067 | 0,0144 | 0,0129 | 0,0112 | 0,0079 |
| Duración | 26,795 | 26,767 | 40,103 | 38,06 | 27 | 26,835 | 53,72 | 58,433 |
| | **Usuario 11** | | | | | | | |
| Velocidad RMS | 0,0167 | 0,0167 | 0,0103 | 0,0151 | | | | |
| Fuerza RMS | 0,2681 | 0,3296 | 0,2158 | 0,2137 | | | | |
| Error extendido RMS | 0,565 | 0,6667 | 28,498 | 30,252 | | | | |
| Energía Total | 0,0074 | 0,0092 | 0,0089 | 0,0105 | | | | |
| Duración | 26,789 | 26,789 | 127,03 | 77,848 | | | | |

Tabla 4.14: Índices de desempeño de 11 voluntarios en el nivel 4 de la plataforma.

Figura 4.21: Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 4.

### 4.4.10. Desempeño cuantitativo de los voluntarios en el nivel 5 de la plataforma.

Se midió el desempeño de los usuarios en el nivel 5 mediante métricas descritas anteriormente en la Tabla 4.1. Se registraron los resultados de cada uno de los voluntarios, donde se muestra la información obtenida de los diferentes modos de interacción de la plataforma (Tabla 4.15) y para facilitar la comparación de la información se utilizaron algunas gráficas de barras (Figura 4.22).

| Nivel 5 | Modo guiado | | Modo exploración | | Modo guiado | | Modo exploración | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der | Mano izq | Mano der |
| **Parámetros** | **Usuario 1** | | | | **Usuario 2** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0174 | 0,0173 | 0,043 | 0,0595 | 0,0174 | 0,0175 | 0,054 | 0,0575 |
| Fuerza RMS | 0,1714 | 0,2616 | 0,2426 | 0,2418 | 0,3669 | 0,5519 | 0,247 | 0,3285 |
| Error extendido RMS | 0,3572 | 0,5803 | 17.519 | 28,751 | 0,7371 | 1,1272 | 23,946 | 29,122 |
| Energía Total | 0,0051 | 0,0092 | 0,0089 | 0,0068 | 0,0144 | 0,0196 | 0,0116 | 0,0175 |
| Duración | 40,88 | 40,78 | 30,375 | 14,331 | 40,801 | 40,801 | 24,638 | 24,61 |
| | **Usuario 3** | | | | **Usuario 4** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0175 | 0,0174 | 0,036 | 0,0348 | 0,01725 | 0,0186 | 0,0612 | 0,0517 |
| Fuerza RMS | 0,3608 | 0,2516 | 0,244 | 0,23 | 0,6503 | 0,758 | 0,2317 | 0,231 |
| Error extendido RMS | 0,7056 | 0,5276 | 21,576 | 18,71 | 1,4069 | 2,0921 | 31,1293 | 26,486 |
| Energía Total | 0,0142 | 0,0102 | 0,01 | 0,0067 | 0,0286 | 0,0341 | 0,024 | 0,0208 |
| Duración | 42,837 | 40,773 | 36,113 | 34,796 | 43,843 | 42,821 | 63,368 | 61,769 |
| | **Usuario 5** | | | | **Usuario 6** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0174 | 0,017 | 0,0339 | 0,0243 | 0,01751 | 0,01731 | 0,048 | 0,0334 |
| Fuerza RMS | 0,646 | 0,55 | 0,2198 | 0,224 | 0,3 | 0,2462 | 0,2271 | 0,2296 |
| Error extendido RMS | 1,1457 | 1,01 | 24,279 | 22,206 | 0,5521 | 0,4954 | 25,5474 | 27,6764 |
| Energía Total | 0,0251 | 0,0229 | 0,0147 | 0,0107 | 0,0115 | 0,008 | 0,0209 | 0,013 |
| Duración | 40,809 | 40,729 | 60,67 | 61,8 | 42,85 | 42,78 | 61,78 | 61,81 |
| | **Usuario 7** | | | | **Usuario 8** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0175 | 0,0174 | 0,0233 | 0,0264 | 0,0173 | 0,0174 | 0,021 | 0,0222 |
| Fuerza RMS | 0,37 | 0,2891 | 0,214 | 0,195 | 0,3675 | 0,353 | 0,225 | 0,2181 |
| Error extendido RMS | 0,7038 | 0,5689 | 26,864 | 22,932 | 0,6807 | 0,6942 | 23,874 | 23,5854 |
| Energía Total | 0,0118 | 0,011 | 0,0078 | 0,0073 | 0,0111 | 0,0129 | 0,011 | 0,0112 |
| Duración | 42,74 | 42,73 | 60,5 | 42,763 | 42,79 | 42.765 | 70,53 | 70,512 |
| | **Usuario 9** | | | | **Usuario 10** | | | |
| Velocidad RMS | 0,0177 | 0,0173 | 0,0313 | 0,0291 | 0,0178 | 0,0175 | 0,0259 | 0,0213 |
| Fuerza RMS | 0,2305 | 0,1995 | 0,2472 | 0,2622 | 0,7352 | 0,5262 | 0,2273 | 0,2129 |
| Error extendido RMS | 0,4217 | 0,3948 | 24,4696 | 24,1512 | 1,305 | 1,008 | 23,6119 | 22,9658 |
| Energía Total | 0,0088 | 0,0068 | 0,0075 | 0,0078 | 0,0275 | 0,0209 | 0,0084 | 0,007 |
| Duración | 42,795 | 42,775 | 35,65 | 35,8256 | 42,723 | 42,71 | 54,4833 | 50,987 |
| | **Usuario 11** | | | | | | | |
| Velocidad RMS | 0,0173 | 0,01727 | 0,0159 | 0,0196 | | | | |
| Fuerza RMS | 0,2858 | 0,3722 | 0,2426 | 0,23 | | | | |
| Error extendido RMS | 0,5252 | 0,679 | 21,8118 | 28,68 | | | | |
| Energía Total | 0,0115 | 0,0125 | 0,0064 | 0,0108 | | | | |
| Duración | 42,76 | 42,77 | 84,564 | 56,784 | | | | |

Tabla 4.15: Índices de desempeño de 11 voluntarios en el nivel 5 de la plataforma.

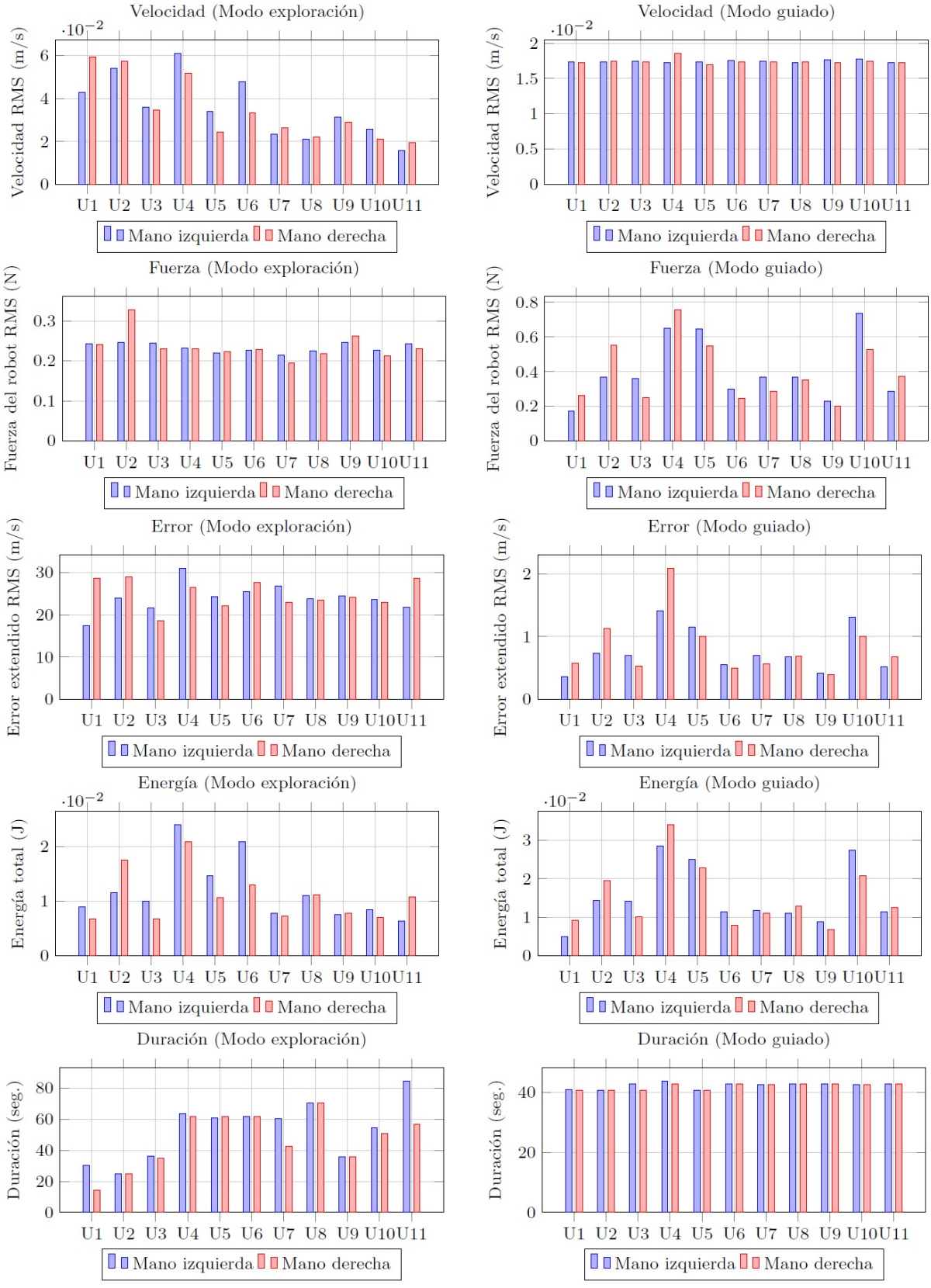



Figura 4.22: Gráficos de barras alusivos a los índices de desempeño de nivel 5.

### 4.4.11. Observaciones y comentarios del experimento con voluntarios

Al analizar los datos y la comparación de las métricas obtenidas de los datos de los 11 voluntarios con el uso de la plataforma bimanual, se puede observar de forma general el comportamiento y desempeño de los usuarios con el uso de la plataforma bimanual, tanto en modo guiado como en modo exploración.

**Observaciones generales del modo exploración.**

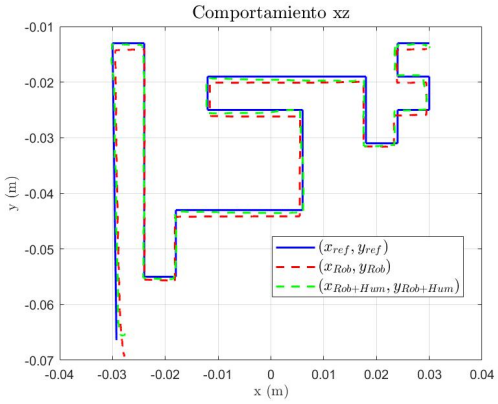
- La velocidad de movimiento de la mano izquierda resulta mayor, dado que la mayoría de los usuarios son diestros; sin embargo, esto conlleva un incremento en el registro de error al utilizar su mano dominante.
- En el registro de fuerza del robot, correspondiente a este modo de operación con compensación únicamente de los efectos provocados por la gravedad, se evidencia un comportamiento prácticamente equivalente al utilizar ambas manos.
- En cuanto al consumo de energía, se observa una relación directamente proporcional con el tiempo de ejecución necesario para completar el nivel, presentando un mejor desempeño al utilizar la mano derecha.

**Observaciones generales del modo guiado.**

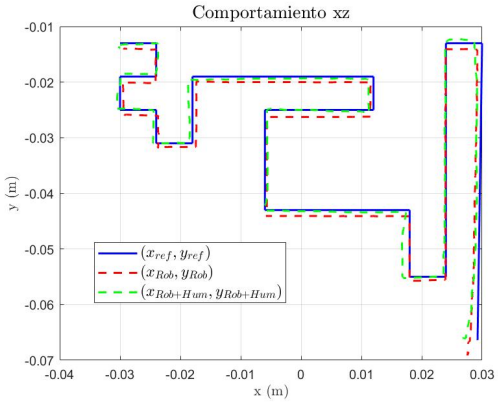
- La velocidad de movimiento y la duración de los niveles en este modo de operación son muy similares para todos los usuarios con ambas manos, lo cual se atribuye al buen desempeño del control durante el uso del dispositivo háptico, a pesar de la incertidumbre generada por las diversas perturbaciones aplicadas por los usuarios.
- La fuerza aplicada por el robot aumenta cuando el usuario muestra oposición al movimiento. En este caso se observa una reducción en la oposición al emplear la mano derecha, lo que se traduce en un menor requerimiento de esfuerzo por parte del robot en ese lado.
- En este modo de operación se observa una relación directa entre tres parámetros: la fuerza ejercida por el robot, el error y la energía total. En este caso, se evidencia un desempeño equilibrado tanto con la mano derecha como con la izquierda, de acuerdo con la percepción del usuario.

### 4.4.12. Nivel 1 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control

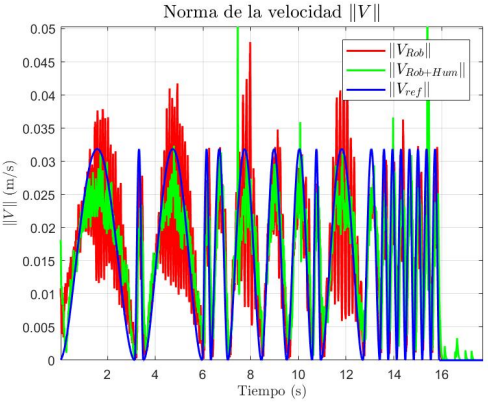
A continuación se muestran las gráficas más relevantes de los datos obtenidos de la plataforma con el modo guiado en el nivel 1 (Figuras 4.23 y 4.24), comparando los datos obtenidos con el robot sin perturbación externa (sin humano en el lazo), los datos del usuario 1 utilizando la plataforma bimanual (con humano en el lazo) y la información de referencia correspondiente al nivel de la plataforma.



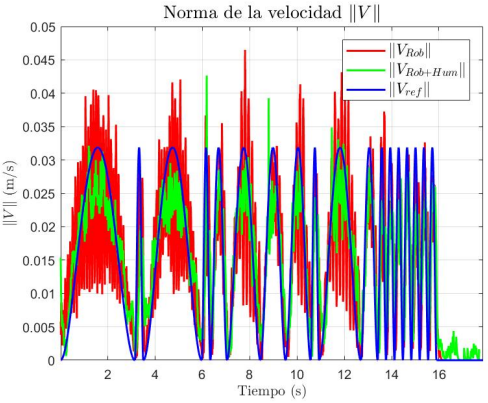

(a) Plano de trabajo con mano izquierda




(b) Plano de trabajo con mano derecha

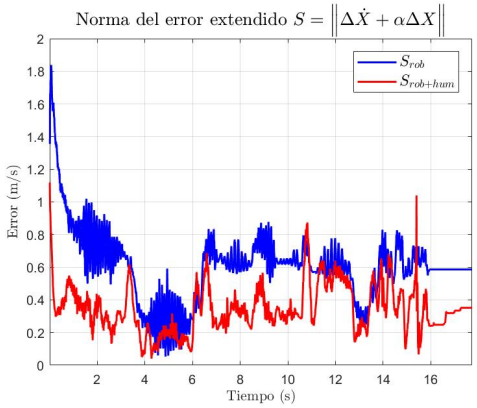



(c) Velocidad de recorrido con mano izquierda

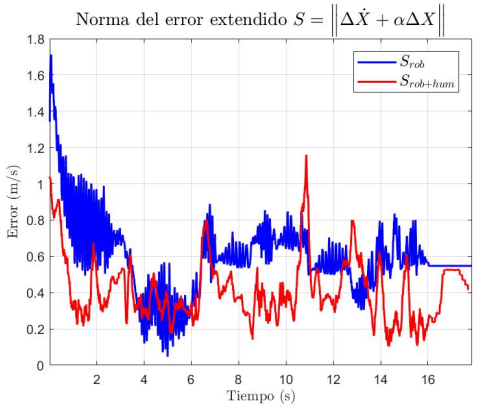



(d) Velocidad de recorrido con mano derecha

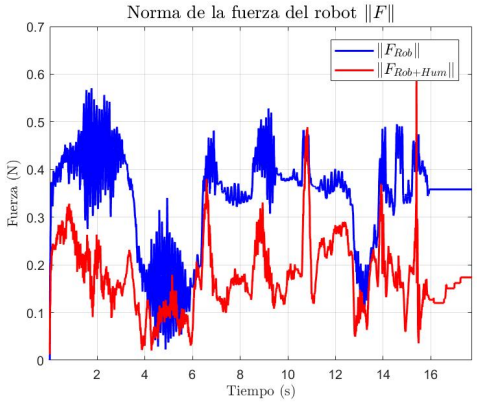
Figura 4.23: Resultado experimental de plataforma nivel 1 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1.



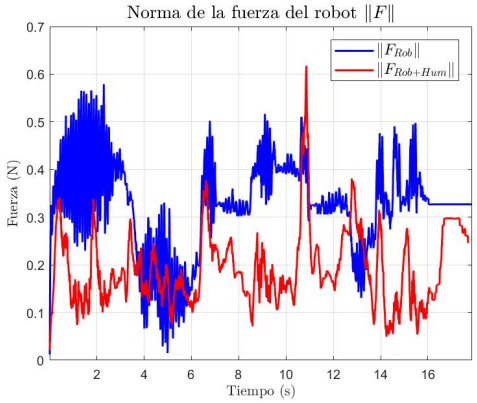

(a) Respuesta del error extendido del nivel 1 con mano izquierda



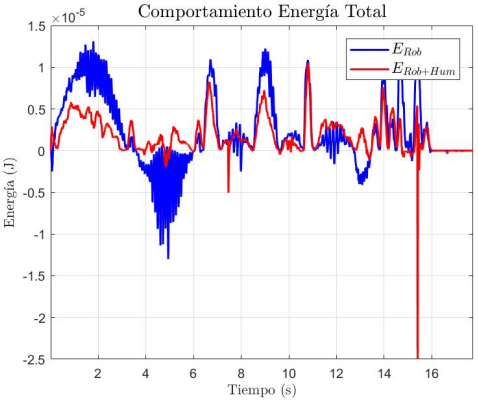

(b) Respuesta del error extendido del nivel 1 con mano derecha



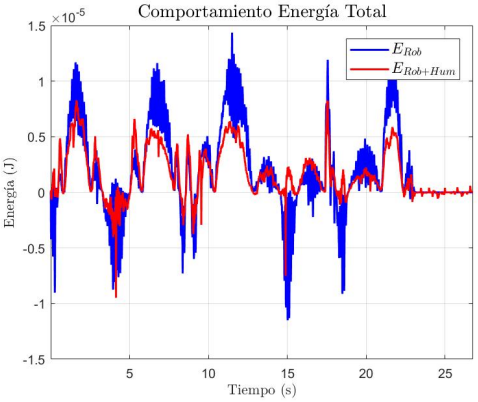

(c) Respuesta de la fuerza del nivel 1 con mano izquierda




(d) Respuesta de la fuerza del nivel 1 con mano derecha




(e) Respuesta de la energía consumida del nivel 1 con mano izquierda

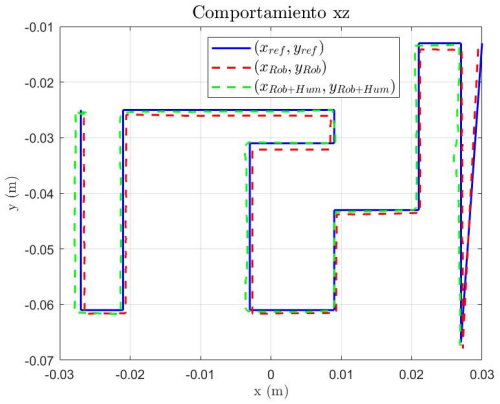



(f) Respuesta de la energía consumida del nivel 1 con mano derecha

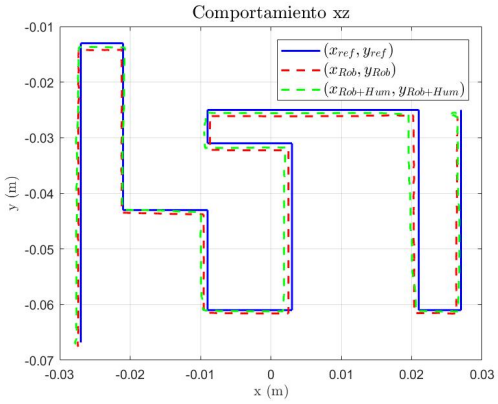
Figura 4.24: Resultado experimental de plataforma nivel 1 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2.

### 4.4.13. Nivel 2 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control

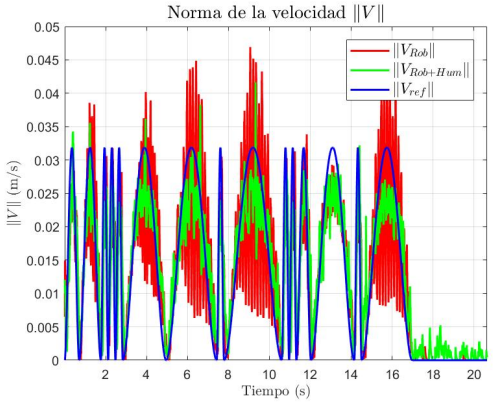
A continuación se muestran las gráficas más relevantes de los datos obtenidos de la plataforma con el modo guiado en el nivel 2 (Figuras 4.25 y 4.26), comparando los datos obtenidos con el robot sin perturbación externa (sin humano en el lazo), los datos del usuario 1 utilizando la plataforma bimanual (con humano en el lazo) y la información de referencia correspondiente al nivel de la plataforma.



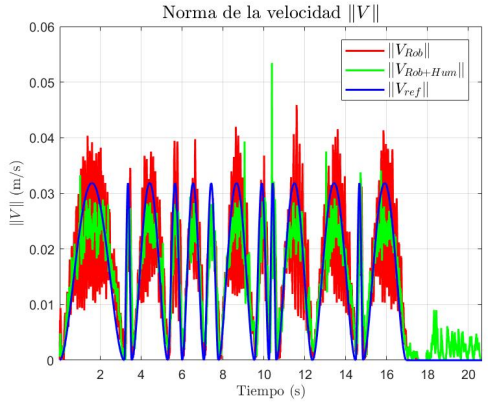

(a) Plano de trabajo con mano izquierda




(b) Plano de trabajo con mano derecha

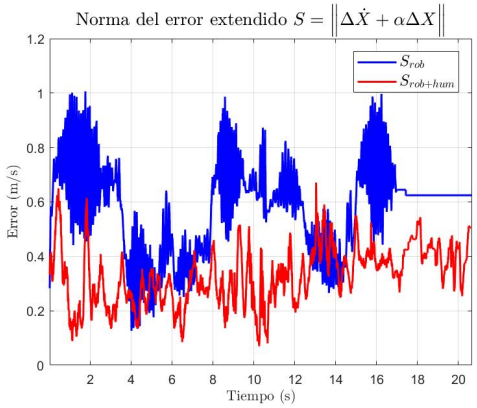



(c) Velocidad de recorrido con mano izquierda

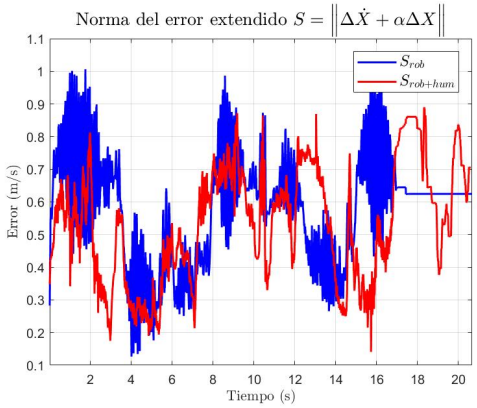



(d) Velocidad de recorrido con mano derecha

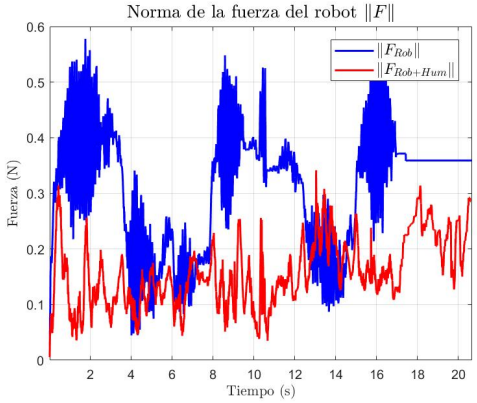
Figura 4.25: Resultado experimental de plataforma nivel 2 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1.



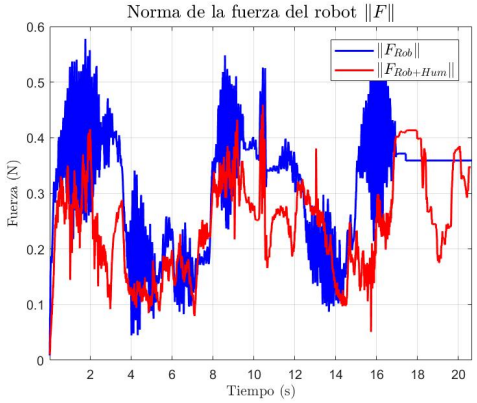

(a) Respuesta del error extendido con mano izquierda



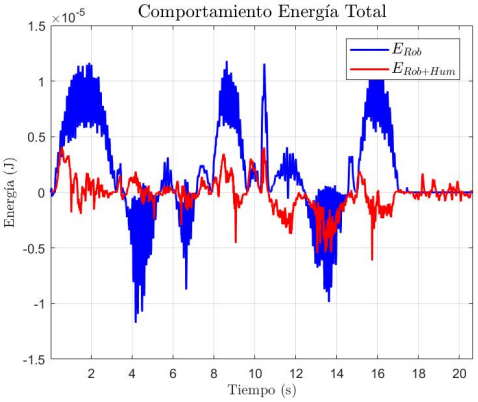

(b) Respuesta del error extendido con mano derecha



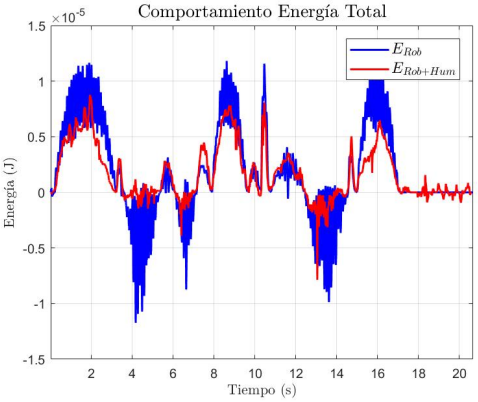

(c) Respuesta de la fuerza con mano izquierda




(d) Respuesta de la fuerza con mano derecha




(e) Respuesta de la energía consumida con mano izquierda

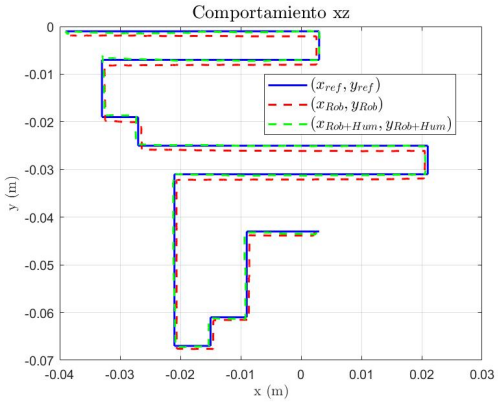



(f) Respuesta de la energía consumida con mano derecha

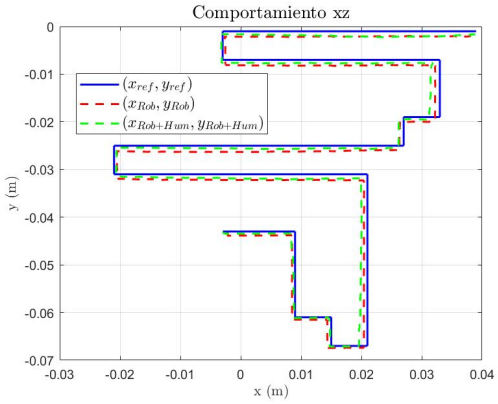
Figura 4.26: Resultado experimental de plataforma nivel 2 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2.

### 4.4.14. Nivel 3 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control

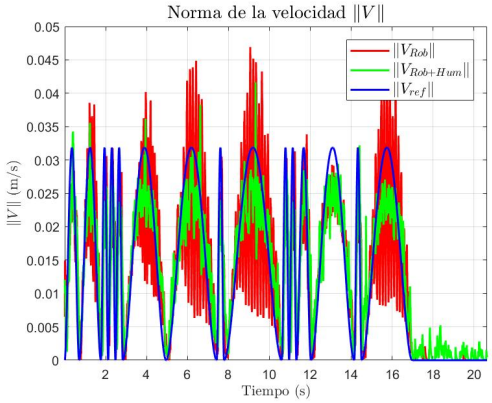
A continuación se muestran las gráficas más relevantes de los datos obtenidos de la plataforma con el modo guiado en el nivel 3 (Figuras 4.27 y 4.28), comparando los datos obtenidos con el robot sin perturbación externa (sin humano en el lazo), los datos del usuario 1 utilizando la plataforma bimanual (con humano en el lazo) y la información de referencia correspondiente al nivel de la plataforma.



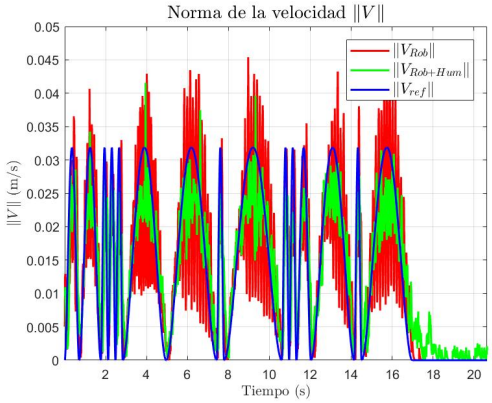

(a) Plano de trabajo con mano izquierda




(b) Plano de trabajo con mano derecha

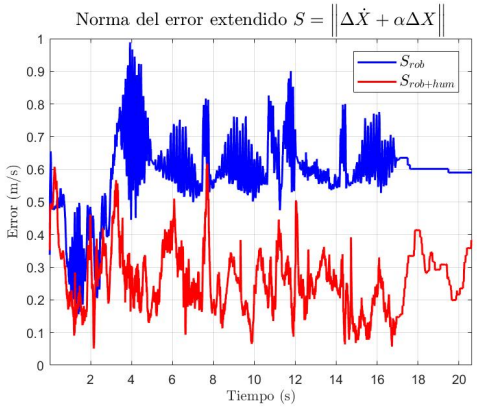



(c) Velocidad de recorrido con mano izquierda

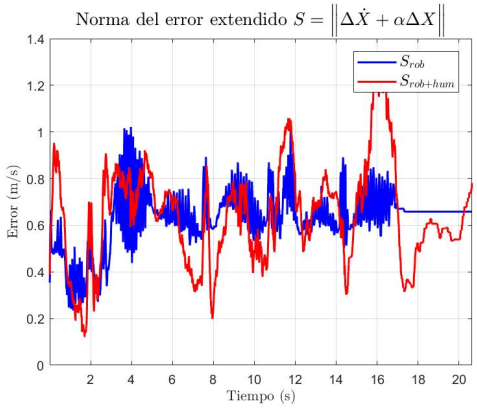



(d) Velocidad de recorrido con mano derecha

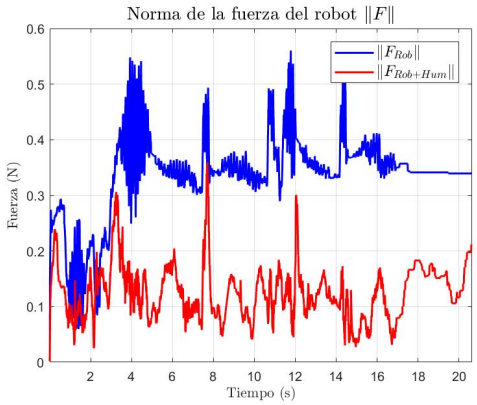
Figura 4.27: Resultado experimental de plataforma nivel 3 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1.



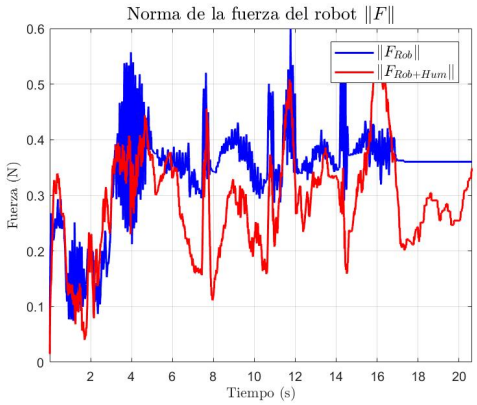

(a) Respuesta del error extendido con mano izquierda



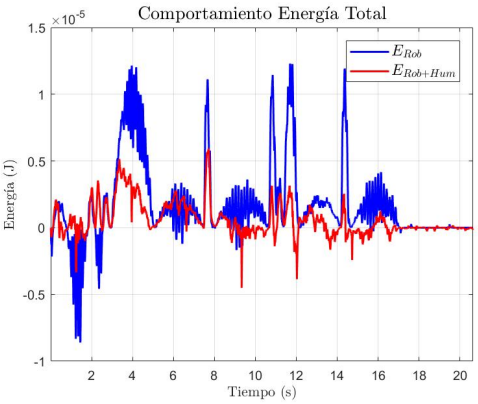

(b) Respuesta del error extendido con mano derecha



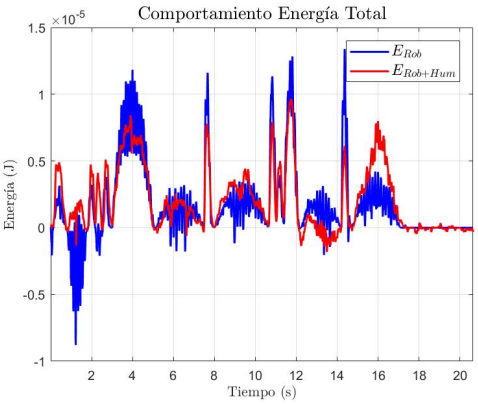

(c) Respuesta de la fuerza con mano izquierda




(d) Respuesta de la fuerza con mano derecha




(e) Respuesta de la energía consumida con mano izquierda

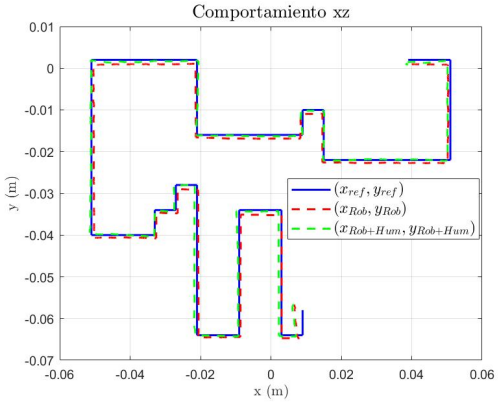



(f) Respuesta de la energía consumida con mano derecha

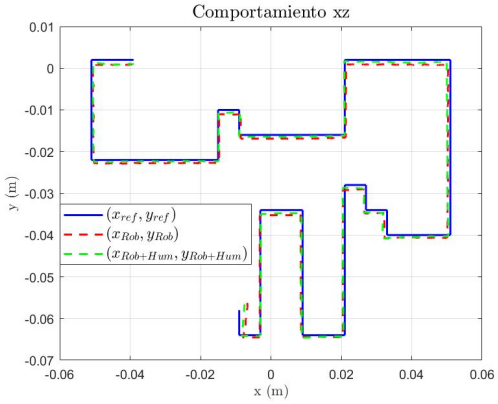
Figura 4.28: Resultado experimental de plataforma nivel 3 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2.

### 4.4.15. Nivel 4 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control

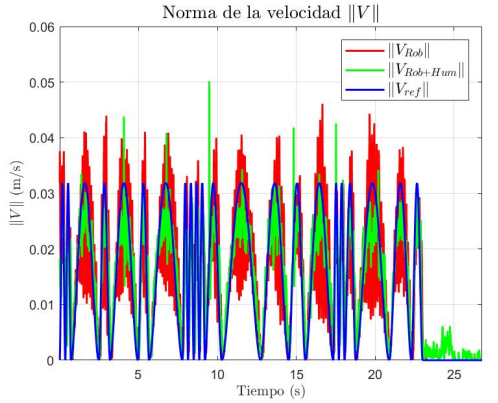
A continuación se muestran las gráficas más relevantes de los datos obtenidos de la plataforma con el modo guiado en el nivel 4 (Figuras 4.29 y 4.30), comparando los datos obtenidos con el robot sin perturbación externa (sin humano en el lazo), los datos del usuario 1 utilizando la plataforma bimanual (con humano en el lazo) y la información de referencia correspondiente al nivel de la plataforma.



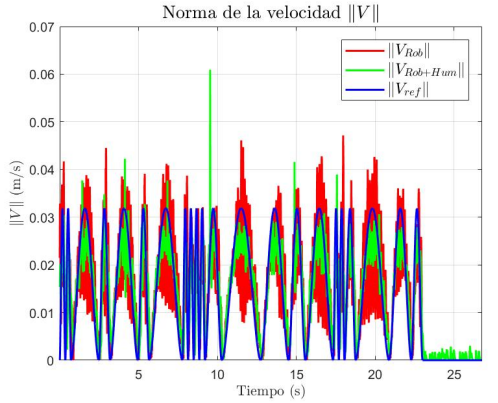

(a) Plano de trabajo con mano izquierda




(b) Plano de trabajo con mano derecha

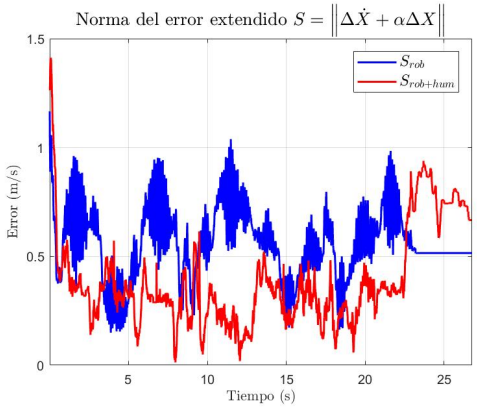



(c) Velocidad de recorrido con mano izquierda

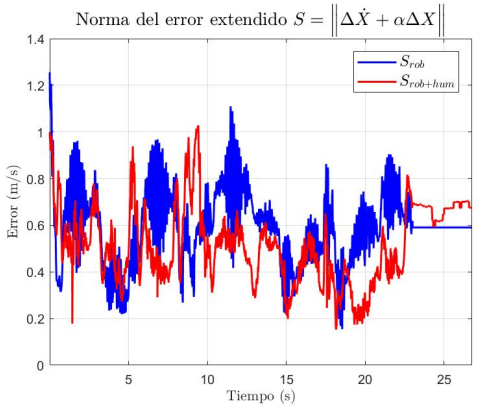



(d) Velocidad de recorrido con mano derecha

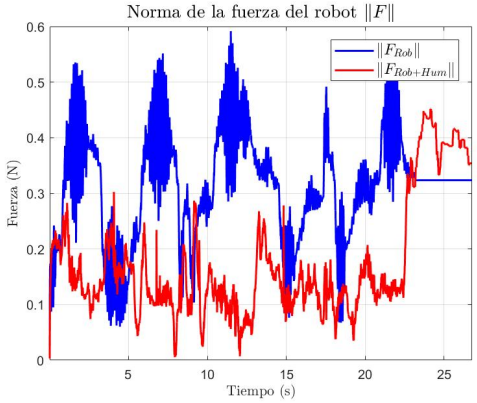
Figura 4.29: Resultado experimental de plataforma nivel 4 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1.



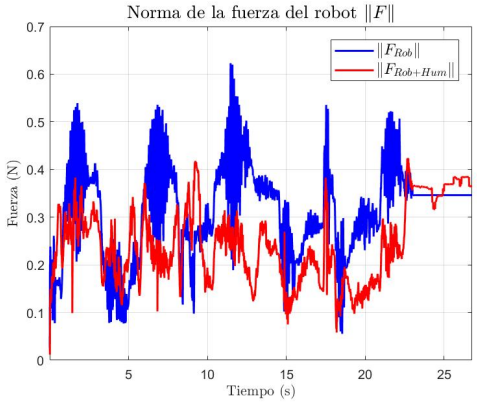

(a) Respuesta del error extendido con mano izquierda



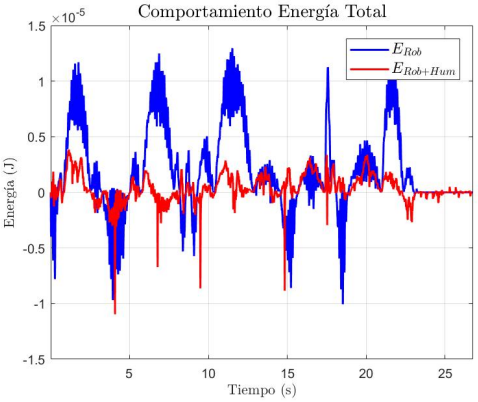

(b) Respuesta del error extendido con mano derecha



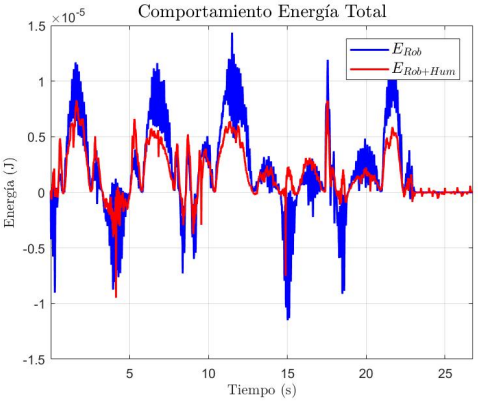

(c) Respuesta de la fuerza con mano izquierda




(d) Respuesta de la fuerza con mano derecha




(e) Respuesta de la energía consumida con mano izquierda

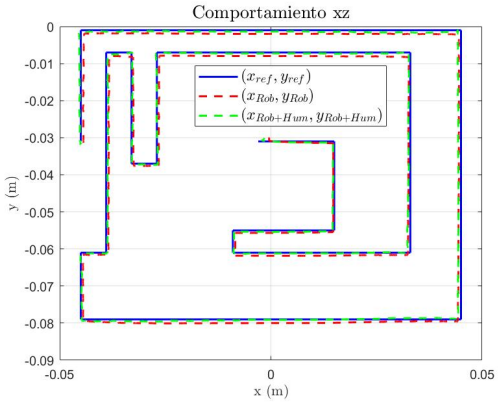



(f) Respuesta de la energía consumida con mano derecha

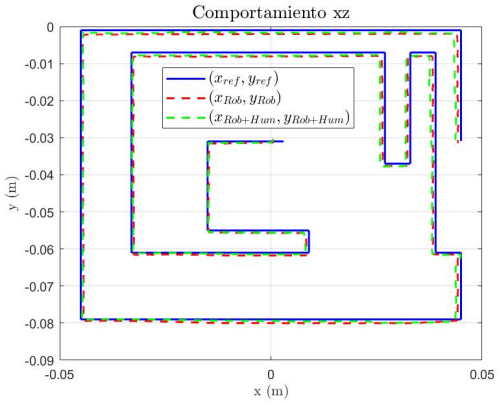
Figura 4.30: Resultado experimental de plataforma nivel 4 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2.

### 4.4.16. Nivel 5 de la plataforma exergaming en movimiento libre y con el humano en el lazo de control

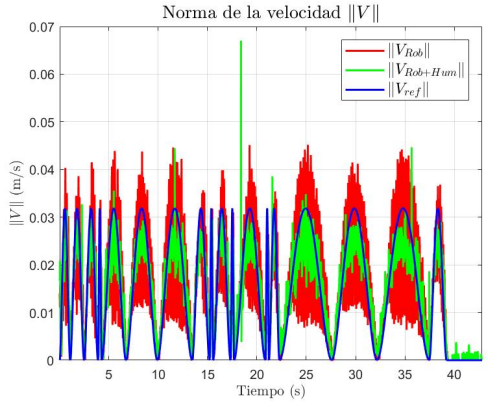
A continuación se muestran las gráficas más relevantes de los datos obtenidos de la plataforma con el modo guiado en el nivel 5 (Figuras 4.31 y 4.32), comparando los datos obtenidos con el robot sin perturbación externa (sin humano en el lazo), los datos del usuario 1 utilizando la plataforma bimanual (con humano en el lazo) y la información de referencia correspondiente al nivel de la plataforma.



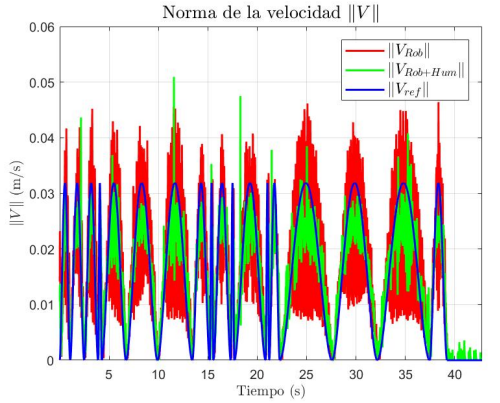

(a) Plano de trabajo con mano izquierda




(b) Plano de trabajo con mano derecha

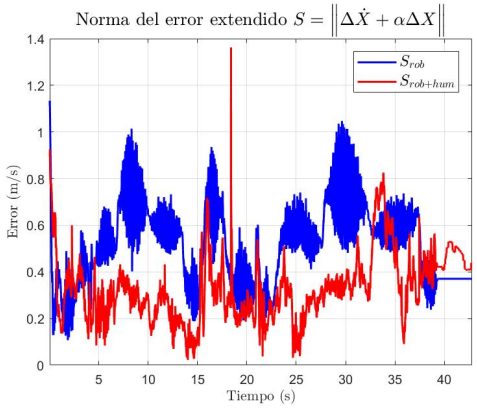



(c) Velocidad de recorrido con mano izquierda

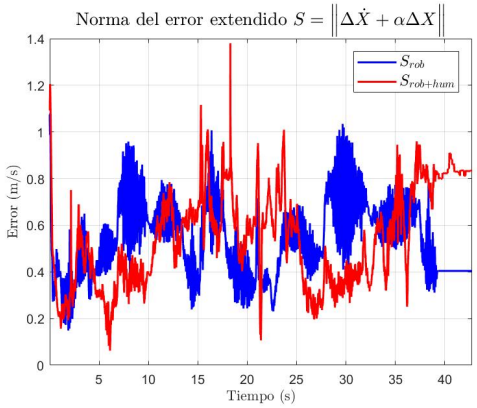



(d) Velocidad de recorrido con mano derecha

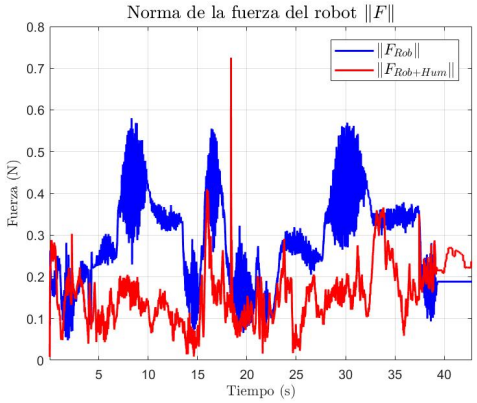
Figura 4.31: Resultado experimental de plataforma nivel 5 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 1.



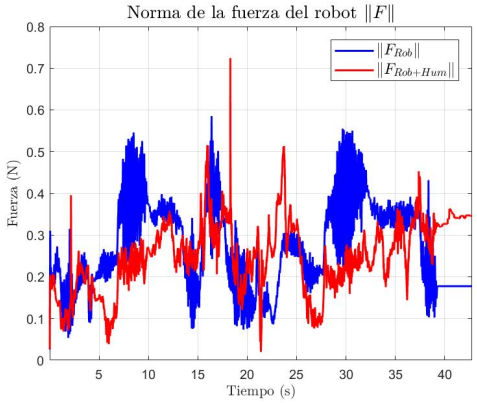

(a) Respuesta del error extendido con mano izquierda



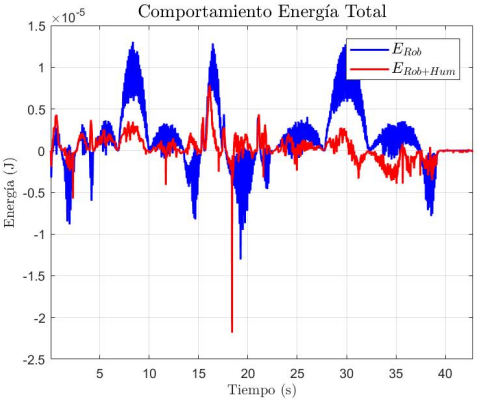

(b) Respuesta del error extendido con mano derecha



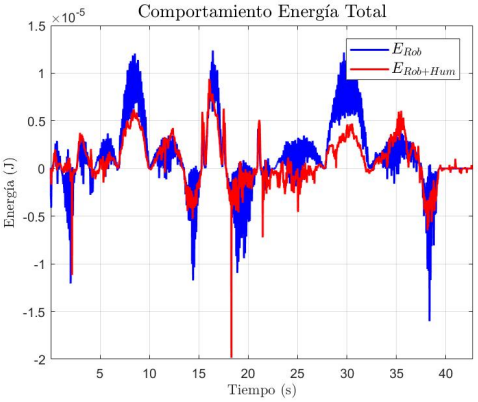

(c) Respuesta de la fuerza con mano izquierda




(d) Respuesta de la fuerza con mano derecha




(e) Respuesta de la energía consumida con mano izquierda




(f) Respuesta de la energía consumida con mano derecha

Figura 4.32: Resultado experimental de plataforma nivel 5 con control por modos deslizantes en modo guiado, parte 2.

### 4.4.17. Observaciones y comentarios de la plataforma con y sin humano en el lazo de control

Al analizar los datos del usuario con el uso de la plataforma bimanual en modo guiado y el comportamiento de la plataforma sin perturbación externa, se pueden observar de forma general algunas características importantes que hay que tomar en cuenta. A continuación se analizan algunas de ellas.

- Al observar el plano de trabajo, se puede observar un adecuado comportamiento de la plataforma con el uso del control por modos deslizantes, tanto con y sin usuario en el lazo de control.
- Al hacer uso del filtro Butterworth, mejora el desempeño del control y le permite seguir la referencia de velocidad de forma adecuada con ambas manos.
- El uso de un control robusto permite obtener una respuesta satisfactoria, a pesar de la incertidumbre en la perturbación provocada por el usuario.
- Al analizar las respuestas del error extendido, la fuerza del dispositivo y la energía consumida, se puede observar que estos factores pueden disminuir cuando el usuario sostiene al robot. Esto se debe a que el robot tiene un bajo índice de ficción en sus articulaciones y baja rigidez en sus actuadores; por lo tanto, el movimiento programado en el dispositivo puede producir vibración en el robot. Al realizar el ejercicio con interacción humana, la vibración se disipa, debido a que el usuario permite estabilizar de forma natural el efector final del robot.

### 4.4.18. Aplicación del método NASA TLX (Task Load Index)

Se aplicó el índice NASA-TLX [36] a un grupo de 11 participantes (6 mujeres y 5 hombres) con edades comprendidas entre los 16 y los 53 años, con el objetivo de evaluar la carga de trabajo mental percibida durante la realización de una tarea determinada. En donde la carga mental promedio es baja. La carga de trabajo total se estima mediante una media ponderada de seis sub escalas: exigencia mental, exigencia física, exigencia temporal, rendimiento, esfuerzo y nivel de frustración [21].

- **Exigencia mental:** Los valores fluctuaron entre 5 y 320. El caso con mayor carga mental fue el participante 7 (320), coincidiendo con un valor global de carga media (570). La exigencia mental es comprendida como la cantidad de actividad mental y/o perceptiva que se requiere (por ejemplo, pensar, decidir, calcular, recordar, mirar, buscar, etc.) [21].

- **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), aunque en ambos casos la carga mental total no superó el umbral medio. La exigencia física indica la cantidad de actividad física que se requiere (por ejemplo, empujar, jalar, girar, controlar, activar, etc.) [21].

- **Exigencia temporal:** Se observaron picos elevados en los usuarios 2 (220), 3 (300) y 11 (195), lo que sugiere que la percepción de presión temporal puede ser un factor determinante en el incremento de la carga global. La exigencia temporal es la presión que sentiste debido a la velocidad con la que se desarrollaban los elementos de la tarea. ¿La tarea fue lenta y pausada o rápida y frenética? [21].

- **Rendimiento:** Esta dimensión mostró gran dispersión, con valores desde 0 hasta 285, siendo el usuario 3 quien reportó el máximo valor. El rendimiento responde a la pregunta: ¿Qué tan exitoso crees que fuiste al hacer lo que se solicitó y qué tan satisfecho estuviste con lo que lograste? [21].

- **Esfuerzo:** Destacan los usuarios 3 y 6, con valores de 110 y 135, respectivamente, lo cual se correlaciona con sus niveles de carga media. El esfuerzo responde a la pregunta: ¿Qué tan cansado, agotado, desgastado y exhausto te sentías, o fresco, vigoroso y enérgico? [21].

- **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. La frustración comprende cómo te sentiste al realizar el ejercicio (inseguro, desanimado, irritado y molesto te sentías contra que tan seguro, gratificado, contento y complaciente te sentiste) [21].

### 4.4.19. Resultados del método NASA-TLX

El índice global de carga mental (Nivel de Carga Mental) mostró una amplia variabilidad entre los participantes, con valores que van desde los 75 hasta los 925 puntos. Se clasificó la carga percibida en tres niveles: baja (500 puntos o menos), media (de 500 a 1000 puntos) y alta (más de 1000 puntos), tomando en cuenta la ponderación del sitio web para la evaluación [36]. El 45.5 % de los participantes presentó un nivel de carga mental baja, el 45.5 % un nivel medio, y el 9 % no alcanzó el umbral considerado como carga alta, lo que sugiere una distribución equilibrada en cuanto a la percepción de carga mental.

| U. | Nivel de carga mental | Exigencia mental | Exigencia física | Exigencia temporal | Rendimiento | Esfuerzo | Frustración |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 75 (baja) | 20 | 5 | 10 | 10 | 10 | 20 |
| 2 | 720 (medio) | 120 | 250 | 220 | 0 | 80 | 50 |
| 3 | 925 (medio) | 200 | 0 | 300 | 285 | 110 | 30 |
| 4 | 75 (baja) | 5 | 25 | 10 | 15 | 20 | 0 |
| 5 | 265 (baja) | 50 | 165 | 10 | 25 | 15 | 0 |
| 6 | 630 (medio) | 100 | 90 | 110 | 135 | 0 | 195 |
| 7 | 570 (medio) | 320 | 0 | 210 | 10 | 5 | 25 |
| 8 | 410 (baja) | 225 | 10 | 20 | 0 | 5 | 150 |
| 9 | 180 (baja) | 100 | 30 | 25 | 15 | 10 | 0 |
| 10 | 410 (baja) | 225 | 10 | 20 | 0 | 5 | 150 |
| 11 | 255 (baja) | 10 | 15 | 195 | 15 | 15 | 5 |

Tabla 4.16: Resultados del método NASA-TLX.

Se evidenció una correlación entre niveles elevados de exigencia temporal y valores altos en el índice de carga mental total, como en los casos de los usuarios 2 y 3. De manera similar, altos niveles de esfuerzo y frustración también contribuyeron significativamente a una mayor carga subjetiva.

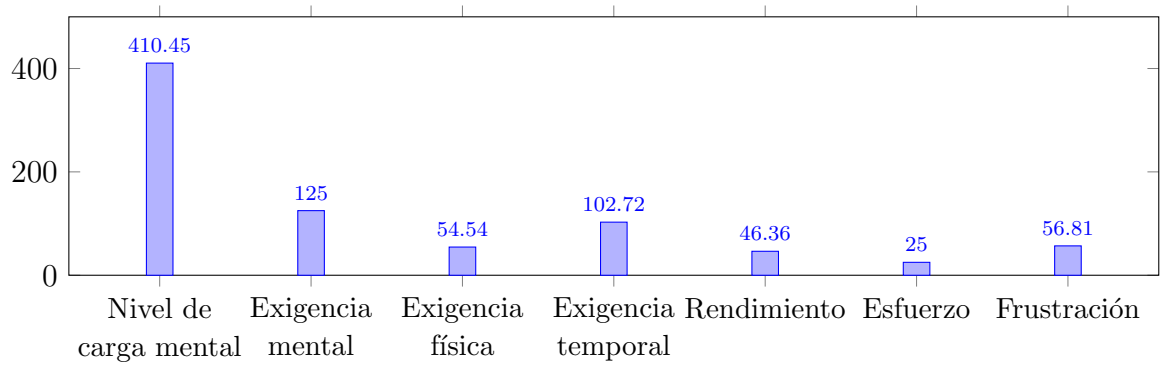



Figura 4.33: Análisis del promedio obtenido de las personas encuestadas, dado por cada parámetro del método NASA TLX.

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 carga mental 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.

## 4.5. Discusión y conclusiones

En este capítulo se establecieron algunas pruebas que permiten mostrar el comportamiento de la plataforma háptica bimanual con interacción con personas sanas, mediante la implementación de dos modos de uso (Modo guiado y Modo exploración). Se consideraron diferentes métricas que permitieran valorar el desempeño de los participantes, como también la aplicación del método NASA-TLX, que permite valorar la percepción del esfuerzo físico y mental del usuario durante la aplicación del experimento. Al obtener los resultados del método NASA-TLX, se pueden identificar posibles características que afectan de forma negativa al uso adecuado de la plataforma por parte de los usuarios, pero para esta ocasión, aunque se obtuvieron algunos valores altos, no se encontró una tendencia que indique la necesidad de algún cambio. Para la aplicación de la plataforma en centros de tratamiento de discapacidades se deben realizar nuevamente evaluaciones y, si es requerido, modificar el diseño y la dificultad de la tarea con los laberintos, de modo que sea una herramienta útil en la rehabilitación infantil.

# Capítulo 5

# Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo de investigación aplicado, se establecieron pautas para el uso de dispositivos hápticos Touch en el proceso de rehabilitación de pacientes clínicamente diagnosticados con patologías que afectan los miembros superiores y lesiones neurológicas. Por lo que es necesario un entendimiento adecuado del dispositivo a utilizar. Para ello, se validaron los modelos matemáticos (cinemático y dinámico) del robot tanto numérica como experimentalmente.

Se aplicaron estrategias de control con enfoque clásico, presentes en la literatura de control de robots; así como también la aplicación de un control robusto con altas prestaciones para regulación global, basado en la teoría de modos deslizantes. Para el caso de estudio, asociado a la planificación de movimiento (posición, velocidad y aceleración), se emplea un Generador de Tiempo Base para convergencia en tiempo finito. El uso adecuado de estas herramientas facilitó el establecimiento exitoso de la integración del control con el dispositivo háptico, demostrando la necesidad de un control robusto en el proceso de neurorrehabilitación. Se permite al robot moverse en conjunto con un paciente con baja movilidad en extremidades superiores, reduciendo drásticamente los efectos de perturbación del paciente sobre el robot al mínimo y realizando el ejercicio satisfactoriamente. Esto último, representa una condición del proceso asistencial requerido.

El diseño de la plataforma incluye el uso de dos dispositivos hápticos cooperativos (interacción física con ambas extremidades) en interacción con un ambiente de realidad virtual basado en laberintos clínicamente acreditados. Para fomentar la activación cerebral del paciente (estímulo neurocognitivo), se implementó el efecto espejo, en el cual cada dispositivo debía resolver el mismo laberinto, pero con proyecciones verticales independientes, guiando al paciente a usar ambas extremidades superiores de manera simultánea, preservando la coordinación mano-ojo. El uso de realidad virtual para este ejercicio ayudó

mucho al estímulo sensorial del paciente, el cual, a pesar de estar interactuando con un ejercicio de forma repetitiva y mentalmente demandante, permite al paciente sobrellevar esos efectos negativos más fácilmente que con una rehabilitación clásica. Adicionalmente, se clarifica un diagnóstico en tiempo real que permite no solo conocer el estado clínico del paciente, sino también moldear las señales de interacción definidas en ambos sistemas robóticos.

El uso de laberintos da lugar a trayectorias preestablecidas, con el propósito de obtener resultados semejantes, y obtener un análisis más confiable en la evolución del paciente con el uso continuo de la plataforma, haciendo uso de un protocolo clínico y consentimiento informado, basado en códigos de ética clínica; para ello, se hace uso de tablas y gráficas que facilitan la comprensión de los datos. Para interpretar adecuadamente estos datos y traducirlos en parámetros clínicamente aceptables, se requiere la colaboración de expertos del ámbito médico, particularmente terapeutas y neuropsicólogos, ofreciendo información valiosa sobre la condición del paciente para un adecuado diagnóstico por parte de su terapeuta. La presentación del trabajo en el centro de rehabilitación integral de Hidalgo es una parte fundamental para la cooperación con expertos, siendo un trabajo futuro y de corto plazo, la evaluación en pacientes clínicamente diagnosticados con diversas anomalías sanitarias cuyos efectos se refieren a miembros superiores y lesiones neurológicas. Esto permitirá validar clínicamente la plataforma, identificar posibles mejoras técnicas o terapéuticas, y sentar las bases para su implementación en entornos hospitalarios o centros de rehabilitación especializados.

Se publicaron tres artículos, uno como primer autor [46] asociado a un congreso con participación presencial, uno como colaborador en revista indexada con factor de impacto [18] y otro en un boletín científico de ingeniería como tutor en la formación de un recurso humano [25]; así mismo, el trabajo permitió favorecer en la divulgación de la ciencia a mediante del seminario de investigación del programa académico de Maestría en Ciencias en Automatización y Control.

# Bibliografía


[1] Adamovich, S.V.; Merians, A.S.; Mathai, A.; Qiu, Q.; Incorporating Haptic Effects Into Three-Dimensional Virtual Environments to Train the Hemiparetic Upper Extremity. IEEE Transactions On Neural Systems And Rehabilitation Engineering, Vol. 17, No. 5, October 2009

[2] Aguilar J. V., Domínguez-Ramírez O. A., Peña-Ramírez J. (2022). Control PID deslizante con generador de tiempo base para un sistema de levitación magnética. Publicación semestral Padi Vol. 10 No. Especial 5.

[3] Bax, M.; Goldstein, M.; Rosenbaum, P.; Leviton, A.; Paneth, N.; Dan, B.; Jacobsson, B.; Damiano, D. Proposed definition and classification of cerebral palsy, April 2005. Dev. Med. Child Neurol. 2005, 47, 571–576.

[4] Borghese, N. A., Mainetti, R., Pirovano, M., and Lanzi, P. L. (2013). An intelligent game engine for the at-home rehabilitation of stroke patients. 2013 IEEE 2nd International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH), Vilamoura, Portugal, pp. 1-8, doi: 10.1109/SeGAH.2013.6665318.

[5] Burdea, G.; (2008) The Role of Haptics in Physical Rehabilitation. Bright Cloud International Corp. DOI: 10.1201/b10636-29

[6] Casellato C, Pedrocchi A, Zorzi G, Vernisse L, Ferrigno G, Nardocci N. EMG-based visual-haptic biofeedback: a tool to improve motor control in children with primary dystonia. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2013 May;21(3):474-80. doi: 10.1109/TNSRE.2012.2222445. Epub 2012 Oct 5. PMID: 23060345.

[7] Castro, P.S.; Cantón, I.C., Filtros no lineales: Tlatemoani Revista académica de investigación, 2014.

[8] Chakraborty, S. S., Karmakar, S., Sinha, A., Saha, S. K., Mukherjee, P., Sharma, V., ... & Pal, T. (2023, October). NASA-TLX based workload assessment of learning tasks for primary school children. In Proceedings of the Future Technologies Conference (pp. 473-486). Cham: Springer Nature Switzerland.

[9] Chen, Y.; Fanchiang, H.D.; Howard, A. Effectiveness of Virtual Reality in Children With Cerebral Palsy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. Phys. Ther. 2018, 98, 63–77. [CrossRef] [PubMed]

[10] Chen YT, Kruger G, Devine A, Khanna D, Murphy SL. Experiences of Exergaming for Upper Extremity Exercises in People With Systemic Sclerosis. OTJR: Occupational Therapy Journal of Research. 2023;43(4):665-675. doi:10.1177/15394492231172934.

[11] Chow DHK and Mann SKF (2023) Exergaming and education: a relational model for games selection and evaluation. Front. Psychol. 14:1197403. doi:10.3389/fpsyg.2023.1197403.

[12] De Laet, C.; Herman, B.; Riga, A.; Bihin, B.; Regnier, M.; Leeuwerck, M.; Raymackers, J.M.; (2022) Bimanual motor skill learning after stroke: Combining robotics and anodal tDCS over the undamaged hemisphere: An exploratory study. Sec. Neurorehabilitation.

[13] Domínguez-Ramírez, O. A., Jarillo-Silva, A., Parra-Vega, V., Ruíz-Sánchez, F. J. y Sepúlveda-Cervantes, G. (2011). Neurorehabilitación Robótica Basada en Guiado Kinestésico Local para Miembro Superior con Movimiento Involuntario, Revista Ciencia Universitaria, ISSN 1665-5427, pp:19-29.

[14] Domínguez Ramírez, O. A., Parra Vega, V., Díaz Montiel, M. G., Pozas Cárdenas, M. J., Hernández Gómez, R. A. (2008). Cartesian sliding PD control of robot manipulator for tracking in finite time: Theory and experiments. DAAAM International, Vienna, Austria, 257-272.

[15] Epic Games, Inc., Unreal Engine en línea. Available: www.unrealengine.com.

[16] Siciliano, B. and Khatib, O. (2008) Springer Handbook of robotics / Bruno Siciliano, Oussama Khatib (eds.). Berlin: Springer.

[17] Flores, J.C.; Ostrosky, F.; Lozano, A. (2014). BANFE-2 Batería Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales, 2ª ed., México, Editorial El Manual Moderno. ISBN: 978-607-448-387-1

[18] Garcia-Blancas, J., Dominguez-Ramirez, O.A., Rodriguez-Torres, E.E., Ramirez-Zamora, J.D., Rodriguez-Henandez, E. (2025). A technological proposal for a robot brain computer interface for neurorehabilitation purposes. Eur. Phys. J. Spec. Top. 234, 195–223. https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-024-01463-1

[19] Gomila, J. G. (2023). Las 5 Mejores Aplicaciones para el Desarrollo de Videojuegos (1ra ed.) [Online]. Disponible: https://cursos.frogamesformacion.com/pages/blog/las-5-mejores-aplicaciones-para-el-desarrollo-de-videojuegos

[20] Gotcha Gotcha Games Inc., rpg-maker en línea. Available: https://www-rpgmakerweb-com/.

[21] Hart, S. G.; Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. Human Mental Workload, 139–183. doi:10.1016/s0166-4115(08)62386-9

[22] Hidalgo, A. (2024). Comité de Investigación del INRLGII [Online]. Disponible: https://www.inr.gob.mx/Descargas/Investigacion/FORMATO-CONSENTIMIENTO-INFORMADO.docx

[23] Jarillo-Silva A., Domínguez-Ramírez O.A., Parra-Vega V. and Ordaz-Oliver P. (2009). Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability. In 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA) (pp. 193-198). IEEE.

[24] Jarillo-Silva, A., Gomez-Perez, Víctor A., Escotto-Cordova, Eduardo A., and Dominguez-Ramirez, O.A. Emotion classification from EEG signals using wearable sensors: pilot test. ECORFAN Journal-Bolivia. 2020. 7-12: 1-9

[25] Juárez-Chavero, M.I., Rodríguez-Hernández, E., Villafuerte-Segura, R., Domínguez-Ramírez, O.A. (2025) Workload assessment of a bimanual exergaming platform for neurorehabilitation tasks. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI.

[26] Kelkoul, B., Boumediene, A. (2020). Stability analysis and study between Classical Sliding Mode Control (SMC) and Super Twisting Algorithm (STA) for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) under Wind turbine. Energy, 118871. doi:10.1016/j.energy.2020.118871

[27] Kelly R., Santibáñez V. Control de movimiento de robots manipuladores. Pearson Educación, S.A., Madrid, 2003.

[28] Kunusch, C., Puleston, P., Mayosky, M. (2012). Fundamentals of Sliding-Mode Control Design. Advances in Industrial Control, 35–71. doi:10.1007/978-1-4471-2431-3_3

[29] Lakshika E, Barlow M, Yang S, Barlow Z, Townsend T. A General Exergaming Interface: Impact upon Heart Rate, Enjoyment and Immersion across Multiple Games. JMIR Preprints. 18/12/2023:55543; DOI: 10.2196/preprints.55543. URL: https://preprints.jmir.org/preprint/55543

[30] Laurie-Rose, C., Frey, M., Ennis, A., & Zamary, A. (2014). Measuring perceived mental workload in children. The American journal of psychology, 127(1), 107-125.

[31] Levin, H. S., Song, J., Swing-Cobbs, L., Roberson, G. (2001). Porteus maze performance following traumatic brain injury in children. Neuropsychology, 15, 557-567.

[32] Li, S., Liu, Y., Li, K., Cao, G., Li, S., Mao, Y., ... & Tang, S. T. (2023). Validation and effect of the NASA-TLX score on the assessment of the workload of pediatric robotic operations. Surgical Endoscopy, 37(7), 5077-5085.

[33] Linietsky, J., Manzur, A. y colaboradores, Godot en línea. Available: https://godotengine.org/.

[34] Microsoft 2025, Visual Studio Code en línea. Available: https://code.visualstudio.com/.

[35] Medeiros, C. S. P.; Farias, L. B. A.; Santana, M. C. D. L.; Pacheco, T. B. F.; Dantas, R. R.; Cavalcanti, F. A. D. C. (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), e0306816.

[36] Método NASA TLX (Task Load Index). [Online] Disponible: https://ergomedia.isl.gob.cl/app_ergo/nasatlx/

[37] Miller, F.; Bachrach, S. Part one: What is cerebral palsy. In Cerebral Palsy: A Complete Guide for Cargiving, 3rd ed.; John Hopking University Press: Baltimore, MD, USA, 2017; pp. 3–28.

[38] Miyara, F., Filtros activos, Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Departamento de Electrónica, 2004.

[39] Oliveira, I., Afonso, A., Oliveira, E., Coimbra, J. and Rodriguez, N. F. (2022) Design principles for cognitive and physical rehabilitation of ICU patients using Virtual Reality (VR). 2022 IEEE 10th International Conference on Serious Games and Applications for Health(SeGAH), Sydney, Australia, pp. 1-7, doi: 10.1109/SEGAH54908.2022.9978575.

[40] Ortega A., Weill-Duflos A., Haliyo S., Régnier S., and Hayward V. (2017). Linear induction actuators for a haptic interface: A quasi-perfect transparent mechanism. IEEE World Haptics Conference (WHC), Munich, Germany, (pp. 575-580).

[41] Piech, J.; Czernicki, K. Virtual Reality Rehabilitation and Exergames—Physical and Psychological Impact on Fall Prevention among the Elderly—A Literature Review. Appl. Sci. 2021, 11, 4098. https://doi.org/10.3390/app11094098

[42] Polizzi A, Rinella S, Ruggieri M, Gentile AE, Verrelli CM, Iosa M. Efficacy of videogames and exergames in pediatric neurorehabilitation: a systematic review. Minerva Pediatr (Torino). 2024 Oct;76(5):690-702. doi: 10.23736/S2724-5276.23.07146-X. Epub 2023 Jun 16. PMID: 37335184.

[43] Ramirez-Zamora, J.D.; Dominguez-Ramirez, O.A.; Ramos-Velasco, L.E.; Sepulveda-Cervantes, G.; Parra-Vega, V.; Jarillo-Silva, A.; Escotto-Cordova, E.A. HRpI System Based on Wavenet Controller with Human Cooperative-in-the-Loop for Neurorehabilitation Purposes. Sensors 2022, 22, 7729. https://doi.org/10.3390/s22207729

[44] Ramirez-Zamora, J. D., Dominguez-Ramirez, O. A., Sepulveda-Cervantes, G., Ramos-Velasco, L. E., and Fernandez-Ramirez, J. M. (2022). NASA-TLX Assessment for a Haptic Adaptive Platform for Upper Extremity Motor Rehabilitation. XXIV Robotics Mexican Congress (COMRob), doi: 10.1109/COMRob57154.2022.9962313.

[45] Reyes, F. Robótica: Control de robots manipuladores. Alfaomega, S.A. de C.V., México, 2011.

[46] Rodríguez-Hernández, E., Domínguez-Ramírez, O.A., Jarillo-Silva, A., Ramírez-Zamora, J.D., Curiel-Anaya, A. (2024) Passive haptic guidance based on sliding mode control. Conference: Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA). ISSN:2992-8338.

[47] Sakzewski, L.; Ziviani, J.; Boyd, R.N. Efficacy of upper limb therapies for unilateral cerebral palsy: A meta-analysis. Pediatrics 2014, 133, e175–e204.

[48] Saini, S., Rambli, D. R. A., Sulaiman, S., Zakaria, M. N., and Mohd Shukri, S. R. (2012) A low-cost game framework for a home-based stroke rehabilitation system. 2012 International Conference on Computer & Information Science (ICCIS), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 55-60, doi: 10.1109/ICCISci.2012.6297212.

[49] Sansanayuth T., Nilkhamhang I., and Tungpimolrat K.; Teleoperation with inverse dynamics control for PHANToM Omni haptic device, 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), Akita, Japan, 2012, pp. 2121-2126.

[50] Sierra-Martínez, L. M., Chanchí-Golondrino, G. E., Gómez-Álvarez, M. C. (2022). Directrices para el diseño y la construcción de videojuegos serios educativos. Revista Colombiana De Educación, (84), 1–22. https://doi.org/10.17227/rce.num84-12759

[51] Stuss, D.T.; Alexander M.P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: a conceptual view. Psychol Res, 63(3-4):289-98. Doi: 10.1007/s004269900007.

[52] Subir, K. S., Introducción a la robótica. México, D.F.: McGraw-Hill, 2008.

[53] The MathWorks, Inc., Matlab en línea. Available: https://www.mathworks.com/products/matlab.html.

[54] Tobaiqi, M.A.; Albadawi, E.A.; Fadlalmola, H.A.; Albadrani, M.S. Application of Virtual Reality-Assisted Exergaming on the Rehabilitation of Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review and Meta-Analysis. J. Clin. Med. 2023, 12, 7091. https://doi.org/10.3390/jcm12227091

[55] Tsuneo, Y. (1985). Manipulability of robotic mechanisms, International Journal of Robotics Research.

[56] Turijan-Rivera, J.A., Machorro-Fernandez, F.A., Ruiz-Sanchez, F.J., Parra-Vega, V., Dominguez-Ramirez, O.A. (2013). NASA-TLX Assessment of Modern Close Loop Controllers in Haptic Guidance for Assisted Rehabilitation. Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation. Biosystems & Biorobotics, vol 1. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34546-3_38

[57] Unterrainer, J. M., Ruff, C. C., Rahm, B., Kaller, C. P., Spreer, J., Schwarzwald, R., Halsband, U. (2005). The influence of sex differences and individual task performance on brain activation during planning. Neuroimage, 24, 586-590.

[58] Unity Technologies, Unity en línea. Available: https://unity.com/.

[59] Vazquez-Gutierrez, Y., O'Sullivan, D. L., and Kavanagh, R. C. (2019). Study of the impact of the incremental optical encoder sensor on the dynamic performance of velocity servosystems. The Journal of Engineering, 2019(17), 3807-3811.

[60] Weiss, P.; Kizony, R.; Feintuch, U.; Katz, N. Virtual reality in neurorehabilitation. In Textbook of Neural Repair and Rehabilitation, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2006; pp. 182–197.

[61] Weiss, P.L.; Tirosh, E.; Fehlings, D. Role of virtual reality for cerebral palsy management. J. Child Neurol. 2014, 29, 1119–1124.

[62] YoYo Games Ltd, GameMaker en línea. Available: https://gamemaker.io/.

[63] 3D Systems Inc., 3D Systems en línea. Available: https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch.

# Apéndice A

# Información personal y médica

Nombre:

Edad:

Género: ☐ Masculino ☐ Femenino ☐ Otro ☐ Prefiero no responder

Dominancia de la mano: ☐ Diestro ☐ Zurdo ☐ Ambidiestro

**Condición médica específica**

Lesión o condición anormal: ☐ No ☐ Si, cuál?: _____

En caso de elegir si, tiempo de la lesión o condición: _____

**Estado funcional de las extremidades superiores**

Grado de movilidad en brazos: ☐ Muy baja ☐ Baja ☐ Media ☐ Alta ☐ Muy alta

Fuerza en brazos: ☐ Muy baja ☐ Baja ☐ Media ☐ Alta ☐ Muy alta

Presencia de dolor o espasticidad: ☐ A menudo ☐ A veces ☐ Raramente ☐ Nunca

**Historia clínica**

Enfermedades previas o cirugías en brazos: ☐ No ☐ Si

**Información sociodemográfica**

Nivel Educativo: ☐ Ninguno ☐ Primaria ☐ Secundaria ☐ Otro: _____

**Estilo de vida**

Nivel de actividad física: ☐ Inactivo ☐ Activo

Hobbies o actividades recreativas que involucren las manos: ☐ No ☐ Si

**Condiciones socioculturales**

Idioma principal: ☐ Español ☐ Inglés ☐ Otra: _____

Cultura: ☐ Mexicana ☐ Americana ☐ Otra: _____

**Acceso a tecnología**

Familiaridad con dispositivos tecnológicos:

☐ Muy baja ☐ Baja ☐ Media ☐ Alta ☐ Muy alta

# Apéndice B

# Formato consentimiento informado

Número de Folio:

Hidalgo, a _____ de _____ de 20__

**CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO**
**[Versión 1, 24/11/2024]**

Título de la Investigación: Exergaming basado en sincronización háptica para ejercicios de rehabilitación en miembro superior de niños con discapacidad cerebral

Nombre del Investigador Principal: M. C. Edwin Rodríguez Hernández

Nombre de la persona que participará en la Investigación: _____

A través de este documento que forma parte del proceso para la obtención del consentimiento informado, me gustaría invitarlo a participar en la investigación titulada: Exergaming basado en sincronización háptica para ejercicios de rehabilitación en miembro superior de niños con discapacidad cerebral. Antes de decidir, necesita entender por qué se está realizando esta investigación y en qué consistirá su participación. Por favor, tómese el tiempo que usted necesite para leer la siguiente información cuidadosamente y pregunte cualquier cosa que no comprenda. Si usted lo desea puede consultar con personas de su confianza (Familiar y/o Médico tratante) sobre la presente investigación.

**1. ¿Dónde se llevará a cabo esta investigación?**

Esta investigación se llevará a cabo en las instalaciones _____
_____,

específicamente en _____
ubicado en _____.

**2. ¿Cuál es el objetivo de esta investigación?**

Esta investigación tiene como objetivo evaluar una plataforma que combina el uso de videojuegos y ejercicio físico con el fin de utilizarla como entrenamiento, también conocido como exergaming. Se hace uso de dos dispositivos robóticos que permiten al usuario realizar interacción háptica en entornos virtuales, con el fin de facilitar el proceso de rehabilitación de habilidades motoras en miembros superiores, atendiendo al diagnóstico y a las necesidades de los pacientes.

**3. ¿Por qué es importante esta investigación?**

- Permitirá aumentar la eficiencia de las fisioterapias, dando como resultado un progreso más rápido en el desarrollo de habilidades motoras en miembros superiores.
- La naturaleza del exergaming, parecida a un videojuego, hará que las sesiones de rehabilitación sean más atractivas.
- Proporcionará una base de datos sobre el uso de la robótica y la realidad virtual en la rehabilitación infantil.
- La integración de dispositivos hápticos servirá como base para nuevas intervenciones más efectivas.
- Desarrollo y validación de algoritmos de control para mejorar el proceso de rehabilitación.

**4. ¿Por qué he sido invitado a participar en esta investigación?**

Ha sido invitado a formar parte de esta investigación, porque cumple con las características enlistadas a continuación (criterios de inclusión):

Los participantes son incluidos si:

- Son niños de entre 7 a 15 años
- Sufre de alguna discapacidad cerebral
- Sufren de alguna falta de movilidad en miembros superiores

- Tiene la capacidad de recibir y acatar indicaciones
- Tiene la capacidad de sostener objetos

**5. ¿Estoy obligado a participar?**

Su participación es **voluntaria, anónima y confidencial**; no tiene que participar forzosamente. No habrá impacto negativo alguno si decide no participar en la investigación, y **no demeritará de ninguna manera la calidad de la atención** que reciba en las instalaciones _____, en términos de sus derechos como paciente.

**6. ¿En qué consistirá mi participación y cuánto durará?**
Su participación consistirá en lo siguiente:

- Se le proporcionará el uso de hasta 2 dispositivos hápticos para interacción en un laberinto virtual
- Se realizarán diversos ejercicios con los dispositivos que podrían durar varios minutos, respetando siempre la comodidad del paciente
- Se realizarán por lo menos una sesión de ejercicios (una sesión máxima al día)

Si está de acuerdo en participar, le pediremos que escriba su nombre y firme el formato de Consentimiento Informado y firme al final del mismo.

**7. ¿Cuáles son los posibles beneficios de formar parte de esta investigación?**

- Mejora de movilidad en miembros superiores por el uso prolongado del exergaming
- Recibir un tratamiento con un sistema robótico con realidad virtual, divertido e interactivo

**8. ¿Cuáles son los posibles riesgos de formar parte de esta investigación?**

Actualmente, el uso adecuado del exergaming no producirá algún riesgo en el paciente.

**9. ¿Tendré alguna molestia durante y/o después de mi participación?**

- Un poco de cansancio
- Posible dolor muscular

**10. ¿Tendrá algún costo mi participar en esta investigación?**

Se le informa que los gastos relacionados con esta investigación que se originen a partir del momento en que, voluntariamente, acepta participar en la misma, no serán pagados por usted. En el caso de que existan gastos adicionales originados por el desarrollo de esta investigación, serán cubiertos por el presupuesto de la misma.

**11. Una vez que acepte participar ¿Es posible retirarme de la investigación?**

Se le informa que usted tiene el derecho, en cualquier momento y sin necesidad de dar explicación, a dejar de participar en la presente investigación. Únicamente avisando a alguno de los investigadores su decisión.

**12. ¿En qué casos se me puede suspender de la investigación?**

- En caso de que el paciente no se encuentre cómodo o sienta alguna molestia realizando el ejercicio
- En caso de que no disponer del tiempo o disponibilidad

**13. ¿Qué sucede cuando la investigación termina?**

Los resultados, de manera anónima, podrán ser publicados en revistas de investigación científica o podrán ser presentados en congresos.

**14. ¿A quién puedo dirigirme si tengo alguna complicación, preocupación o problema relacionado con la investigación?**

Cualquier duda, preocupación o queja acerca de algún aspecto de la investigación o de la forma en que he sido tratado durante el transcurso de la misma, por favor contacte a los investigadores principales:

- M. C. Edwin Rodríguez Hernández (ro502288uaeh.edu.mx) Tel. 5621921955
- Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez (omaruaeh.edu.mx) Tel. 7716831964
- Dr. Alejandro Jarillo Silva (ajarillounsis.edu.mx) Tel. 9515831962
- Dr. Juan Daniel Ramírez Zamora (juandaniel_ramirez@uaeh.edu.mx) Tel. 7712366436

**Aclaracones:**

a) Su decisión de participar en la presente investigación es **completamente voluntaria**.
b) En el transcurso de la investigación, usted podrá solicitar información actualizada sobre la misma, al investigador responsable.
c) La información obtenida en esta investigación, utilizada para la identificación de cada participante será mantenida con estricta confidencialidad, conforme a la normatividad vigente.
d) Se le garantiza que usted recibirá respuesta a cualquier pregunta, duda o aclaración acerca de los procedimientos, riesgos, beneficios u otros asuntos relacionados con la presente investigación.
e) En caso de que sea usted padre/tutor, o representante legal de un menor de edad o de una persona incapaz de tomar la decisión o firmar este documento, sírvase firmar la presente Carta de Consentimiento Informado dando su autorización.
f) Si considera que no hay dudas ni preguntas acerca de su participación, puede, si así lo desea, firmar la Carta de Consentimiento Informado.
g) Se le comunica que esta Carta de Consentimiento Informado se elabora y firma en dos ejemplares originales, se le entregará un original y el otro lo conservará el investigador principal.

**FIRMA DE CONSENTIMIENTO**
[**Versión 1, 24/11/2024**]

Yo, _____, manifiesto que fui informado(a) del propósito, procedimientos y tiempo de participación y en pleno uso de mis facultades, es mi voluntad participar en esta investigación titulada. Exergaming basado en sincronización háptica para ejercicios de rehabilitación en miembro superior de niños con discapacidad cerebral.

No omito manifestar que he sido informado(a) clara, precisa y ampliamente, respecto de los procedimientos que implica esta investigación, así como de los riesgos a los que estaré expuesto ya que dicho procedimiento es considerado de bajo riesgo.

He leído y comprendido la información anterior, y todas mis preguntas han sido respondidas de manera clara y a mi entera satisfacción.

_____ _____ _____

Nombre del Participante Firma o huella del Participante Fecha

Teléfono: _____

# Apéndice C

# NASA TLX

**Método del índice de carga de trabajo NASA (TLX)**

Fecha: _____

Nombre: _____

En los siguientes recuadros debe marcar el nivel de exigencia de cada factor en una escala de 1 a 20.

**Exigencia mental**. ¿Qué tan demandante mentalmente es la tarea?

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Baja Alta

**Exigencia física**. ¿Qué tan demandante físicamente es la tarea?

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Baja Alta

**Exigencias temporales**. ¿Qué tan fuerte o rápido es el ritmo impuesto para hacer la tarea?

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Baja Alta

**Rendimiento**. ¿Qué tan exitoso ha sido para lograr lo que ha requerido?

Baja Alta

**Esfuerzo**. ¿Qué tan duro tiene que trabajar para lograr un adecuado nivel de rendimiento?

Baja Alta

**Nivel de frustración**. ¿Qué tan inseguro, irritado o estresado y molesto está por la tarea?

Baja Alta

A continuación puede observar una serie de cuadros. Seleccione una opción por cada cuadro: ¿Cuál aspecto del par presentado contribuye más a la carga de la tarea?

| | | |
|---|---|---|
| ◯ Exigencias Mentales<br>◯ Exigencias Físicas | ◯ Exigencias Físicas<br>◯ Exigencias Temporales | ◯ Exigencias Temporales<br>◯ Esfuerzo |
| ◯ Exigencias Mentales<br>◯ Exigencias Temporales | ◯ Exigencias Físicas<br>◯ Rendimiento | ◯ Exigencias Temporales<br>◯ Nivel de Frustración |
| ◯ Exigencias Mentales<br>◯ Rendimiento | ◯ Exigencias Físicas<br>◯ Esfuerzo | ◯ Rendimiento<br>◯ Esfuerzo |
| ◯ Exigencias Mentales<br>◯ Esfuerzo | ◯ Exigencias Físicas<br>◯ Nivel de Frustración | ◯ Rendimiento<br>◯ Nivel de Frustración |
| ◯ Exigencias Mentales<br>◯ Nivel de Frustración | ◯ Exigencias Temporales<br>◯ Rendimiento | ◯ Esfuerzo<br>◯ Nivel de Frustración |

| DIMENSIÓN | DEFINICIÓN | OPERATIVIZACIÓN |
|---|---|---|
| Exigencias Mentales | Cantidad de actividad mental y perceptiva que requiere la tarea | ¿Cuánta actividad mental y perceptiva fue necesaria? (pensar, decidir, calcular, etc.). ¿Es una tarea difícil o fácil, simple o compleja, pesada o ligera? |
| Exigencias Físicas | Cantidad de actividad física que requiere la tarea | ¿Cuánta actividad física fue necesaria? ¿Se trata de una tarea difícil o fácil, lenta o rápida, relajada o cansada? |
| Exigencias Temporales | Nivel de presión temporal percibida | ¿Cuánta presión de tiempo sintió debido al ritmo al cual se sucedían las tareas o elementos de las tareas? ¿Era el ritmo lento y pausado, o rápido y frenético? |
| Rendimiento | Grado de satisfacción con el propio nivel de rendimiento | ¿Hasta qué punto cree que ha tenido éxito en los objetivos establecidos por el investigador (o por Ud. mismo)? ¿Cuál es su grado de satisfacción con el nivel de ejecución? |
| Esfuerzo | Grado de esfuerzo mental y físico que debe realizar para obtener su nivel de rendimiento | ¿En qué medida ha tenido que trabajar (física o mentalmente) para alcanzar su nivel de resultados? |
| Nivel de Frustración | Grado de inseguridad, estrés, irritación, descontento, etc., sentido durante la realización de la tarea | Durante la tarea, ¿en qué medida se ha sentido inseguro, desalentado, irritado, tenso o preocupado o por el contrario, se ha sentido seguro, contento, relajado y satisfecho? |

# C.1. Tabla de Evaluación del Método NASA TLX

| Variable | (a) Peso | (b) Puntuación | (c) Puntuación Convertida (b*5) | (d) Puntuación Ponderada (c*a) |
|---|---|---|---|---|
| **Exigencias Mentales** | | | | |
| **Exigencias Fisicas** | | | | |
| **Exigencias Temporales** | | | | |
| **Rendimiento** | | | | |
| **Esfuerzo** | | | | |
| **Frustación** | | | | |
| **TOTAL** | 15 | | | |

| NASA TLX | Nivel de Carga Mental |
|---|---|
| 500 puntos o menos | Baja |
| Sobre los 500 puntos y por debajo de los 1000 puntos | Medio |
| Sobre 1000 puntos y cuyos factores predominantes posean un carácter intrínseco (independientemente que la suma de factores intrínsecos no alcance los 100 puntos) | Alto |

# Apéndice D

# Publicaciones

El trabajo de investigación, reportado en esta tesis de maestría, fue publicado y, en su caso, presentado en 3 artículos de investigación. Una breve descripción de la contribución, en cada caso, es la siguiente:

- Artículo en revista JCR Springer. Este artículo propone un sistema de interacción cerebro-robot-computadora para diagnóstico y neurorrehabilitación en pacientes con movilidad reducida. Utiliza un dispositivo háptico y un control cartesiano basado en modos deslizantes para guiar el movimiento según un protocolo clínico [18].
- Artículo en congreso CITCA 2024. En este artículo se evidencian los resultados obtenidos del uso del dispositivo háptico con el uso del control por modos deslizantes, usando como referencia la trayectoria de una flor de 8 pétalos [46].
- Artículo en Pädi, Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI. En este artículo se aplica el uso de la plataforma háptica bimanual en 11 voluntarios, se obtuvieron parámetros relevantes al desempeño de los usuarios y se aplicó el método NASA-TLX para identificar posibles características a mejorar o modificar en la plataforma [25].

Eur. Phys. J. Spec. Top.
https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-024-01463-1

THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL SPECIAL TOPICS

Regular Article

# A technological proposal for a robot brain computer interface for neurorehabilitation purposes

Jesus Garcia-Blancas[1,2,a], Omar A. Dominguez-Ramirez[1,b], Erika E. Rodriguez-Torres[1,c], Juan D. Ramirez-Zamora[1,d], and Edwin Rodriguez-Hernandez[1,e]

[1] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, Mexico
[2] Tecnológico Nacional de México, ITS del Oriente del Estado de Hidalgo, Apan, Mexico

Received 25 October 2024 / Accepted 27 December 2024
© The Author(s), under exclusive licence to EDP Sciences, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2025

**Abstract** Robotic assistance systems and exergaming represent a technological alternative for the diagnosis and physical rehabilitation of a specific type of patient. Various studies reported in the literature demonstrate the success of interactive systems with robots and virtual reality. This article proposes a method based on active virtual immersion and biofeedback to enhance diagnosis and rehabilitation in patients with limited physical activity. A human–robot physical interaction system is proposed using a haptic device interaction with a dynamic virtual environment. The proposed method establishes criteria for active virtual exploration and passive haptic guidance. To achieve this, a novel Cartesian control strategy based on sliding mode theory is proposed. Motion planning is based on a clinical protocol, ensuring the tracking of the target trajectory and convergence in finite time using a time-based generator. Experiments on a patient with Guillain–Barré syndrome are presented, where an electroencephalogram verifies a condition of effort and concentration with the aim of influencing changes in the movement setpoint in the interaction system.

## 1 Introduction

Robotic-assisted rehabilitation systems are increasingly used medical treatment tools, particularly for patients whose illnesses affect their bodily movement. These systems utilize robots and mechanical devices to guide and assist patients in specific exercises, aiming to enhance their functional abilities. One of the key benefits of these systems is the provision of greater precision and control in exercise execution, leading to improved recovery efficacy. The ability to adapt the robotic system's operation with the patient in the control loop creates an opportunity to tailor treatment to individual needs, ensuring greater safety and effectiveness [1, 2]; however; there is no biofeedback that allows establishing the ideal condition of the clinical protocol with a movement task; just as the exploration phase is not established as the learning test. Brain–Computer–Robot Interface (BCRI) systems enable individuals to control external devices based on the processing of signals associated with brain activity; or, to make decisions for instant changes through biofeedback. These systems leverage the brain's ability to generate electrical signals that can be recorded and analyzed. By measuring these signals, BCRI systems can identify specific patterns and utilize them to control external devices, such as a robotic prosthesis [3, 4]. In [5], a virtual reality system with two cooperative haptic devices is presented for simulating a pinch motion, intended for the recovery of fine motor function in upper limbs. Neurorrehabilitation has emerged as a crucial area of research and technological development for enhancing the quality of life of individuals affected by various neurological conditions, such as Guillain–Barré syndrome [6]. Guillain–Barré syndrome is an autoimmune disease that affects the peripheral nervous system, potentially causing significant motor impairments in those affected [7, 8]. Upper limb neurorehabilitation for patients with Guillain-Barré syndrome is a constantly evolving field that has seen

[a] e-mail: jgarcia@itesa.edu.mx
[b] e-mail: omar@uaeh.edu.mx (corresponding author)
[c] e-mail: erikart@uaeh.edu.mx
[d] e-mail: juandaniel_ramirez@uaeh.edu.mx
[e] e-mail: ro502288@uaeh.edu.mx

Published online: 22 January 2025

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA
ISSN: 2992-8338

# Passive haptic guidance based on sliding mode control

**Edwin Rodríguez-Hernández[1], Omar A. Domínguez-Ramírez[1], Alejandro Jarillo-Silva [2], Juan D. Ramírez-Zamora[1], Arturo Curiel-Anaya [1]**

*[1]Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería*

*Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. e-mail: (ro502288, omar, juandaniel_ramirez)@ uaeh.edu.mx.*

*[2]Universidad de la Sierra Sur*

*Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México. e-mail: ajarillo@unsis.edu.mx.*

**Abstract:** Human-Robot Physical Interaction (HRpI) systems utilize haptic devices that enable physical connections between virtual or real environments and a human operator, using a high-performance dynamic linkage mechanism, such as a butler-type haptic device. This article proposes the design and experimental implementation of a cartesian second-order sliding mode motion control. To achieve finite-time convergence and perfect trajectory tracking, a time-base generator is designed. The effects of noise associated with operational velocity readings are mitigated using a second-order Butterworth filter. Experimental results are presented with a fully actuated 3DOF Touch haptic interface.

**Keywords:** Haptic guidance, Robot control, Sliding mode control, Time-base generator, Finite-time convergence.

## 1. INTRODUCTION

Los sistemas de interacción física humano-robot (HRpI), consideran el uso de dispositivos hápticos, debido a la naturaleza de su dinámica (baja inercia y fricción articular). El propósito de sus características está enfocado a la estimulación táctil y kinestésica del usuario, aun en condiciones de restringida dinámica de interacción con un ambiente de realidad virtual, o un ambiente dinámico remoto (Ortega et. al., 2017) (Cioi et al., 2011). Un sistema HRpI, puede ser configurado en dos modos de operación: i) Exploración háptica activa (Leonardis et al., 2024), y ii) Guiado háptico pasivo (Burdea, 2008). Diversas contribuciones, de ambas configuraciones son reportadas en la literatura (Camardella et al., 2023) (Choukou et al., 2021) (Ali et al., 2017). La contribución de este artículo está centrada en un novedoso control cartesiano no lineal, robusto, con incertidumbre paramétrica, y dinámica intervenida asociada al usuario en el lazo, y cuya aportación es en tareas de guiado háptico pasivo con propósitos de entrenamiento kinestésico (Domínguez Ramírez et al., 2008) (Parra-Vega et al., 2004) .

### *1.1 Organización del artículo*

En la sección 2, se presenta el modelo cinemático directo de posición, así como la matriz Jacobiana requerida en la estructura del control cartesiano para el dispositivo háptico Touch (3D Systems, 2024); útil en la planificación de movimiento. En esta misma sección, se da a conocer la dinámica del sistema robótico experimental, con los propósitos de estudio previo de simulación y sintonización del control, y su comparativo en desempeño con otros controladores dependientes de la dinámica. La instrumentación de la velocidad articular, asocia componentes de ruido que afectan el desempeño de la plataforma experimental, para ello se presenta el diseño de un filtro Butterworth de segundo orden (Oppenheim et al., 1997). Finalmente, se presenta un bosquejo del diseño de un control cartesiano por modos deslizantes, en cuya referencia nominal se establece la condición de convergencia en tiempo finito a partir de un generador de tiempo base (Domínguez Ramírez et al., 2008). En la sección 3, se presentan los resultados experimentales para una trayectoria de seguimiento que permite evidenciar el desempeño a partir de la manipulabilidad cinemática (Yoshikawa, 1985), se presentan gráficas experimentales de la señal de control y la tarea de seguimiento en el espacio de trabajo (operacional).

## 2. MODELO Y CONTROL PARA GUIADO HÁPTICO

### *2.1 Modelo cinemático*

El análisis de un dispositivo háptico está basado en la consideración de la cinemática y dinámica, en este artículo solo se menciona una parte de la cinemática necesaria para el uso del control, obtenida de (Jarillo-Silva et al., 2009) y se realiza la validación del modelo dinámico del dispositivo háptico Touch, haciendo uso de las propiedades del modelo atribuido a un robot manipulador.

El Modelo Cinemático Directo de Posición (MCDP) establece las relaciones entre las coordenadas operacionales (posición y orientación del efector final) y las variables articulares (proporcionadas por codificadores ópticos), como se muestra en la Ecuación 1.

$$x = f(q), \qquad (1)$$

DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 0 No. 0 (2025) 1–9

# Workload assessment of a bimanual exergaming platform for neurorehabilitation tasks

Melani I. Juárez-Chavero [a], Edwin Rodríguez-Hernández [a], Raúl Villafuerte-Segura [a], Omar A. Domínguez-Ramírez [a,*]

[a] *Licenciatura en Ingeniería en Telecomunicaciones, Área Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

**Resumen**

El uso de plataformas basadas en sistemas exergaming ha contribuido notablemente en 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 artículo de investigación se emplea el protocolo NASA-TLX para evaluar el desempeño y la experiencia de usuario al finalizar la sesión de tratamiento. En este estudio se evalúa un tipo especial de plataforma exergaming bimanual, integrada de un ambiente de realidad virtual de corte médico y dispositivos hápticos mayordomo en lazo cerrado con estrategias de control de fuerza y movimiento. Se analiza el nivel de carga de la tarea a la que es sujeto cada usuario evaluado, y así definir la demanda cognitiva y física, como una actividad previa a 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 has enabled significant advances in the rehabilitation of limbs 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 research article uses the NASA-TLX protocol to evaluate performance and user experience at the end of the treatment session. This study evaluates a special type of bimanual exergaming platform, integrating a medical-grade virtual reality environment and closed-loop haptic devices with force and motion control strategies. The task load level for each evaluated user is analyzed, thus defining the cognitive and physical demands, 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 plataformas de exergaming las cuales combinan ejercicio físico con videojuegos interactivos, han surgido como una alternativa a la rehabilitación convencional, garantizando terapias más dinámicas y personalizadas (Agata *et al.* (2024); Muhammad *et al.* (2023); Candice *et al.* (2024); Gillian *et al.* (2014)).

Este trabajo explora la integración de una plataforma de rehabilitación basada en exergaming con dos dispositivos robóticos (Figura 1), con el objetivo de asistir y mejorar la recuperación de la funcionalidad de las extremidades superiores. El

*Autor para correspondencia: omar@uaeh.edu.mx
**Correo electrónico**: ju403657@uaeh.edu.mx (Melani Ingrid Juarez Chavero), omar@uaeh.edu.mx (Omar Arturo Domínguez-Ramírez), ro502288@uaeh.edu.mx (Edwin Rodríguez Hernández).

**Historial del manuscrito:** recibido el 14/11/2023, última versión-revisada recibida el 12/01/2024, aceptado el 19/01/2024, en línea (postprint) desde el 24/01/2024, publicado el dd/mm/aaaa. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v11i21.10755

# Apéndice E

# Análisis antiplagio

En este apéndice se adjunta el certificado de antiplagio mediante el análisis de esta tesis, generado con la herramienta *Compilatio* (https://www.compilatio.net/es). Este proceso de verificación del porcentaje de plagio en un documento académico es de suma importancia, ya que permite validar y demostrar la originalidad del documento y la información que este contiene permitiendo que instituciones, empresas y lectores puedan confiar en la información plasmada y si se requiere poder darle un adecuado seguimiento al tema investigación.

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**
*magister*

# Tesis_Edwin

**6%** Textos sospechosos

**6%** Similitudes
**0%** similitudes entre comillas
**< 1%** entre las fuentes mencionadas
**10%** Idiomas no reconocidos (ignorado)

**Nombre del documento:** Tesis_Edwin.pdf
**ID del documento:** 6c80440c9d2f93526fd4f579e74acc9370d74f76
**Tamaño del documento original:** 25,33 MB

**Depositante:** Manuel Pineda
**Fecha de depósito:** 13/8/2025
**Tipo de carga:** interface
**fecha de fin de análisis:** 13/8/2025

**Número de palabras:** 34.031
**Número de caracteres:** 203.855

Ubicación de las similitudes en el documento:

## Fuentes principales detectadas

| N° | Descripciones | Similitudes | Ubicaciones | Datos adicionales |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **www.inr.gob.mx**<br>http://www.inr.gob.mx/Descargas/Investigacion/FORMATO-CONSENTIMIENTO-INFORMADO.d...<br>**8 fuentes similares** | 2% | | Palabras idénticas: **2%** (689 palabras) |
| 2 | **formatosdetodo.com**<br>https://formatosdetodo.com/wp-content/uploads/2023/05/formato-de-carta-de-consentimie...<br>**7 fuentes similares** | 2% | | Palabras idénticas: **2%** (648 palabras) |
| 3 | **www.studocu.com** \| Formato- Consentimiento- Informado - Ciudad de México, a ...<br>https://www.studocu.com/es-mx/document/claustro-universitario-de-chihuahua/criminologia...<br>**5 fuentes similares** | 2% | | Palabras idénticas: **2%** (545 palabras) |
| 4 | **ergomedia.isl.gob.cl**<br>https://ergomedia.isl.gob.cl/app_ergo/nasatlx/nasa-tlx.pdf<br>**4 fuentes similares** | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (214 palabras) |
| 5 | **doi.org** \| Application of Virtual Reality-Assisted Exergaming on the Rehabilitation ...<br>https://doi.org/10.3390/jcm12227091 | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (129 palabras) |

## Fuentes con similitudes fortuitas

| N° | Descripciones | Similitudes | Ubicaciones | Datos adicionales |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **dgsa.uaeh.edu.mx**<br>http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/3932/1/AT18826.pdf | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (32 palabras) |
| 2 | **Tesis_Brian__Junio2024.pdf** \| Tesis_Brian__Junio2024 #3bb103<br>Viene de de mi biblioteca | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (27 palabras) |
| 3 | **www.icat.unam.mx**<br>https://www.icat.unam.mx/wp-content/uploads/2025/02/ConsentimientoInformado_ICAT_19... | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (36 palabras) |
| 4 | **es.wikipedia.org** \| Filtro de Butterworth - Wikipedia, la enciclopedia libre<br>https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_Butterworth#:~:text=El filtro de Butterworth es uno de ... | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (37 palabras) |
| 5 | **doi.org** \| Virtual Reality Rehabilitation and Exergames—Physical and Psychological...<br>https://doi.org/10.3390/app11094098 | < 1% | | Palabras idénticas: **< 1%** (20 palabras) |

## Fuentes ignoradas

Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

| N° | Descripciones | Similitudes | Ubicaciones | Datos adicionales |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **Tesis_JD_Doctorado _.pdf** \| Tesis_JD_Doctorado _ #c4a222<br>Viene de de mi grupo | 1% | | Palabras idénticas: **1%** (549 palabras) |
| 2 | **Tesis Chuy (26052025).pdf** \| Tesis Chuy (26052025) #16e7a2<br>Viene de de mi grupo | 1% | | Palabras idénticas: **1%** (546 palabras) |

## Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1 https://doi.org/10.1140/epjs/s11734
2 https://cursos.frogamesformacion.com/pages/blog/las-5-mejores-aplicaciones
3 https://www.inr.gob.mx/Descargas/Investigacion/FORMATO
4 https://godotengine.org/
5 https://code.visualstudio.com/