



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Biomédica

Fecha: 23 de julio de 2024

Autores: Andrea del Pilar Rubiano Giraldo

Nombre del Proyecto de Grado: Integración de interfaces hápticas en la rehabilitación de miembro superior

Director: Hernán Darío Vargas Cardona

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Biomédico.

Camilo Rocha

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

Hernán Darío Vargas Cardona

Dr. Hernán Darío Vargas Cardona
Director Carrera Ingeniería Biomédica

Hernán Darío Vargas Cardona

Dr. Hernán Darío Vargas Cardona
Director Trabajo de Grado

Andrés Felipe Amador

Dr. Andrés Felipe Amador
Co-Director Trabajo de Grado

Andrés A. Navarro Newball

Dr. Andrés Adolfo Navarro Newball
Jurado 1

Valentina Corchuelo Guzmán

MSc. Valentina Corchuelo Guzmán
Jurado 2



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**

Ingeniería Biomédica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Integración de interfaces hápticas en la rehabilitación de miembro superior

Andrea del Pilar Rubiano Giraldo

Director

Dr. Hernán Darío Vargas Cardona

Codirector

Dr. Andrés Felipe Amador

Asesor

MSc. Estefania Montoya Cobo

19 de julio de 2024

Santiago de Cali, 19 de julio de 2024

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Integración de interfaces hápticas en la rehabilitación de miembro superior”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

ANDREA RUBIANO

Andrea del Pilar Rubiano Giraldo

Santiago de Cali, 22 de junio de 2024

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño

Decano

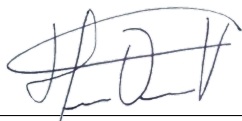
Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

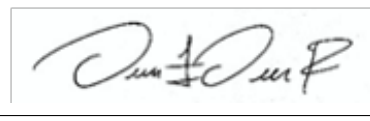
Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Integración de interfaces hápticas en la rehabilitación de miembro superior”, realizado por Andrea del Pilar Rubiano Giraldo, estudiante de Ingeniería Biomédica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Hernán Darío Vargas Cardona
Director Trabajo de Grado



Dr. Andrés Felipe Amador
Co-Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia por la confianza depositada en mí, por creer en mi capacidad para emprender este nuevo camino y por su apoyo incondicional.

Asimismo, deseo expresar mi más sincero reconocimiento a los directores y asesora del proyecto, cuya vasta experiencia y conocimiento en sus respectivos campos han aportado valiosas orientaciones y guía a lo largo del desarrollo del trabajo. Su contribución ha sido esencial para demostrar la naturaleza interdisciplinaria del proyecto.

Mi gratitud también se extiende al personal del Hospital Simulado de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, quienes han proporcionado el espacio y los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Su colaboración ha sido invaluable para su avance y ejecución.

Extiendo un agradecimiento especial a mi amiga Ángela por su inestimable asesoría y por compartir sus conocimientos. Su apoyo ha sido crucial y ha enriquecido significativamente este proyecto.

Finalmente, agradezco al Centro de Juegos de la universidad por su constante acompañamiento y asesoría en temas relacionados con el desarrollo de videojuegos. Su apoyo y conocimientos han sido clave para alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto.

Glosario

Acrónimos y Abreviaturas

<i>AVD</i>	Actividades de la Vida Diaria
<i>LME</i>	Lesiones Musculoesqueléticas
<i>ACV</i>	Accidente Cerebrovascular
<i>AVAD</i>	Años de Vida Ajustados con Discapacidad
<i>OMS</i>	Organización Mundial de la Salud

Resumen

Las actividades de la vida diaria (AVD) conllevan movimientos repetitivos, especialmente del miembro superior, siendo esencial para ejecutar diversas tareas cotidianas. La repetición de ciertos movimientos puede desencadenar Lesiones Musculoesqueléticas (LME), afectando la ejecución de tareas básicas de cuidado personal. Además, tras un Accidente Cerebrovascular (ACV), la funcionalidad del miembro superior puede verse afectada, generando secuelas sensoriales y motoras que comprometen la realización de tareas voluntarias. Para recuperar o mejorar la movilidad del miembro afectado, se recurre a terapias de rehabilitación de miembro superior, determinadas por profesionales de la salud según la condición del paciente. Sin embargo, las terapias convencionales ofrecidas por el sistema de salud presentan limitaciones: son ejercicios repetitivos, carecen de seguimiento y pueden resultar molestos. Esta falta de efectividad contribuye al abandono temprano de las terapias, reflejando una baja adherencia por parte de los pacientes. El abandono de las terapias no solo afecta la recuperación del movimiento, sino que también genera molestias y dolores, impactando en la realización de AVD. La dependencia resultante hacia familiares disminuye la autoestima del individuo.

Este trabajo de grado tiene como objetivo implementar una herramienta que elabore una trayectoria a seguir empleando Curvas de Bézier, diseñar un escenario interactivo para realizar la ejecución de terapias de rehabilitación y finalmente evaluar los resultados obtenidos mediante encuestas a fisioterapeutas que prueben la herramienta.

Como resultado se obtuvo una herramienta de software, compuesta por un escenario virtual interactivo en el que se pueden llevar a cabo ejercicios básicos de rehabilitación del miembro superior, gracias a la interacción que permiten la interfaz háptica Meta Quest 2. Adicionalmente, se obtuvieron resultados sobresalientes en la etapa de validación, realizada con fisioterapeutas y/o profesionales con conocimientos en el área de fisiología.

Palabras Clave: Actividades de la Vida Diaria (AVD), Miembro Superior, Lesión Musculoesquelética (LME), Accidente Cerebrovascular (ACV), Rehabilitación, Adherencia, Curvas de Bézier, Interfaz háptica.

Abstract

The Activities of Daily Living (ADLs) involve repetitive movements, especially of the upper limb, which are essential for performing various routine tasks. Repeating certain movements can trigger Musculoskeletal Injuries (MSI), affecting the execution of basic self-care tasks. Additionally, after a Cerebrovascular Accident (CVA), the functionality of the upper limb can be impaired, leading to sensory and motor sequelae that compromise the performance of voluntary tasks. To recover or improve the mobility of the affected limb, upper limb rehabilitation therapies are prescribed by healthcare professionals based on the patient's condition. However, conventional therapies offered by the healthcare system have limitations: they are repetitive exercises, lack monitoring, and can be cumbersome. This lack of effectiveness contributes to early abandonment of therapies, reflecting low adherence by patients. Abandoning therapies not only affects the recovery of movement but also causes discomfort and pain, impacting the performance of ADLs. The resulting dependence on family members lowers the individual's self-esteem.

This thesis aims to implement a software tool that generates a trajectory using Bézier Curves, design an interactive scenario for performing rehabilitation therapies, and finally evaluate the results obtained through surveys administered to physiotherapists who test the tool.

As a result, a software tool was obtained, composed of an interactive virtual scenario in which basic rehabilitation exercises of the upper limb can be carried out, thanks to the interaction allowed by the Meta Quest 2 haptic interface. Additionally, outstanding results were obtained in the validation stage, carried out with physiotherapists and/or professionals with knowledge in the field of physiology.

Keywords: Activities of Daily Living (ADLs), Upper limb, Musculoskeletal injury (MSI), Cerebrovascular Accident (CVA), Rehabilitation, Adherence, Bézier Curves, Haptic interface.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo General	9
4.2. Objetivos Específicos	9
5. Marco de Referencia	11
5.1. Áreas Temáticas	11
5.2. Marco Teórico	11
5.3. Trabajos Relacionados	13
6. Materiales y Métodos	17
6.1. Materiales	17
6.2. Metodología	17
6.2.1. Diseño de Implementación	17
6.2.2. Diseño y programación 3D en Unity	18
6.2.3. Validación	19
7. Resultados y Discusión	21
7.1. Herramienta desarrollada	21
7.2. Resultados de Implementación	22
7.2.1. Parámetros	24
7.2.2. Objetivo de ejercicios	28
7.3. Validación	30
7.3.1. Retroalimentación visual	33
7.3.2. Retroalimentación háptica	34
7.3.3. Retroalimentación auditiva	35
7.4. Discusión	37
7.5. Video de Funcionamiento	38
7.6. Recomendaciones de uso	39
8. Conclusiones	41
9. Trabajos futuros	43

10. Anexos	45
Anexos	45
Anexo 1 – Encuesta expectativas	45
Anexo 2 – Encuesta percepción herramienta desarrollada.	46
Bibliografía	49

Índice de figuras

7.1. Pantalla de inicio de herramienta desarrollada.	22
7.2. Pantalla de instrucciones de herramienta desarrollada.	23
7.3. Pantalla de menú de la herramienta desarrollada.	24
7.4. Nivel 1 Ancho trayectoria 1	25
7.5. Nivel 1 Ancho trayectoria 2	25
7.6. Nivel 1 Ancho trayectoria 3	26
7.7. Nivel 2 Ancho trayectoria 1	26
7.8. Nivel 2 Ancho trayectoria 2	27
7.9. Nivel 2 Ancho trayectoria 3	27
7.10. Trayectoria - Línea gris.	28
7.11. Trayectoria - Línea verde.	29
7.12. Trayectoria - Línea roja.	29
7.13. Pantalla de finalización del ejercicio.	30
7.14. Resultados encuesta de expectativas - Pregunta 1.	31
7.15. Resultados encuesta de expectativas - Pregunta 2.	31
7.16. Resultados encuesta de expectativas - Pregunta 3.	32
7.17. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 1.	32
7.18. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 2.	33
7.19. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 3.	33
7.20. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 4.	34
7.21. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 5.	34
7.22. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 5.1.	35
7.23. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 6.	35
7.24. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 7.	35
7.25. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 8.	36
7.26. Resultados encuesta de percepción - Pregunta 9.	36
7.27. Objeto señalado con flecha 3D.	37
10.1. Encuesta expectativas	45
10.2. Encuesta percepción herramienta desarrollada.	46
10.3. Encuesta percepción herramienta desarrollada.	47
10.4. Encuesta percepción herramienta desarrollada.	48

Introducción

Las Actividades de la Vida Diaria (AVD) constituyen el núcleo de las rutinas diarias, marcando el grado de independencia y autonomía de cada persona en su interacción con el entorno. El miembro superior, conformado por brazo, antebrazo y mano, desempeña un papel esencial al facilitar acciones cotidianas, desde las más simples hasta aquellas que demandan destreza y precisión [1]. La pérdida de funcionalidad en este conjunto de extremidades conlleva no solo a una limitación física, sino también a una disminución significativa en la calidad de vida y su desarrollo en dentro de la sociedad [2].

Esta problemática se concreta desde diferentes condiciones, como Accidentes Cerebrovasculares (ACV) y/o Trastornos Musculoesqueléticos (TME), afectando a un amplio espectro de la población y generando la necesidad de intervenciones terapéuticas para restaurar parcial o completamente la movilidad afectada [3]. Debido a lo anterior, el concepto de rehabilitación cobra importancia y está definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), como el conjunto de intervenciones destinadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud [4]. No obstante, la efectividad de la rehabilitación depende en gran medida de la adherencia del paciente al tratamiento. La falta de compromiso y seguimiento de las recomendaciones terapéuticas emerge como un desafío global, especialmente en países en desarrollo, donde las tasas de adherencia a largo plazo a menudo caen por debajo del 50% [5]. Este problema adquiere una dimensión crítica en el ámbito de la fisioterapia, donde la motivación del paciente para realizar los ejercicios prescritos se convierte en un factor determinante para el éxito del tratamiento [6].

La implementación de herramientas que aborden los factores clave que llevan al abandono de las terapias de rehabilitación se presenta como una necesidad imperante. Esto no solo beneficiará a los pacientes al mejorar su adherencia a las terapias, sino que también tendrá un impacto positivo en el personal médico. Además, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 3 de las Naciones Unidas, el cual busca garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades [7], este proyecto contribuirá tanto a nivel micro, mejorando la vida individual de los pacientes, como a nivel macro, alineándose con metas globales de bienestar e igualdad.

El objetivo principal está direccionado en el diseño de una herramienta de software mediante la integración de interfaces hápticas y series matemáticas, implementado en el contexto de ejercicios de rehabilitación de miembro superior, con el fin de mejorar la adherencia de las personas.

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar un programa que elabore una trayectoria a seguir empleando Curvas de Bézier con el fin de automatizar ejercicios terapéuticos de miembro superior.
2. Diseñar un escenario interactivo para realizar la ejecución de terapias de rehabilitación.
3. Evaluar los resultados obtenidos mediante encuestas a fisioterapeutas que prueben la herramienta.

El proyecto se desarrolló en el programa Unity, se emplearon las gafas de realidad virtual Meta Quest 2 como interfaz háptica que permite la interacción entre el usuario y el escenario virtual interactivo diseñado.

Planteamiento del Problema

En un mundo en constante evolución, donde la salud y el bienestar ocupan un lugar central, la funcionalidad del miembro superior cobra una importancia crucial en la vida diaria de las personas. Desde actividades fundamentales asociadas al cuidado personal hasta las que requieren un mayor nivel de complejidad, como habilidades para manipular objetos con destreza, las actividades cotidianas determinan la independencia y calidad de vida de un individuo dentro de su entorno social [8]. La ingeniería biomédica, con su enfoque multidisciplinario en la aplicación de principios científicos y tecnológicos para abordar problemáticas en el área de la salud [9], juega un papel vital en la búsqueda de soluciones que mejoren y optimicen la funcionalidad del miembro superior. La integración de conocimientos de morfofisiología, biomecánica, electrónica y terapia de rehabilitación, no solo conduce a la creación de dispositivos y técnicas innovadoras, si no que también plantea desafíos únicos que requieren enfoques ingeniosos y soluciones personalizadas. En este contexto, el presente trabajo de grado se enfoca en la integración de una problemática asociada a la funcionalidad del miembro superior y la ingeniería biomédica, analizando las causas de la falta de adherencia a las terapias de rehabilitación y proponiendo herramientas que buscan mejorar la calidad de vida de las personas afectadas.

Las AVD son aquellas actividades que están orientadas al cuidado propio de la persona, las cuales determinan un nivel de independencia y autonomía en el momento de la ejecución de actividades básicas cotidianas, por lo que son fundamentales para la supervivencia y el bienestar de la persona dentro de una sociedad. Para llevar a cabo gran parte de estas actividades, es indispensable el papel del miembro superior, debido a que comprende brazo, antebrazo y mano, pues la combinación de los movimientos característicos de cada uno de ellos al trabajar en conjunto, cumplen tareas primordiales como lo son cepillarse los dientes, bañarse, peinarse, vestirse, tomar y manipular objetos con la mano [1], lo que implica una limitación del movimiento corporal y con ello a la disminución significativa de la calidad de vida de una persona [2].

Si bien, la funcionalidad del miembro superior se puede ver afectada desde un Accidente Cerebrovascular (ACV) hasta Trastornos Musculoesqueléticos (TME) [10], lo que indica que cualquier persona puede sufrir una disminución en la movilidad de sus extremidades superiores [3] y requerir de terapias de rehabilitación con el fin de recuperar completa o parcialmente el movimiento afectado.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la rehabilitación se define como “un conjunto de intervenciones encaminadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud en la interacción con su entorno” [4], es decir, tiene como objetivo recuperar

o mejorar capacidades que requiere para su día a día, como lo son las físicas, mentales y cognitivas. En este caso, se hace referencia a las capacidades físicas. Sin embargo, la rehabilitación depende en gran parte del compromiso y adherencia del paciente, de lo contrario los resultados no serán los esperados, propiciando una discapacidad motriz sin presentar una mejoría.

La adherencia al tratamiento es la capacidad y/o actitud de una persona para seguir las recomendaciones que le brinda el profesional de salud, bien sea el médico tratante o en el caso de la rehabilitación el fisioterapeuta [11]. Según Ortega J., la falta de adherencia terapéutica a nivel mundial es un problema que repercute directamente en la salud de las personas, siendo los países en desarrollo los más afectados dado que presentan cifras de adherencia terapéutica a largo plazo por debajo del 50% [5]. Por otro lado, el compromiso del paciente con el programa de rehabilitación que requiera, determinará la continuidad y progreso dentro del mismo [6].

Una de las principales causas que afectan directamente a la adherencia del paciente a su fisioterapia, es la motivación que tenga para realizar los ejercicios propuestos por el personal médico. Si bien, la correcta realización de un ejercicio depende en gran medida del paciente [11], por lo que si no se tiene una motivación, lo más probable es que los ejercicios no se realicen a conciencia según las indicaciones del fisioterapeuta, lo que indica que el paciente no está atento a las instrucciones y como consecuencia su proceso de recuperación del movimiento se verá afectado además de las molestias o dolores generados debido a la incorrecta ejecución de los ejercicios [12].

Según [13], las terapias convencionales presentan una efectividad cuestionable, por lo que se plantea como alternativa la implementación de la realidad virtual e interfaces hápticas con el fin de ofrecer tratamientos innovadores que motiven de alguna manera al paciente a realizar los ejercicios propuestos por el fisioterapeuta y así lograr una mayor adherencia al tratamiento [2]. Esta implementación en la realidad virtual le permite al paciente tener una interacción en tiempo real con un entorno gráfico empleando dispositivos sensoriales tanto para la visión como para la audición y la propiocepción [14]. El valor agregado que se obtiene de esta implementación, es la mejora significativa en el grado de interacción que hay entre el paciente y la terapia, lo que disminuye el aburrimiento, fatiga y falta de entusiasmo en el momento de realizar los ejercicios, que como ya se mencionó anteriormente, tienen un impacto negativo en la recuperación del paciente [15].

Adicionalmente, se ha demostrado que las actividades realizadas en entornos de realidad virtual, pueden ser transferidas al mundo real. En [16], se realizó la comparación de dos grupos de participantes, los cuales tenían que llevar de un lado al otro un anillo metálico al rededor de un alambre. El primer grupo había sido entrenado previamente en un entorno de realidad virtual, mientras que el segundo se había entrenado en un sistema real. Como resultado presentan los porcentajes de errores cometidos por cada grupo, siendo el grupo entrenado en un ambiente de realidad virtual el que obtuvo menor porcentaje de errores cometidos en comparación al segundo grupo.

La realidad virtual reúne diferentes técnicas y elementos clave para entrenar las funciones mo-

toras, estimulación repetida, retroalimentación sensorial y motivación del paciente, con el fin de mejorar las habilidades motoras de manera más efectiva que en la vida real. Por otra parte, además de entretener al paciente, lo distraen de los ejercicios que le generen dolor, disminuyendo la ansiedad, incomodidad e insatisfacción del tratamiento [17].

Justificación

Las actividades cotidianas y/o laborales que implican movimientos repetitivos del miembro superior, pueden llegar a generar Trastornos Musculo Esqueléticos [10], que como consecuencia limitan en gran medida la movilidad y destreza, provocando la disminución de su calidad de vida y su participación dentro de la sociedad. Según la OMS, aproximadamente 1710 millones de personas a nivel mundial presentan cuadros clínicos asociados a los trastornos musculoesqueléticos, teniendo en cuenta que pueden llegar a afectar a personas de cualquier edad, ninguno está exento de padecer alguna complicación relacionada con el movimiento de su miembro superior, es decir, cintura escapular, brazo, antebrazo y mano [10].

Por otro lado, los Accidentes Cerebrovasculares desencadenan una afección muscular y nerviosa en un área específica del cuerpo, en la que usualmente se ve involucrado el miembro superior [18]. Lo anterior lleva a presentar cierta dificultad en su movimiento, por lo que es necesario realizar fisioterapia para recuperar parcial o totalmente la movilidad y coordinación de los movimientos del miembro afectado [19]. Las terapias de rehabilitación o fisioterapia deben realizarse para lograr dicha recuperación del movimiento, sin embargo, hay un bajo porcentaje de pacientes que culminan completamente sus terapias de rehabilitación, lo cual indica que hay una baja adherencia de los pacientes hacia este tipo de fisioterapia. Esto genera un impacto negativo en el proceso de recuperación del movimiento del miembro afectado, lo que da pie al deterioro de la salud y la disminución de calidad de vida del paciente.

Autores como Sánchez Villavicencio et. al [20], afirman que los ejercicios de una terapia de rehabilitación deben involucrar funciones cognitivas tales como que sea atractivo, fácil de entender y evitar saturar de información al paciente. Adicionalmente, a partir de su investigación establece que la rehabilitación por medio de la realidad virtual permite el entrenamiento repetitivo que brinda un ambiente multisensorial (sonora, visual y táctil) que favorece los mecanismos de neuroplasticidad [20].

Por tal motivo al implementar una herramienta que permita dar solución a los factores más significativos que llevan a los pacientes al abandono de sus terapias de rehabilitación, resulta importante y beneficioso tanto para el personal médico como para pacientes. A demás, dado que la rehabilitación es un componente que aporta al cumplimiento a objetivo de desarrollo sostenible número 3, el cual establece "Garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades es esencial para el desarrollo sostenible." [7], el impacto a generar va a contribuir en diferentes escalas, desde lo micro, impactando positivamente en la vida de cada persona que lo requiera y a nivel macro

como una meta establecida por las Naciones Unidas enfocada en el bienestar e igualdad de todas las personas sin discriminación alguna.

Se espera que al implementar interfaces hápticas, realidad virtual y métodos numéricos, se logre mejorar la concentración del paciente durante los ejercicios de rehabilitación y con esto la motivación del mismo al realizar los ejercicios, impactando positivamente la adherencia a los tratamientos con el cual se puede alcanzar una mejoría en la calidad de vida del paciente, aumento en su independencia y por ende en su autoestima. Por consiguiente, al mejorar estos factores se están evitando costos y tiempos adicionales de hospitalización y de la misma manera evitando costos adicionales de cuidadores debido al nivel de dependencia que se pueda llegar a adquirir [4].

Gracias a los avances tecnológicos desarrollados en los últimos años es posible llevar a cabo este proyecto, pues la disponibilidad de las nuevas tecnologías de realidad virtual e interfaces hápticas que se pueden emplear, se puede dar solución a las causas que conllevan a la no adherencia de los tratamientos. Adicionalmente, el trabajo interdisciplinar es un componente clave para llegar a construir puntos de vista y crear soluciones acertadas para el problema específico.

Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar una herramienta software mediante la integración de interfaces hápticas y series matemáticas para mejorar la adherencia de las personas en terapias de rehabilitación de miembro superior.

4.2. Objetivos Específicos

1. Implementar un programa que elabore una trayectoria a seguir empleando Curvas de Bézier con el fin de automatizar ejercicios terapéuticos de miembro superior.
2. Diseñar un escenario interactivo para realizar la ejecución de terapias de rehabilitación.
3. Evaluar los resultados obtenidos mediante encuestas a fisioterapeutas que prueben la herramienta.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

- Mathematics - Mathematical models - Geometric modeling.
- Mathematics - Mathematical programming.
- Electronic design automation and methodology - Design methodology - Graphics - Virtual reality.
- Engineering in medicine and biology - Medical Services - Medical treatment - Patient rehabilitation.

5.2. Marco Teórico

- La **Articulación Glenohumeral**, comúnmente conocida como el hombro, es una de las articulaciones más complejas del cuerpo humano, dado su amplio rango de movimiento y demandas funcionales. Esta estructura es la que permite la articulación de la extremidad superior, la cual comprende el brazo, antebrazo y mano, con el tronco. Gracias a esta articulación, el ser humano a diferencia de otros animales, tiene la ventaja de realizar actividades con un gran nivel de destreza [21], como por ejemplo tomar objetos con la mano y realizar agarre en pinza.

Este complejo articular se compone en general por 4 articulaciones, la Glenohumeral (entre cavidad glenoidea de la escapula y cabeza del humero), Acromioclavicular (entre acromion y extremidad acromial), Esternoclavicular (entre esternón y clavícula) y la Escapulotorácica (entre escápula y tórax) [21]. Cada una de ellas cumple un papel muy importante en la ejecución de los diferentes movimientos que puede realizar, los cuales son: flexión y extensión, aducción y abducción, rotación medial y rotación lateral, que al mezclar todos estos movimientos se puede generar un movimiento de circunducción. Si bien, es una articulación con 3 grados de libertad debido a que su movimiento se da en los tres planos (frontal, sagital y transversal) [22] y su rango de movimiento cubre al rededor del 65 % de una esfera [23].

- El **Manguito Rotador** es un complejo de 4 músculos, cada uno con una función específica que en conjunto tienen como objetivo mantener la cabeza del humero acoplada a la cavidad glenoidea. Entre estos músculos se encuentra el subescapular permite la aducción del húmero

y la rotación medial, el supraespinoso inicia la abducción del hombro (los primeros 15°), el infraespinoso participa en la rotación lateral del brazo y el terete menor participa en la rotación lateral [21].

Ahora bien, al verse afectada la articulación Glenohumeral, se verán afectadas indirectamente las funciones de la mano, como por ejemplo la destreza o el agarre en pinza, movimientos clave para desarrollar Actividades Básicas de la Vida Diaria (ABVD), las cuales están estrechamente relacionadas con la supervivencia, es decir, aquellas dirigidas al autocuidado como por ejemplo, la alimentación, bañarse, vestirse [8].

- Los **Accidentes Cerebrovasculares** (ACV) son la cuarta causa de los Años de Vida Ajustados con Discapacidad (AVAD), la cual indica el número de años perdidos debido a una discapacidad, en este caso los ACV [24]. Estos eventos hacen referencia a lesiones del sistema nervioso central como consecuencia de la interrupción del suministro de sangre al cerebro, bien sea por una obstrucción en uno de los vasos sanguíneos (Isquémico) o por una hemorragia intracerebral (hemorrágico) [25]. Dentro de estas lesiones se incluyen secuelas cognitivas, sensoriales y motoras, en las cuales se ven afectadas tareas voluntarias [26].

Una de las consecuencias tras sufrir un ACV, es la deficiencias motoras significativas que conllevan a emplear la extremidad no parética o no afectada por un tiempo prolongado que a su vez genera un debilitamiento muscular en la extremidad parética o afectada, generando un desequilibrio en la musculatura lo que conlleva una asimetría corporal y por consiguiente afecta el equilibrio del cuerpo [27]. Este proceso conduce finalmente al desuso de las articulaciones afectadas y de las estructuras que las conforman, a esto se le denomina falta de uso aprendida, y que si se vuelve habitual, la extremidad afectada puede no reincorporarse a sus actividades funcionales y convertirse en una conducta aprendida, la cual es conocida como uso no aprendido [28].

Después de presentarse un ACV, es muy importante iniciar un proceso de **rehabilitación** funcional en el que se ejecuten ejercicios repetitivos que giren en torno a tareas que desafíen y sean significativas para el paciente [26]. Esto es gracias a la **neuroplasticidad** del cerebro, que es la capacidad del sistema nervioso central de reorganizarse de tal manera que forme nuevas conexiones neuronales en el área contigua a donde ocurrió la lesión [27].

- Las **Lesiones Musculoesqueléticas** (LME) es un término general que incluye cualquier trauma generado a los músculos, huesos, tendones, articulaciones, ligamentos y otros tejidos suaves [29].

- De acuerdo con [30], la **rehabilitación** se define como un proceso integral y continuo de duración limitada con objetivos específicos. Su principal propósito es promover y lograr niveles óptimos de independencia física y habilidades funcionales en personas con discapacidades. Además, busca facilitar la adaptación social, psicológica, vocacional y económica que les permita llevar una vida independiente. Este proceso, aunque es complejo, ayuda a los individuos a recuperar funcionalidades previamente perdidas.
- Según la OMS, el término **adherencia** es «el grado en el que la conducta de un paciente, en relación con la toma de medicación, el seguimiento de una dieta o la modificación de hábitos de vida, se corresponde con las recomendaciones acordadas con el profesional sanitario» [31].
- El término **motivación** presenta diferentes definiciones, sin embargo todas convergen en los términos etimológicos de la palabra, como la fuerza interna que mueve a un organismo a realizar un comportamiento determinado [32].
- Según [12] el concepto de **realidad aumentada** es una extensión de la realidad virtual la cual incluye tanto la realidad como lo virtual, es decir que los objetos virtuales podrán ser dibujados en el espacio real gracias a las operaciones de superposición del ordenador y así mismo puedan fusionarse con las escenas de la vida real.
- El término **háptico** hace referencia a las sensaciones táctil, cinestésico y propioceptiva que percibe el cuerpo, para ello es importante mencionar que involucra conceptos tanto pasivos receptivos como activos explorativos, es decir que requieren un sistema bidireccional de entrada y salida [33]. Las **interfaces o dispositivos hápticos** son aquellos que le permiten al usuario tener una interacción con un ambiente virtual, el cual brinda una sensación de tacto proporcional a la acción realizada [14].

5.3. Trabajos Relacionados

Herramienta de entrenamiento virtual en 2D para rehabilitación de motricidad fina de miembro superior con incorporación de un dispositivo háptico [14].

Se presenta una aplicación de software para la rehabilitación de motricidad fina en miembro superior. El sistema consta de un ambiente virtual en 2 dimensiones (2D), en el cual se llevan a cabo distintos ejercicios de rehabilitación que además cuenta con una base de datos la cual tiene la capacidad de almacenar información sobre el desempeño del usuario previamente registrado. El ejercicio consiste en guiar un anillo a través de una trayectoria curvilínea en un ambiente virtual empleando una interfaz háptica. El sistema presenta aspectos innovadores como lo es la implementación de un campo de fuerza con un nivel de asistencia previamente programado el cual ayuda al usuario a

centrar el anillo al rededor de dicha trayectoria a seguir, por otro lado la generación automática de las trayectorias empleando Curvas de Bézier y finalmente la cuantificación del seguimiento realizada por el usuario sobre la trayectoria.

Using augmented reality gaming system to enhance hand rehabilitation [12].

Se desarrolló un sistema que implementaba realidad aumentada, un dispositivo de detección de presión del aire con el concepto de aprendizaje basado en juegos. El sistema se diseñó bajo las funciones de:

1. Alta interactividad en la cual las fuerzas ejercidas por la mano del usuario son captadas y procesadas mediante el ordenador, brindando información relevante al usuario en tiempo real.
2. Alta naturaleza inmersiva, que consiste en que el usuario tenga una entidad que permita la comunicación usuario-ordenador.
3. Alto valor de entretenimiento, en el cual usuario juega e intenta superar los diferentes obstáculos del juego durante el proceso de rehabilitación mientras se divierte.

El sistema consta de un computador, dispositivo que sensa los cambios de presión, una pelota de goma que al ser presionada presentará cambios de presión y estos serán detectados por el sensor que posteriormente enviará estos datos al computador en donde serán procesados y se verán reflejados en el juego.

Resultados preliminares sobre Interacción Háptica en Laberintos Virtuales, con propósitos de diagnóstico en pacientes con discapacidades Neuropsicológicas [34].

Se presenta experimentaciones preliminares sobre interacción háptica con laberintos virtuales basados en la retroalimentación kinestética dinámica deformable. El objetivo de esta investigación es mejorar el rendimiento de pacientes que tienen discapacidades neurológicas, neuropsicológicas o psicológicas mientras se sumergen en un entorno virtual, empleando un dispositivo táctil, en este caso, un volante. Se proponen enfoques de rehabilitación que se apoyan en la orientación táctil y el entrenamiento a distancia, mediante el uso de algoritmos de control no lineal para lograr un seguimiento preciso. Para ello proponen técnicas de rehabilitación basadas en una guía háptica y entretenimiento remoto mediante algoritmos de control no lineal para el seguimiento.

Using Haptics Technology to Deliver Motivational Therapies in Stroke Patients: Concepts and Initial Pilot Studies [35].

En el 2001 Loureiro y colegas realizan un el prototipo GENTLE/S cual consta de un armazón con dos sillas, un mecanismo para dar soporte al hombro, un mecanismo de conexión para la muñeca, dos computadores, una pantalla grande con altavoces, una mesa de trabajo, un trabajo y un brazo de interfaz háptica 3DOF (Haptic Master). Fue implementado en pacientes que habían sufrido un ACV, los cuales debían realizar tareas orientadas a objetivos y basadas en técnicas de visualización de realidad virtual, en las cuales los terapeutas podrían crear nuevos patrones de movimiento en dichos entornos virtuales 3D y así mismo definir el tipo de relación entre los objetos del entorno.

Estos estudios demostraron que la mayoría de los pacientes respondieron positivamente a la incorporación de señales visuales y hápticas. Adicionalmente, se encontró que el sistema motiva a los pacientes hemipléjicos a realizar el ejercicio durante un tiempo más prolongado en comparación a la terapia tradicional.

Computer games as a means of movement rehabilitation [36].

En este artículo se empleó un juego en el cual se requería el movimiento de una palanca que sería controlada por el brazo de un niño con parálisis de Erb. Para ello se emplearon contrapesos que facilitarían el movimiento pero se contrarrestarían los movimientos compensatorios patológicos. Para el sistema emplearon un dispositivo especial de entretenimiento que empleaba un ordenador compatible con IBM, un convertidor analógico digital y controles diseñados según la necesidad. En el ordenador se presentaba la información audiovisual al paciente que se encontraba sentado a un metro de la pantalla. La tarea consistía en enfocar durante 3 segundos dentro de un cuadro amarillo al submarino que aparecía en uno de los 15 cuadros de la pantalla, a medida que avanzaba el tiempo, el submarino aumentaba su tamaño para dar la impresión de que se estaba acercando. Se requería de precisión para mantener enfocado al submarino durante el periodo de tiempo determinado, si se cumplía con el objetivo, aparecía una explosión en pantalla, de lo contrario aparecía que el submarino había cruzado sus defensas. La implementación del sistema presentó mejoras sustanciales en cuanto al control del brazo afectado, por lo tanto, el uso de estas técnicas aprovecha la motivación del niño para alcanzar el éxito, presenta ventajas en comparación con las terapias tradicionales las cuales se fundamentan en la ejecución de movimientos pasivos y repetitivos y en el manejo doloroso de la extremidad afectada. Como resultado lograron que el niño realizara movimientos espontáneos y voluntarios en lugar de enfocarse en las acciones en si mismas.

Los trabajos anteriormente mencionados implementan diferentes estrategias de retroalimentación, bien sea mediante el uso de interfaces hápticas o pantallas de computadores como retroalimentación visual. Sin embargo, la herramienta desarrollada presenta ventajas considerables frente a los trabajos relacionados citados, debido a que la herramienta implementa 3 diferentes estrategias de retroalimentación activa (retroalimentación háptica, auditiva y visual), que en conjunto le brinda una experiencia agradable y amigable al usuario durante la ejecución de los ejercicios. Adicionalmente, gracias a la implementación de las Curvas de Bézier en la generación de las trayectorias a seguir en cada ejercicio, facilita la automatización, ejecución, seguimiento y evaluación de los ejercicios realizados por el usuario.

Materiales y Métodos

6.1. Materiales

- Computador con características como tarjeta gráfica, memoria RAM, procesador y disco duro.
- **Interfaz háptica:** Gafas y controladores Meta Quest 2 que permiten interactuar con escenarios virtuales.
- **Software Unity:** Unity es una plataforma de desarrollo de juegos desarrollada por Unity Technologies. Es un motor que proporciona un sistema integral para diseñar escenas de juegos o aplicaciones en 2D y 3D. Unity ofrece un gran conjunto de herramientas y características que permiten a los desarrolladores crear experiencias interactivas e inmersivas en una amplia gama de plataformas, incluidas PC, consolas, dispositivos móviles y sistemas de realidad virtual.
- **Lenguaje C#:** Se empleó el lenguaje de programación C# a lo largo del diseño y elaboración del escenario interactivo en los scripts de Unity.
- Encuestas realizadas en Microsoft Forms.

6.2. Metodología

El proyecto se llevó a cabo en 3 fases, Implementación, Programación-Diseño 3D y Evaluación, de acuerdo a los objetivos específicos planteados.

6.2.1. Diseño de Implementación

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico, implementación de la herramienta que elabora Curvas de Bézier, se investigó y se programó el modelo matemático en un script de C Sharp, el lenguaje empleado en el programa Unity. Las Curvas de Bezier están determinadas a partir del siguiente modelo matemático 6.1:

Para una curva de Bézier de grado $n - 1$, la fórmula es:

$$\mathbf{B}(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i \mathbf{P}_i, \quad t \in [0, 1] \quad (6.1)$$

Donde:

- $\mathbf{B}(t)$ es el punto en la curva para un valor dado de t .
- $\binom{n}{i}$ es el coeficiente binomial, que se calcula como $\frac{n!}{i!(n-i)!}$.
- \mathbf{P}_i son los puntos de control de la curva.
- t es el parámetro que varía entre 0 y 1.

En el caso específico de una curva de Bézier cúbica (grado 3), la fórmula se simplifica a:

$$\mathbf{B}(t) = (1-t)^3\mathbf{P}_0 + 3(1-t)^2t\mathbf{P}_1 + 3(1-t)t^2\mathbf{P}_2 + t^3\mathbf{P}_3, \quad t \in [0, 1] \quad (6.2)$$

Aquí \mathbf{P}_0 es el punto inicial, \mathbf{P}_1 y \mathbf{P}_2 son los puntos de control y \mathbf{P}_3 es el punto final de la curva. De esta manera, asignando unos puntos específicos, se genera una curva, bien sea lineal (grado 1 con $n = 2$), cuadrática (grado 2 con $n = 3$) o cúbica (grado 3 con $n = 4$) que posteriormente se convertirá en la trayectoria a seguir de los ejercicios para la terapia de rehabilitación de miembro superior.

Para efectos prácticos de la implementación del modelo matemático en el escenario interactivo, se generan curvas lineales (ver Fig. 7.4) y cúbicas (ver Fig. 7.7), debido a que tanto las curvas cuadráticas como las cúbicas presentan características similares.

6.2.2. Diseño y programación 3D en Unity

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico, asociado a la creación del escenario virtual interactivo en el cual se desarrollarán los ejercicios de rehabilitación de miembro superior, inicialmente se configuró la interfaz según las necesidades del proyecto.

Posteriormente se realizó la búsqueda de diferentes Assets (objetos) que fueran adecuados y cumplieran con características específicas para ambientar el escenario. Dado que el recurso computacional era limitado, se buscaba importar Assets que tuvieran una calidad estándar y la cantidad de polígonos no fuera elevada, ya que esto aumenta el peso, compromete tiempo de computo y afecta la ejecución del juego.

Después, se programó cada Asset dependiendo de su función dentro del juego, lo que implica tanto programación 3D como en código C# Sharp.

6.2.3. Validación

Finalmente, para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, asociado a la evaluación de los resultados obtenidos, se realizó la muestra de la herramienta desarrollada a profesionales en el área de fisioterapia y fisiología. Posteriormente, se les realizó una encuesta para conocer los diferentes puntos de vista, recomendaciones y posibles mejoras sobre la herramienta desarrollada. El material de las encuestas se puede consultar en el Anexo 1 y 2.

El tipo de estudio realizado es longitudinal ya que se recopila la información en un período de tiempo determinado. Este comienza con la presentación del consentimiento informado, seguido de una encuesta sobre las expectativas de la herramienta desarrollada. Posteriormente, se prueba la herramienta y finalmente, el participante completa una encuesta sobre la percepción de la herramienta probada.

Finalmente, se tuvo en cuenta la retroalimentación brindada por los profesionales en el área y se realizaron los ajustes y respectivas correcciones.

6.2.3.1. Selección de muestra

Para la selección de muestra se tuvo en cuenta que las personas fueran docentes vinculados a la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, pertenecientes al departamento de Ciencias Básicas de la Salud. Como criterio de exclusión se tuvo en cuenta que fueran fisioterapeutas y/o profesionales con conocimientos en fisiología. Como resultado se obtuvo una población de 4 individuos, quienes voluntariamente accedieron a hacer parte de la muestra y evaluación de la herramienta desarrollada.

6.2.3.2. Consentimiento informado

Se elaboró un documento de consentimiento informado, el cual presenta el objetivo de la etapa de validación del proyecto, las preguntas para garantizar la salud y seguridad del participante según el manual de seguridad y garantía Meta Quest 2, así como posibles molestias o síntomas relacionados al uso del dispositivo. Finalmente se presenta la autorización por parte del participante para el manejo confidencial de los datos con fines de investigación.

Este documento se comparte con el participante antes de que realice la primera encuesta, una vez se obtenga la autorización por parte del participante, se procede a realizar las encuestas y la muestra de la herramienta desarrollada.

6.2.3.3. Encuestas

Se elaboraron 2 encuestas en la plataforma de Microsoft Forms para la etapa de validación del proyecto. Las encuestas son de tipo mixto, es decir, contiene preguntas de tipo cualitativo y cuantitativo. La primera encuesta consta de 3 preguntas, la cual se realiza antes de que el participante pruebe la herramienta desarrollada. Posteriormente, el participante tiene la oportunidad de utilizar la herramienta, explorarla y llevar a cabo los diferentes ejercicios propuestos. Una vez se ha realizado la prueba de la herramienta desarrollada, se llena la segunda encuesta, la cual está compuesta de mínimo 10 y máximo 14 preguntas, de acuerdo con las respuestas de cada participante.

Resultados y Discusión

7.1. Herramienta desarrollada

La herramienta desarrollada está compuesta por 2 componentes, la interfaz háptica (Meta Quest 2) y el Juego (escenario interactivo virtual). Por un lado, la interfaz háptica permite la interacción del usuario, de manera bidireccional, dentro del escenario interactivo diseñado. Por otro lado, en el Juego se encuentran todos los objetos interactivos con los que se ejecutan los ejercicios propuestos de rehabilitación de miembro superior.

La herramienta desarrollada está dirigida a Rangos de Movimiento del miembro superior y movimientos activos, por lo que NO involucran peso y están enfocados en ejercitar, coordinar y activar los diferentes músculos implicados en un movimiento. Estos Rangos de Movimiento están delimitados por las trayectorias a seguir mientras se sujeta un objeto interactivo en el escenario diseñado y se lleva hasta el lugar indicado (socket correspondiente). La sujeción de los objetos dentro del escenario interactivo se realiza mediante los controladores de las Meta Quest 2, más específicamente dejando presionado uno de los botones del mismo y para soltarlo basta con dejar de presionar el botón.

El escenario interactivo está diseñado para que el paciente realice los ejercicios propuestos en un escenario cotidiano mientras permanece sentado, con el fin de evadir riesgos asociados al vértigo y/o desorientación del paciente. Por esta razón, los movimientos de los ejercicios propuestos están enfocados en dirección horizontal entre un rango de 0° a 180° y en dirección vertical de 90° a 180° aproximadamente.

Dado el contexto socio-cultural, el acceso a las tecnologías de realidad virtual e interfaces hápticas, es limitado debido al costo elevado, se espera que la herramienta desarrollada esté disponible en las diferentes IPS (Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud) o centros de rehabilitación que decidan implementar la herramienta como complemento a las terapias de rehabilitación de miembro superior convencionales.

7.2. Resultados de Implementación

La herramienta cuenta con una escena inicial, la cual presenta opciones a seleccionar, Instrucciones, Jugar y Salir, como se puede observar en la Fig. 7.1.



Figura 7.1: Pantalla de inicio de herramienta desarrollada.

Al seleccionar el botón de **Instrucciones**, aparecen en pantalla las funciones de las teclas a utilizar, así como las indicaciones básicas para llevar a cabo los ejercicios propuestos, ver Fig. 7.2.



Figura 7.2: Pantalla de instrucciones de herramienta desarrollada.

Si se selecciona el botón **Jugar**, se carga inmediatamente la escena del juego. Antes de empezar, aparece en pantalla un menú en el cual se deben seleccionar 2 variables: el nivel (1 o 2) y la trayectoria (1, 2 o 3), como se muestra en la Fig. 7.3. Dependiendo de la condición del paciente, el profesional de salud tiene la posibilidad de seleccionar el nivel y la trayectoria, por lo que exigirá una mayor precisión por parte del paciente a medida que disminuya el grosor de la línea de la trayectoria.



Figura 7.3: Pantalla de menú de la herramienta desarrollada.

7.2.1. Parámetros

El nivel está asociado al grado de la Curva de Beziér que se mostrará, es decir, nivel 1 corresponde a la curva lineal, la cual mostrará una línea recta y nivel 2 corresponde a la curva cúbica, la cual mostrará una curva de mayor dificultad. Por otro lado, la trayectoria hace referencia al grosor que tendrá la curva dibujada: Trayectoria 1 = 0.1, Trayectoria 2 = 0.075 y Trayectoria 3 = 0.5 (unidad de medida en Unity). Este último parámetro determinará qué tan ancha será la trayectoria a seguir en el ejercicio. En este orden de ideas, la Trayectoria 1 refiere a un nivel fácil, la Trayectoria 2 a un nivel intermedio y por último, la Trayectoria 3 a un nivel avanzado.

De acuerdo a lo anterior, se pueden obtener 6 diferentes combinaciones de niveles de dificultad. Como se puede observar en las Figuras 7.4, 7.5, 7.6, se muestran 3 diferentes opciones de dificultad asociadas al Nivel 1, así como las otras 3 diferentes opciones asociadas al Nivel 2, como se muestran en las Figuras 7.7, 7.8, 7.9.

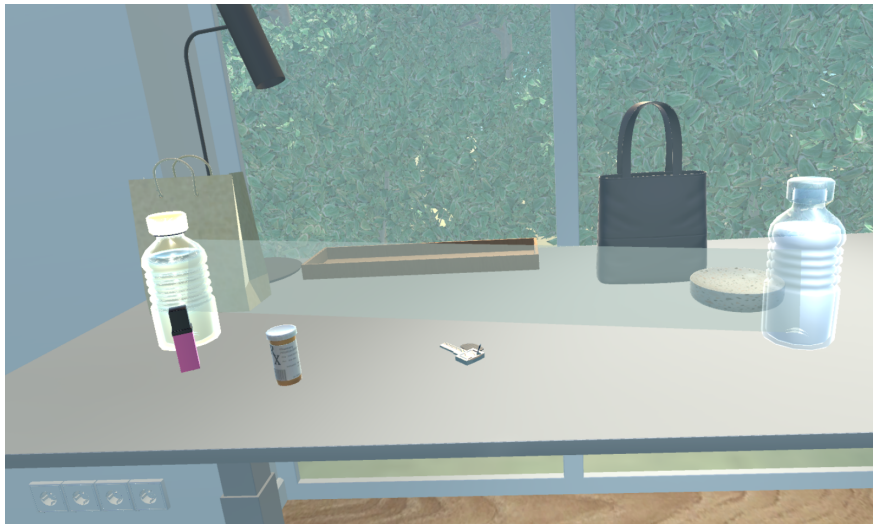


Figura 7.4: Nivel 1 Ancho trayectoria 1



Figura 7.5: Nivel 1 Ancho trayectoria 2



Figura 7.6: Nivel 1 Ancho trayectoria 3

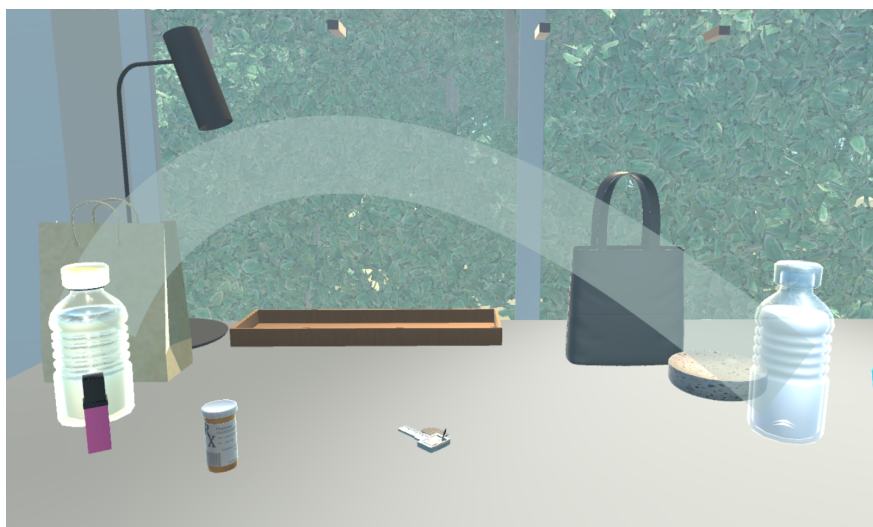


Figura 7.7: Nivel 2 Ancho trayectoria 1

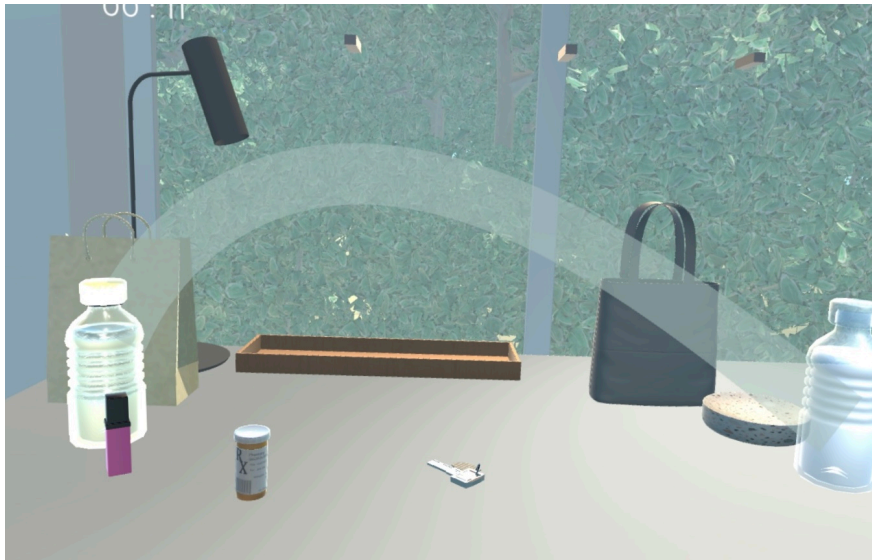


Figura 7.8: Nivel 2 Ancho trayectoria 2

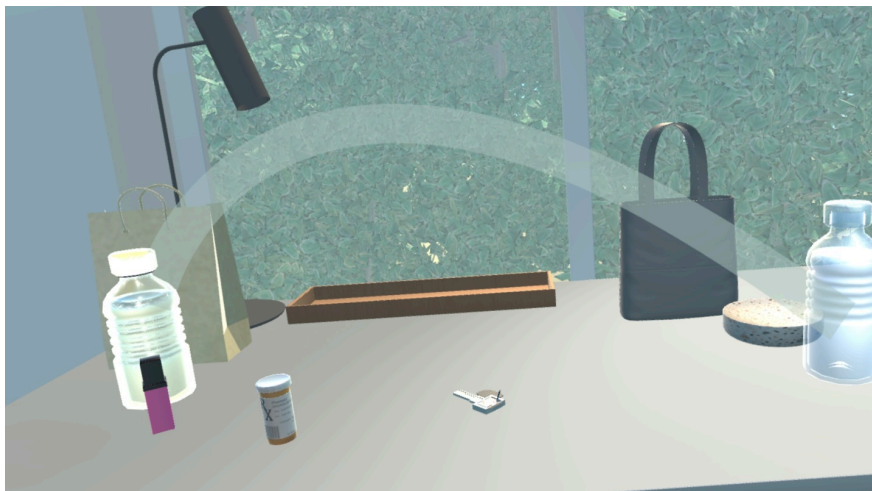


Figura 7.9: Nivel 2 Ancho trayectoria 3

Finalmente, como se puede ver en la Fig. 7.3, una vez se elijan estos parámetros, se puede presionar el botón **Iniciar** con el cual se dará inicio a los ejercicios de la escena. Los objetos se irán iluminando y emitiendo un sonido proveniente del objeto con el cual se debe interactuar. Al mismo tiempo la línea y el socket correspondiente aparecerán en la escena. Con la flecha azul que se

encuentra en la esquina superior izquierda, se regresa a la pantalla de inicio en caso de ser necesario.

7.2.2. Objetivo de ejercicios

El objetivo de los ejercicios es agarrar el objeto indicado y sujetarlo mientras se sigue la trayectoria hasta el socket indicado. Durante ese momento, se le notifica al paciente mediante efectos visuales, auditivos y hápticos, como mecanismo de retroalimentación activa.

Como **retroalimentación visual**, se presenta inicialmente la trayectoria con un color gris (Fig. 7.10) indicando el camino, una vez se esté agarrando el objeto y se esté siguiendo la trayectoria, la línea tomará un color verde (Fig. 7.11) y en el caso en que se salga de la línea, esta tomará un color rojo (Fig. 7.12). Por otro lado, como **retroalimentación háptica**, en el caso cuando el objeto sujetado no esté siguiendo la trayectoria, el controlador con el cual se está sujetando el objeto empezará a vibrar mientras la línea esté roja, alertando al paciente que se ha salido de la trayectoria.

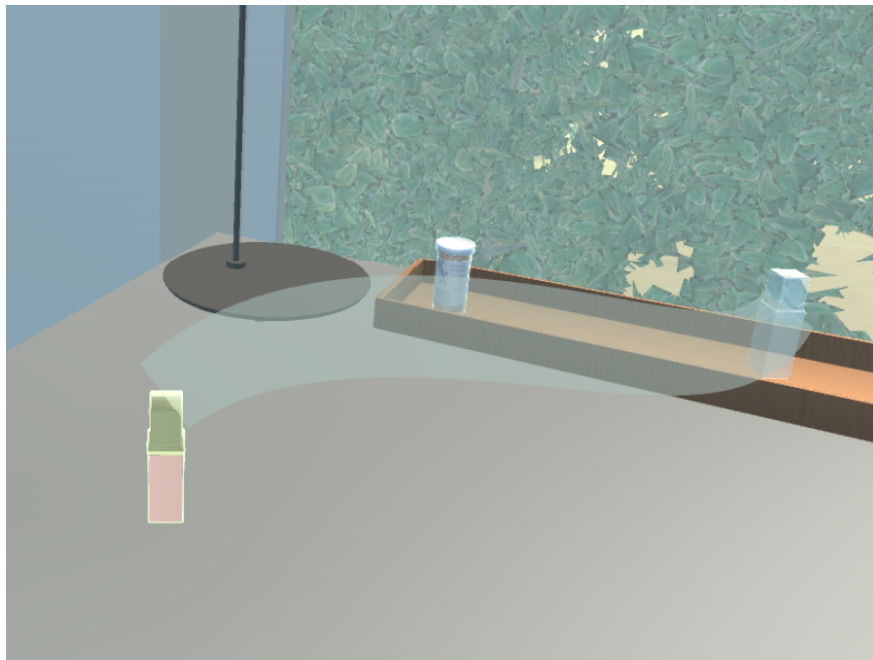


Figura 7.10: Trayectoria - Línea gris.

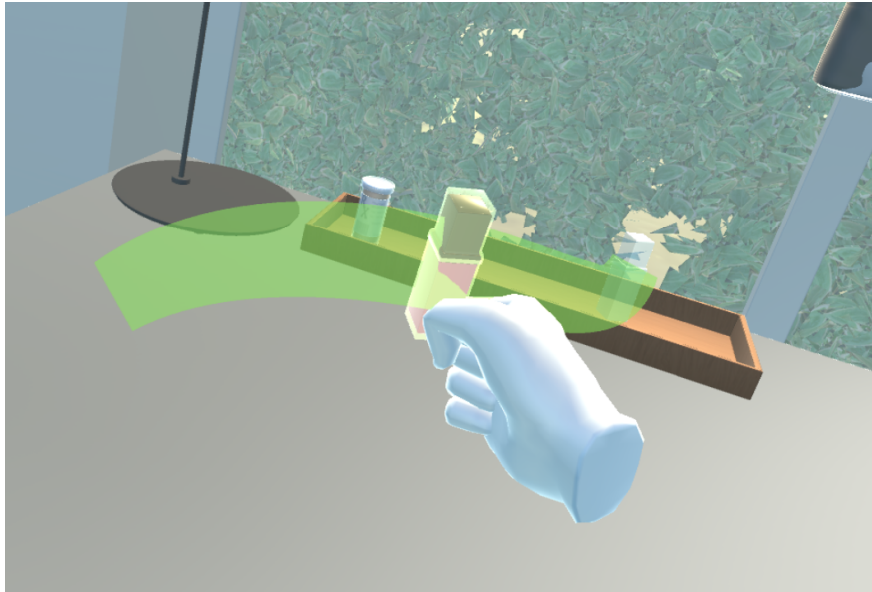


Figura 7.11: Trayectoria - Línea verde.

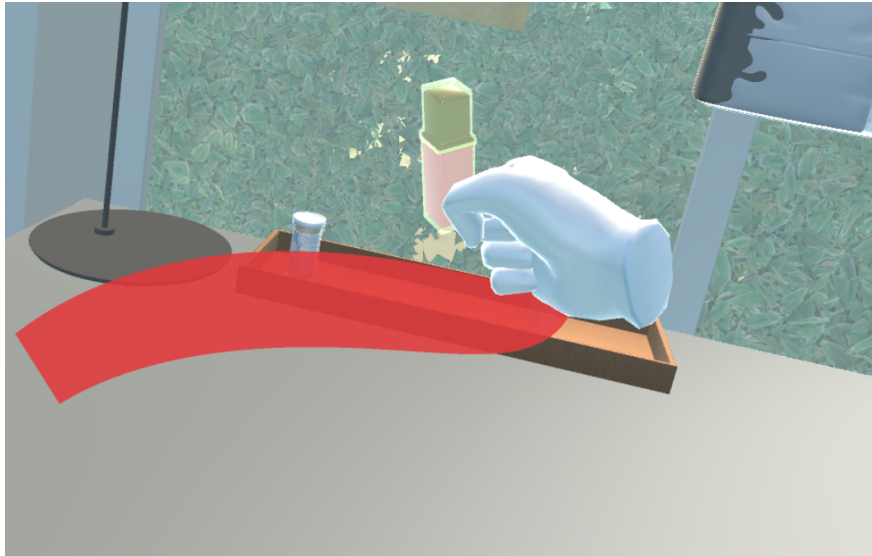


Figura 7.12: Trayectoria - Línea roja.

En la esquina superior izquierda se encuentra un cronómetro (ver Fig. 7.3), el cual muestra el tiempo transcurrido desde que se dió inicio al juego, el tiempo se detiene cuando se hayan comple-

tado todos los ejercicios propuestos. Al finalizar, se muestra en pantalla la información del ejercicio que se realizó, más específicamente la cantidad de veces que el usuario se salió de las trayectorias y el tiempo que se tardó en realizar los ejercicios de la escena, como se ilustra en la Fig. 7.13. En la pantalla se encuentran dos botones, el botón de "**Volver a jugar**", que al presionarlo redirige a la pantalla del menú justo antes de iniciar el juego. Finalmente se encuentra el botón de la flecha azul, en la esquina inferior izquierda, que al presionarlo regresará a la pantalla inicial del juego.

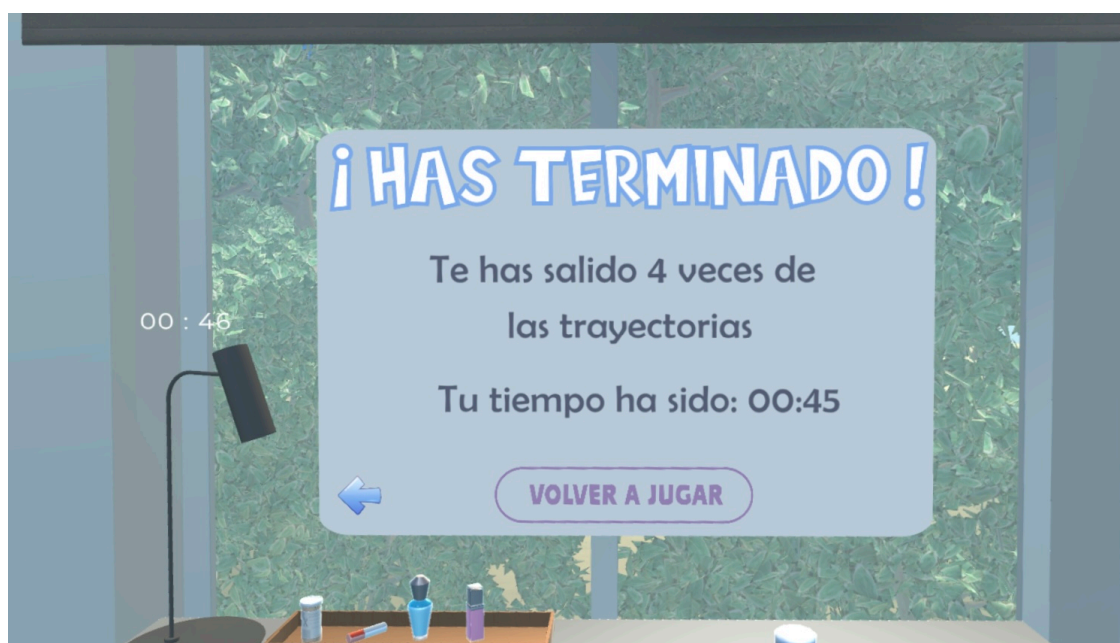


Figura 7.13: Pantalla de finalización del ejercicio.

7.3. Validación

La información recolectada acerca de las expectativas de la integración de interfaces hápticas en la rehabilitación de miembro superior, se puede ver a continuación en las Figuras 7.14, 7.15 y 7.16.

1. ¿Cuales son sus expectativas acerca de la implementación de tecnologías enfocada a la terapia de miembro superior?

4 Respuestas

ID ↑	Nombre	Respuestas
1	anonymous	Optimizar terapias de rehabilitación por problemas en miembros superiores donde los pacientes puedan adaptarse más rápido y en mejor medida a la terapia. Creo que se puede lograr ya que al usar herramientas tecnológicas el paciente puede entrar en un contexto mejor de su enfermedad, adaptarse y adherirse a la terapia y culminarla de la mejor manera posible para obtener unos resultados mucho más beneficiosos en la rehabilitación a causa de la enfermedad.
2	anonymous	mejorar la recuperación de los movimientos activos del miembro superior
3	anonymous	Que tengan una respuesta positiva frente a la rehabilitación del paciente, que este pensado muy personalizado según su condición y que le permita adherencia al tratamiento.
4	anonymous	-Conocer cómo se pueden integrar las tecnologías con la rehabilitación de MMSS. -Tener la capacidad de ubicarme en un ambiente en 3D. -Entender cómo los movimientos que son sensatos a partir de los controles se reflejan en el ambiente 3D.

Figura 7.14: Resultados encuesta de expectativas - Pregunta 1.

2. Por favor, clasifique los ítems de acuerdo al nivel de mejoría que considere que puede generar la implementación de tecnologías en la terapia convencional (siendo 1 el de mayor impacto y 4 el de menor impacto).



Figura 7.15: Resultados encuesta de expectativas - Pregunta 2.

3. ¿Qué aspectos considera que son importantes de la retroalimentación activa que puede ofrecer la herramienta?

4 Respuestas

ID ↑	Nombre	Respuestas
1	anonymous	Podrían informar a los pacientes si la manera en que desarrolla los movimientos son los adecuados, para así intentar esforzarse y de manera consciente obligar al sistema neuromotor, a optimizar los movimientos, de esta manera se podrían realizar de una forma optima, coordinada y la terapia puede tener un desenlace prometedor.
2	anonymous	no se
3	anonymous	Precisión en el movimiento, fuerza ejercida, mejoría o no entre una y otra sesión.
4	anonymous	-Que tan fácil fue entender las instrucciones (si son claras y sencillas de entender) - Comodidad con los controles y el uso de las gafas -Complejidad de los movimientos -Ambiente 3D motivador

Figura 7.16: Resultados encuesta de expectativas - Pregunta 3.

Una vez el participante se realiza la prueba de la herramienta, se realizó el diligenciamiento de la segunda encuesta de percepción de la herramienta probada, en la cual se recopilaron las siguientes respuestas como se muestran a continuación en las Figuras 7.17, 7.18, 7.20, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25 y 7.26.

1. ¿Los ejercicios presentados en el entorno virtual cumplen con las **características** de los ejercicios básicos implementados en una terapia convencional?

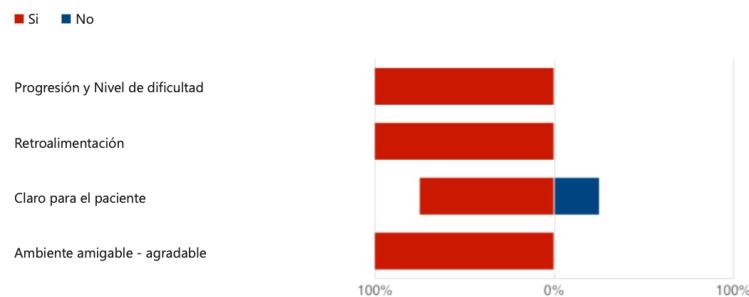


Figura 7.17: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 1.

2. ¿Los ejercicios presentados en el entorno diseñado cumplen con los **objetivos** de los ejercicios básicos de una terapia convencional de miembro superior?



Figura 7.18: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 2.

3. ¿Los **rangos de movimiento** de los ejercicios presentados son adecuados para terapias básicas de rehabilitación de miembro superior (ángulos)?

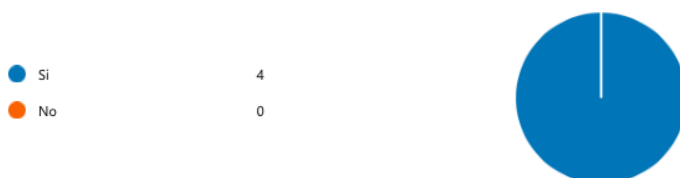


Figura 7.19: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 3.

7.3.1. Retroalimentación visual

Como estrategia de retroalimentación visual, se programó para que en el momento en el que el objeto indicado esté en contacto con su trayectoria, esta tome un color verde, indicando que el ejercicio se está realizando correctamente, de lo contrario, si el objeto no está en contacto con la trayectoria, toma un color rojo, notificando al usuario que no está siguiendo la trayectoria adecuadamente.

4. ¿Las estrategias de **retroalimentación visual** implementadas son adecuadas? (Color de la línea, iluminación de objeto)



Figura 7.20: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 4.

7.3.2. Retroalimentación háptica

Como estrategia de retroalimentación háptica, se emplea la función de vibración de los controladores. En el contexto del proyecto, se programó para que cada vez que el objeto en cuestión no esté en contacto con la trayectoria, el controlador con el cual se está realizando la interacción, genere vibraciones. De esta manera el usuario es alertado de que el ejercicio no se está realizando correctamente.

5. ¿Las estrategias de **retroalimentación háptica** implementadas son adecuadas? (Vibración de controladores)



Figura 7.21: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 5.

5.1. ¿Por qué?

1 Respuestas

ID ↑	Nombre	Respuestas
1	anonymous	Creo que no es que no sean adecuadas sino que no son de fácil acceso por el equipo que se requiere. Una limitante sería en el uso de personas que tengan algún grado de discapacidad, y no puedan comprender las indicaciones que se dan.

Figura 7.22: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 5.1.

7.3.3. Retroalimentación auditiva

Como parte de retroalimentación auditiva, cada objeto emitirá un sonido 3D, es decir, que la persona podrá percibir desde donde proviene el sonido. Lo anterior con el fin de guiar al usuario indicando cual es el objeto con el que se debe ejecutar el siguiente ejercicio.

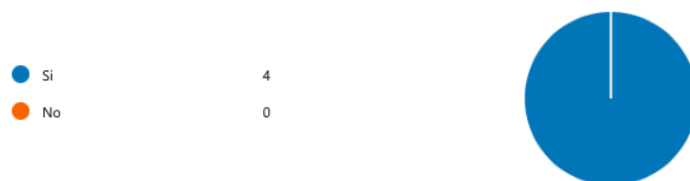
6. ¿Las estrategias de **retroalimentación auditiva** implementadas son adecuadas? (Sonido por objeto)

Figura 7.23: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 6.

7. ¿La estrategia de los diferentes grosores de trayectoria es adecuada para ejercitar la precisión (implica coordinación y tono muscular) del miembro superior?



Figura 7.24: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 7.

8. ¿Qué otros aspectos considera importantes incluir para este tipo de tecnologías en la terapia de rehabilitación?

4 Respuestas

ID ↑	Nombre	Respuestas
1	anonymous	Es importante que el usuario de la tecnología tenga un tiempo para familiarizarse con los dispositivos y las señales que brindan, por ejemplo la vibración, el cambio de color de las líneas y los sonidos. También, me parece importante explicar al usuario o dar un contexto del por qué la actividad tiene los grado de complejidad, es decir, cómo se asocia cada agarre o cada trayecto con las actividades de la vida diaria
2	anonymous	Mejorar un poco cómo diferenciar o familiarizar a la persona con la profundidad de las curvas, ya que a veces uno piensa que está siguiendo correctamente la trayectoria pero vibra, y resulta que la curva está hacia el paciente entonces no se identifica bien esa percepción de profundidad.
3	anonymous	mencionar los movimientos que se realizan en cada ejecución
4	anonymous	Se podrían implementar mas ejercicios em diagonales.

Figura 7.25: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 8.

9. De 1- 5, ¿cuál considera que fue el nivel de satisfacción con la herramienta probada?

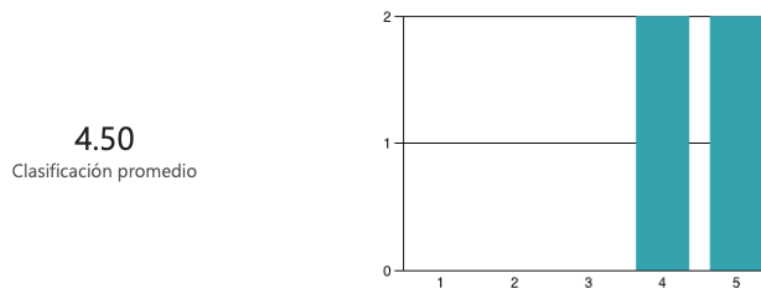


Figura 7.26: Resultados encuesta de percepción - Pregunta 9.

De acuerdo a las pruebas realizadas, se evidenció cierta dificultad por parte del participante para identificar los objetos que se iban iluminando, según el orden de los ejercicios. Para dar solución al problema presentado, se agregó una flecha 3D de color amarillo, la cual aparece encima del objeto con el cual se debe interactuar. Adicionalmente, la flecha cuenta con una animación, se mueve hacia arriba y hacia abajo, señalando el objeto al usuario, como se puede observar en la Figura 7.27.



Figura 7.27: Objeto señalado con flecha 3D.

7.4. Discusión

Las expectativas de los participantes frente a la integración de interfaces hápticas en la rehabilitación de miembro superior, convergen en el hecho de obtener una mejoría en cuanto al movimiento del miembro superior afectado, así como una mejoría en la adherencia al tratamiento, como se puede evidenciar en la Figura 7.14. Adicionalmente, se los resultados hacen énfasis en que los ejercicios sean personalizados dependiendo de la condición y/o diagnóstico del paciente.

Por otro lado, los participantes consideraron que el aspecto de mayor impacto tras la implementación de tecnologías en la rehabilitación de miembro superior son los rangos de movimiento, seguido de la motivación, lo que indica que se pueden obtener grandes beneficios como resultado de esta implementación (ver Fig. 7.15). Si se logra impactar positivamente en estos dos aspectos, el efecto generado en el paciente podría contribuir en gran medida a la recuperación parcial o total del movimiento del miembro superior afectado, teniendo en cuenta que el paciente se sentirá más motivado a realizar ejercicios que le benefician directamente, lo cual está relacionado con la adherencia al tratamiento.

De igual forma, las estrategias de retroalimentación activa implementadas son adecuadas para notificar al paciente si está realizando correctamente el ejercicio o no. La retroalimentación activa al ser en tiempo real, le permite al paciente corregir y realizar ajustes de los movimientos del ejercicio en curso, disminuyendo posibles molestias asociadas a movimientos mal realizados y asegurando la buena ejecución de los ejercicios propuestos. Se obtuvo una valoración del 100% para la característica de Retroalimentación, como se puede ver en la Figura 7.17.

Los resultados de las encuestas evidencian que la herramienta desarrollada en general cumple con las características y objetivos de los ejercicios básicos de rehabilitación de miembro superior, lo que indica que la herramienta es de gran utilidad para emplearse en pacientes que requieran realizar este tipo de ejercicios en sus terapias (ver Fig. 7.18).

En las siguientes preguntas, se evaluaron individualmente cada una de las estrategias de retroalimentación implementadas: visual, háptica y auditiva. Tanto en las estrategias de retroalimentación visual como auditiva, los participantes indicaron que eran adecuadas, como se puede apreciar en las Figuras 7.20 y 7.23, respectivamente. Para la retroalimentación háptica, el 75 % de las respuestas afirmaron que la estrategia era adecuada, como se evidencia en la Figura 7.21. La razón por la cual un participante indicó que no era adecuada está relacionada con la posibilidad de que algunos pacientes presenten alguna discapacidad (ver Figura 7.22).

En cuanto a la estrategia de los diferentes grosores de línea, evaluada en la pregunta 8 (ver Fig. 7.24), los resultados obtenidos evidencian que es una estrategia adecuada para ejercitar la precisión, que implica coordinación y tono muscular del miembro superior. Los diferentes grosores de línea o anchos de trayectoria al implementarse con los niveles (nivel 1 o 2) asociados a la forma de la trayectoria, le permiten al fisioterapeuta aumentar el grado de dificultad en cuanto a la precisión.

Además, algunos aspectos a implementar son los ejercicios de familiarización, como lo menciona el 50 % de los profesionales encuestados (ver Fig. 7.25), ya que es importante que el usuario comprenda cómo funciona esta tecnología y logre explorar e identificar la interacción en un entorno virtual. La implementación de ejercicios de familiarización previos al inicio de los ejercicios propuestos podría ayudar al usuario a entender la dinámica de los ejercicios y disminuir los errores en el momento de la ejecución, evitando el registro de datos erróneos a causa del desconocimiento de la herramienta.

El otro 50 % de los aspectos importantes a incluir en la herramienta, como se evidencia en la Fig. 7.25, están relacionados con la aplicación de ejercicios que involucren movimientos en diagonales y que se mencionen los movimientos realizados en cada ejercicio.

Finalmente el nivel de satisfacción de la herramienta registrado en las encuestas es alto, con una calificación de 4.5 por parte de los profesionales que probaron la herramienta y fueron encuestados. Con lo anterior, se puede concluir que la herramienta desarrollada puede complementar los ejercicios de rehabilitación de miembro superior de las terapias convencionales, teniendo en cuenta que existen otros ejercicios que involucran peso y fuerza, los cuales no se implementan la herramienta.

7.5. Video de Funcionamiento

En el siguiente link se puede acceder al video en el cual se muestra el funcionamiento de la herramienta desarrollada. https://youtu.be/4oLAKfI_iQk

7.6. Recomendaciones de uso

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la herramienta desarrollada y la correcta ejecución de los ejercicios propuestos, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos.

Espacio físico: Las Gafas Meta Quest 2 únicamente pueden utilizarse en interiores, se requiere de un espacio mínimo de 2.5m x 2.5m, sin ningún tipo de obstáculo que pueda poner en riesgo al paciente mientras esté realizando los ejercicios con la herramienta desarrollada.

Silla: Se requiere de una silla con espaldar, de una altura no mayor a 60cm desde el suelo, para que el usuario realice los ejercicios mientras permanece sentado.

Recomendaciones de seguridad: Para garantizar la salud y seguridad del usuario, se recomienda leer y seguir las indicaciones del *Manual de seguridad y garantía* de las Meta Quest 2, el cual se puede consultar directamente en la página (<https://www.meta.com/es/quest/safety-center/quest-2/>) o el siguiente link (https://scontent.fpei2-1.fna.fbcdn.net/v/t39.8562-6/378480399_611962661010468_8424532700993170902_n.pdf?_nc_cat=103&ccb=1-7&_nc_sid=b8d81d&_nc_ohc=8H244rRHGWMQ7kNvgGoNH4s&_nc_ht=scontent.fpei2-1.fna&oh=00_AYAKnbVM4-y7xkyJC8GJub5a5ZVSKjYnUCwXHGfDF33cVg&oe=667224B8).

Conclusiones

La integración de interfaces hápticas y series matemáticas en la rehabilitación del miembro superior es una herramienta de gran utilidad para los fisioterapeutas, ya que aborda las problemáticas asociadas a la falta de adherencia de los pacientes a sus terapias de rehabilitación del miembro superior. Esta solución implementa diversas estrategias de retroalimentación activa (visual, auditiva y háptica) que permiten al usuario tener una mejor experiencia durante la ejecución de los ejercicios, lo que se verá reflejado en su motivación y por ende en su adherencia a la terapia de rehabilitación.

Las trayectorias de cada ejercicio, diseñadas a partir de Curvas de Bézier, facilitan la automatización, ejecución, seguimiento y evaluación de los ejercicios propuestos al implementarse estrategias de retroalimentación activa. Sin embargo, para optimizar aún más el desempeño y la personalización de la herramienta, es esencial realizar estudios y análisis complementarios. Estos estudios deben orientarse a obtener información más precisa y adaptada al diagnóstico específico de cada paciente, lo que permitirá una evaluación más detallada y personalizada de su progreso.

El escenario interactivo diseñado brinda al usuario una experiencia agradable y amigable, lo cual está asociado con un aumento en la motivación y, por ende, en la adherencia a las terapias de rehabilitación del miembro superior. En este entorno se pueden desarrollar diversos ejercicios básicos de rehabilitación del miembro superior. Además, es posible diseñar escenarios interactivos temáticos para ofrecer una variedad de opciones que se alineen con los intereses y gustos del paciente, facilitando así una experiencia más personalizada y motivadora.

La evaluación de la herramienta realizada por fisioterapeutas y profesionales con conocimientos en fisiología permite determinar su utilidad y verificar si la integración de las interfaces hápticas y series matemáticas dentro de un escenario virtual interactivo, es adecuada para desarrollar los ejercicios básicos de las terapias de rehabilitación del miembro superior, como complemento a los ejercicios de terapias convencionales.

Las estrategias de retroalimentación activa implementadas (visual, háptica y auditiva) en la herramienta desarrollada permiten al usuario identificar cuándo no se están realizando correctamente los ejercicios propuestos, brindándole la oportunidad de hacer las correcciones necesarias durante la ejecución de los mismos.

Trabajos futuros

A lo largo del desarrollo del proyecto, se presentaron diferentes limitaciones asociadas a los recursos computacionales. El entorno virtual interactivo se diseñó con los recursos gratuitos encontrados online, por lo que muchos objetos no se lograron implementar en el escenario. Adicionalmente, una gran limitante son los objetos en 3D de alta definición, los cuales no fueron utilizados debido a su alto grado de procesamiento requerido.

Por lo anterior, se sugiere continuar con:

- El diseño e implementación de otros escenarios interactivos en los cuales se logren adicionar diferentes objetos, de tal manera que el usuario tenga la posibilidad de elegir entre diversos escenarios temáticos para la ejecución de las terapias de rehabilitación de miembro superior.
- En cuanto a la interacción con los objetos de la escena, se pueden adicionar animaciones de tipo visual y auditivas mucho más avanzadas, con el fin de brindarle al paciente una experiencia más realista e inmersiva.
- Por otro lado, la implementación de diferentes incentivos para el usuario, tales como un sistema de puntos, vidas o medallas que se van obteniendo a medida que el usuario realiza correctamente los ejercicios determinados por el fisioterapeuta.
- En cuanto a la información de utilidad para el personal de salud, se sugiere realizar un trabajo conjunto con fisioterapeutas y terapeutas ocupacionales, con el fin de mostrar datos que les sean convenientes para llevar a cabo un correcto seguimiento al paciente sobre su condición específica, la cual les permita tomar decisiones con respecto a los ejercicios de rehabilitación.
- Para ejercicios de rehabilitación enfocados en la motricidad fina y agarre, se puede desarrollar la herramienta que permita emplear funciones de reconocimiento o seguimiento de manos de interfaces hápticas como las Hololens y/o Meta Quest 2 en adelante.
- Como parte del proceso de familiarización con los ejercicios de la herramienta desarrollada, se pueden añadir ejercicios previos a la terapia. Estos ejercicios permitirán al paciente tener un

primer acercamiento para comprender la interacción en el entorno virtual, reconocer las tres dimensiones y entender el movimiento de los objetos en el espacio. Esto ayudará a reducir la posibilidad de cometer y contabilizar errores asociados al desconocimiento del uso y funcionamiento de la herramienta.

Anexo 1 – Encuesta expectativas.

Encuesta expectativas

1. ¿Cuales son sus expectativas acerca de la implementación de tecnologías enfocada a la terapia de miembro superior?
★
2. Por favor, clasifique los ítems de acuerdo al nivel de mejoría que considere que puede generar la implementación de tecnologías en la terapia convencional (siendo 1 el de mayor impacto y 4 el de menor impacto). ★

Motivación

Adherencia

Rangos de Movimiento

Coordinación

3. ¿Qué aspectos considera que son importantes de la retroalimentación activa que puede ofrecer la herramienta? ★

Figura 10.1: Encuesta expectativas

Anexo 2 – Encuesta percepción herramienta desarrollada.

1. ¿Los ejercicios presentados en el entorno virtual cumplen con las **características** de los ejercicios básicos implementados en una terapia convencional? *

	Si	No
Progresión y Nivel de dificultad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Retroalimentación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Claro para el paciente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ambiente amigable - agradable	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2. ¿Los ejercicios presentados en el entorno diseñado cumplen con los **objetivos** de los ejercicios básicos de una terapia convencional de miembro superior? *

- Si
- No

¿Por qué NO cumple con los objetivos de ejercicios básicos de una terapia convencional?

Por qué? *

Escriba su respuesta

Rangos de movimiento

3. ¿Los **rangos de movimiento** de los ejercicios presentados son adecuados para terapias básicas de rehabilitación de miembro superior (ángulos)? *

- Si
- No

¿Por qué NO son adecuados los rangos de movimiento?

¿Por qué? *

Escriba su respuesta

Figura 10.2: Encuesta percepción herramienta desarrollada.

Retroalimentación visual

4. ¿Las estrategias de **retroalimentación visual** implementadas son adecuadas? (Color de la línea, iluminación de objeto) *

Si

No

¿Por qué NO son adecuadas las estrategias de retroalimentación visual?

¿Por qué? *

Escriba su respuesta

Retroalimentación Háptica

5. ¿Las estrategias de **retroalimentación háptica** implementadas son adecuadas? (Vibración de controladores) *

Si

No

¿Por qué NO son adecuadas las estrategias de retroalimentación háptica?

¿Por qué? *

Escriba su respuesta

Retroalimentación auditiva

6. ¿Las estrategias de **retroalimentación auditiva** implementadas son adecuadas? (Sonido por objeto) *

Si

No

Figura 10.3: Encuesta percepción herramienta desarrollada.

¿Por qué NO son adecuadas las estrategias de retroalimentación auditiva?

¿Por qué? *

Escriba su respuesta

Grosor de línea

7. ¿La estrategia de los diferentes grosores de trayectoria es adecuada para ejercitar la precisión (implica coordinación y tono muscular) del miembro superior? *

Sí

No

¿Por qué NO es adecuada la estrategia del grosor de la trayectoria?

¿Por qué? *

Escriba su respuesta

Otros aspectos

8. ¿Qué otros aspectos considera importantes incluir para este tipo de tecnologías en la terapia de rehabilitación? *

Escriba su respuesta

9. De 1- 5, ¿cuál considera que fue el nivel de satisfacción con la herramienta probada? *

Nada satisfecho ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Muy satisfecho

Figura 10.4: Encuesta percepción herramienta desarrollada.

Bibliografía

- [1] M. Rios Garcia, “Marco de trabajo para la prÁctica de terapia ocupacional: Dominio y proceso,” *The American Journal of Occupational Therapy*, vol. 2, no. 6, pp. 625–683, 2010. [Online]. Available: http://www.cptopr.org/Documents/Traduccion_FINAL_OTPF_2_PR.pdf
- [2] A. Jarillo Silva, J. A. Cruz Tolentino, L. Rojas González, and J. L. Santiago Lopez, “Aplicación de ambientes virtuales empleando dispositivos hápticos en el área de rehabilitación y evaluación motriz,” *Pistas educativas*, vol. 35, no. 108, 2014. [Online]. Available: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/1485>
- [3] M. Rios Garcia, “Trastornos musculoesqueléticos del miembro superior en el hospital militar de matanzas,” *Revista Médica Electrónica*, vol. 40, no. 6, pp. 1819–1834, 2018. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242018000601819&lng=es&nrm=iso
- [4] O. M. de la Salud, “Rehabilitation,” <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>, fecha de acceso: 2023-08-07.
- [5] O. C. J. José, S. H. Diana, R. M. Óscar Adrián, and O. L. J. Manuel, “Adherencia terapéutica: un problema de atención médica,” *Acta médica Grupo Ángeles*, vol. 16, no. 3, 2018. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-72032018000300226
- [6] Y. R. Guzmán S, O. Estrada Z, P. A. Tejada M, and O. Crespo, “Factores relacionados con adherencia a un programa de rehabilitación,” *Revista Facultad de Salud*, vol. 2, no. 1, pp. 39–50, 2010. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/229704447.pdf>
- [7] N. Unidas, “Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades,” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>.
- [8] C. Perez Rodriguez, C. M. Morales, D. Ortiz Zarama, O. M. Castellano, and Y. L. Suarez Martinez, “Funcionalidad del miembro superior afectado en personas con secuelas de enfermedad cerebrovascular,” 2010.
- [9] R. P. Zambuto, “Introduction to clinical engineering,” in *Clinical Engineering Handbook*, ser. Biomedical Engineering, J. F. Dyro, Ed. Burlington: Academic Press, 2004, pp. 1–2. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122265709500028>
- [10] O. M. de la Salud, “Trastornos musculoesqueléticos,” <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions#:~:text=Los%20trastornos%20musculoesquel%C3%A9ticos%20comprenden%20m%C3%A1s,capacidades%20funcionales%20e%20incapacidad%20permanentes.>, fecha de acceso: 2023-09-1.

- [11] D. Pamplona Rangel, Lina Marcela Uribe Guarín, “Adherencia al tratamiento fisioterapéutico,” 2016. [Online]. Available: https://repository.ces.edu.co/bitstream/handle/10946/2739/Adherencia_Tratamiento_Fisioterapeutico.pdf;sequence=1
- [12] H. shen Wang, C. Hsu, D. Chiu, and S.-N. Tsai, “Using augmented reality gaming system to enhance hand rehabilitation,” in *2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*, vol. 3, 2010, pp. V3–243–V3–246.
- [13] M. Paci, “Physiotherapy based on the bobath concept for adults with post-stroke hemiplegia: A review of effectiveness studies,” *The American Journal of Occupational Therapy*, vol. 35, pp. 2–7, 2003.
- [14] Y. Zuleima, C. A. Luna, and C. F. Rengifo, “Herramienta de entrenamiento virtual en 2-d para rehabilitación de motricidad fina en miembro superior con incorporación de un dispositivo háptico (software para rehabilitación fina en miembro superior),” *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 7, no. 14, pp. 59–67, 2013.
- [15] M. Levin, H. Sveistrup, and S. Subramanian, “Feedback and virtual environments for motor learning and rehabilitation,” *Schedae*, vol. 1, 01 2010.
- [16] B. M. B. D. M. P. F. D. Rose, E. A. Attree and P. R. Penn, “Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training,” *Ergonomics*, vol. 43, no. 4, pp. 494–511, 2000. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1080/001401300184378>
- [17] M. Volovik, V. Borzikov, A. Kuznetsov, D. Bazarov, and A. Polyakova, “Virtual reality technology in complex medical rehabilitation of patients with disabilities (review),” *Sovremennye tehnologii v medicine*, vol. 10, p. 173, 12 2018.
- [18] L. National Health and B. Institute, “Trastornos musculoesqueléticos,” <https://www.nhlbi.nih.gov/health/stroke/recovery>, fecha de acceso: 2023-09-2.
- [19] C. for Disease Control and Prevention, “Stroke,” https://www.cdc.gov/stroke/treatments_es.p.htm#:~:text=La%20rehabilitaci%20despu%20de%20un,a%20prevenir%20otro%20accidente%20cerebrovascular.
- [20] I. Sánchez Villavicencio, J. Hernández Franco, E. Sucar *et al.*, “Actividades simuladas de la vida diaria para rehabilitación motora del miembro superior en pacientes con enfermedad vascular cerebral,” *Archivos de Neurociencias*, vol. 14, no. 4, pp. 237–242, 2009.
- [21] B. W. . N. Gregg, “Anatomy and physical examination of the shoulder,” *Sports Med Arthrosc*, vol. 26, no. 3, 2018. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30059442/>
- [22] N. Suárez Sanabria and A. M. Osorio Patiño, “Biomecánica del hombro y bases fisiológicas de los ejercicios de codman,” *CES MEDICINA*, vol. 27, no. 2, Julio-Diciembre 2013.

- [23] H. Veeger and F. van der Helm, "Shoulder function: The perfect compromise between mobility and stability," *Journal of Biomechanics*, vol. 40, no. 10, pp. 2119–2129, 2007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929006003812>
- [24] O. P. de la Salud, "Causas principales de mortalidad, y discapacidad," <https://www.paho.org/es/enlace/causas-principales-mortalidad-discapacidad>.
- [25] A. Kunz, U. Dirnagl, and P. Mergenthaler, "Acute pathophysiological processes after ischaemic and traumatic brain injury," *Best Practice Research Clinical Anaesthesiology*, vol. 24, no. 4, pp. 495–509, 2010, the State of Neuroprotection. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1521689610000674>
- [26] A. Mansfield, E. L. Inness, and W. E. Mcilroy, "Chapter 13 - stroke," in *Balance, Gait, and Falls*, ser. Handbook of Clinical Neurology, B. L. Day and S. R. Lord, Eds. Elsevier, 2018, vol. 159, pp. 205–228. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444639165000136>
- [27] A. Ruiz Negro, "Eficacia y viabilidad de la realidad virtual inmersiva en la recuperación motora del miembro superior tras un ictus," 2019/2020.
- [28] P. Raghavan, "Upper limb motor impairment after stroke," *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, vol. 26, no. 4, pp. 599–610, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1047965115000558>
- [29] F. Gimigliano, G. Resmini, A. Moretti, M. Aulicino, F. Gargiulo, A. Gimigliano, S. Liguori, M. Paoletta, and G. Iolascon, "Epidemiology of musculoskeletal injuries in adult athletes: A scoping review," *Medicina (Kaunas)*, vol. 57, no. 10, p. 1118, 2021.
- [30] A. Caicedo V, L. C. Díaz V, and D. A. Oliveira P, "Deserción de pacientes en terapias de rehabilitación física, ocupacional y fonoaudiología de la ips unidad fisioterapeutica de occidente de la ciudad de popayán, 2018," 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2280/1/Amparo%20Caicedo%20V.pdf>
- [31] T. Dilla, A. Valladares, L. Lizán, and J. A. Sacristán, "Adherencia y persistencia terapéutica: causas, consecuencias y estrategias de mejora," *Atención Primaria*, vol. 41, no. 6, pp. 342–348, 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272735803001107>
- [32] K. H. Drieschner, S. M. Lammers, and C. P. van der Staak, "Treatment motivation: An attempt for clarification of an ambiguous concept," *Clinical Psychology Review*, vol. 23, no. 8, pp. 1115–1137, 2004. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272735803001107>
- [33] R. Riener and M. Harders, *Virtual Reality in Medicine*. London: Springer, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4011-5>

-
- [34] O. A. Domínguez R, V. López M, and E. Samperio L., “Resultados preliminares sobre interacción háptica en laberintos virtuales, con propósitos de diagnóstico en pacientes con discapacidades neuropsicológicas,” 2004. [Online]. Available: https://virtual.cudi.edu.mx/access/content/group/070ad2b8-1a1d-4a1b-9305-e73c86397519/dias_cudi/2004_03_17/Omar_Laberinto.pdf
- [35] R. Loureiro, F. Amirabdollahian, S. Coote, E. Stokes, and W. Harwin, “Using haptics technology to deliver motivational therapies in stroke patients: Concepts and initial pilot studies,” 01 2001. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228914662_Using_Haptics_Technology_to_Deliver_Motivational_Therapies_in_Stroke_Patients_Concepts_and_Initial_Pilot_Studies
- [36] A. N. Krichevets, E. B. Sirotkina, I. V. Yevseviceva, and L. M. Zeldin, “Computer games as a means of movement rehabilitation,” *Disabil Rehabil*, vol. 17, no. 2, pp. 100–105, Feb-Mar 1995.