

PORTADA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tema:

ENTORNO VIRTUAL ENFOCADO EN LA REHABILITACIÓN DEL SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

ÁREA: Automatización
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la información y Sistemas de control

AUTOR: Carlos Alberto Barrionuevo Gavilanes
TUTOR: Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez, PhD.

Ambato - Ecuador
agosto – 2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: ENTORNO VIRTUAL ENFOCADO EN LA REHABILITACIÓN DEL SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Carlos Alberto Barrionuevo Gavilanes, estudiante de la Carrera de Ingeniería Industrial, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, agosto 2024.



Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez, PhD.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: ENTORNO VIRTUAL ENFOCADO EN LA REHABILITACIÓN DEL SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, agosto 2024.



Carlos Alberto Barrionuevo Gavilanes

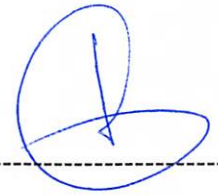
C.C. 1805295985

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, agosto 2024.



Carlos Alberto Barrionuevo Gavilanes

C.C. 1805295985

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Carlos Alberto Barrionuevo Gavilanes de la Carrera de Ingeniería Industrial, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado ENTORNO VIRTUAL ENDOCADO EN LA REHABILITACIÓN DEL SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con la señora Presidente del Tribunal.

Ambato, agosto 2024.

Firmado electrónicamente por:
ELSA PILAR URRUTIA URRUTIA

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO MAURICIO ALTAMIRANO MELENDEZ

Ing. Santiago Mauricio Meléndez, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Firmado electrónicamente por:
LUIS ALBERTO MORALES PERRAZO

Ing. Luis Alberto Morales Perrazo, Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A mi madre con todo mi amor y gratitud, has sido mi mayor apoyo, mi inspiración constante.

Tus sacrificios, tu paciencia infinita y tu amor incondicional me han guiado y sostenido a lo largo de este arduo camino.

Esta tesis es un reflejo de tu amor y dedicación. Te dedico este logro con todo mi corazón, agradecido por tenerte en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por iluminarme, darme salud, vida y ayudarme a alcanzar cada objetivo propuesto en mi camino.

A mí mismo, quien con tenacidad, perseverancia y pasión ha completado este arduo viaje académico. A lo largo de este camino, he aprendido no solo sobre mi área de estudio, sino también sobre mi propia fortaleza y capacidad para superar desafíos. Esta tesis representa el fruto de mi dedicación y compromiso constante.

Agradezco profundamente a mis seres queridos por su apoyo incondicional, especialmente a mi madre quien ha estado en mis momentos de fortaleza y debilidad. Gracias por creer en mi incluso cuando yo dudaba de mis propias capacidades.

A mis amigos Yadira, Karla y los Sucios Dan cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este camino. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y momentos compartidos han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mi tutor Marcelo García por plantearme un reto que puso a prueba cada una de mis destrezas y por su apoyo en cada etapa de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA ..... **i**

APROBACIÓN DEL TUTOR ..... **ii**

AUTORÍA ..... **iii**

DERECHOS DE AUTOR ..... **iv**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO ..... **v**

DEDICATORIA ..... **vi**

AGRADECIMIENTO ..... **vii**

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS ..... **viii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xii**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**

ÍNDICE DE ANEXOS ..... **xiv**

RESUMEN EJECUTIVO ..... **xv**

ABSTRACT ..... **xvi**

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO **1**

1.1 Tema de investigación 1

1.1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Antecedentes investigativos 2

1.3 Fundamentación teórica 4

1.3.1 Clasificación de dispositivos para RV 4

1.3.2 Rehabilitación virtual 5

1.3.3 Unity 3D 5

1.3.4 Steam VR 6

1.3.5 Síndrome del Túnel Carpiano 7

1.3.6 Usabilidad y Test de Usabilidad 9

1.4 Objetivos 10

1.4.1 Objetivo general 10

1.4.2 Objetivos específicos 10

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 11

2.1 Materiales 11

2.2 Métodos 12

2.2.1 Modalidad de la investigación 12

2.2.2 Población y muestra 14

2.2.3 Recolección de información 15

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos 16

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 17

3.1 Selección de equipos y herramientas para entornos virtuales 17

3.1.1 Equipos preseleccionados 17

3.1.2 Criterios de evaluación..... 18

3.1.3 Ponderación criterios guantes hápticos 19

3.1.4 Ponderación criterios visores VR..... 20

3.1.5 Selección guantes hápticos..... 21

3.1.6 Selección de visores VR..... 21

3.2 Dispositivos..... 22

3.3 Selección de tratamientos fisioterapéuticos aplicables a un entorno virtual. 24

3.4 Selección del tratamiento y ejercicios. 25

3.4.1 Arquitectura del sistema de realidad virtual..... 25

3.4.2 Perfiles Captoglovc 27

3.5 Diseño de escenas en Unity..... 30

3.5.1 Interfaz de usuario..... 30

3.5.2 Desarrollo escena de menú principal 31

3.5.3 Diseño escena 1 (encestar el balón) 32

3.5.4 Diseño escena 2 (teletransportación) 34

3.5.5 Relación de escenas con el usuario 35

3.6 Pruebas de aplicación..... 37

3.6.1 Cuestionario de usabilidad (SUS) 42

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 46

4.1 Conclusiones 46

4.2 Recomendaciones..... 46

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

ANEXOS 51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales: Software – Hardware empleados. 11

Tabla 2. Equipos preseleccionados 18

Tabla 3. Criterios de evaluación..... 19

Tabla 4. Ponderación criterios guantes hápticos 20

Tabla 5. Ponderación criterios visores VR..... 20

Tabla 6. Matriz normalizada con resultados 21

Tabla 7. Matriz normalizada con resultados 22

Tabla 8. Características HTC Vive Pro 2..... 23

Tabla 9. Características CaptoGlove..... 24

Tabla 10. Resultados cuestionario SUS 44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rehabilitación virtual..... 5

Figura 2. Síndrome del túnel carpiano 7

Figura 3 Arquitectura realidad virtual..... 27

Figura 4. Flexión de pulgar 29

Figura 5. Apertura y cierre de la mano 29

Figura 6. Rotación palmar..... 29

Figura 7. Diagrama de navegación de interfaz..... 30

Figura 8. Configuración visión canvas..... 31

Figura 9. Escena menú principal..... 32

Figura 10. Ejercicios empleados en la escena 1 33

Figura 11. Vista jugador escena 1. 34

Figura 12. Ejercicios empleados en la escena 2. 34

Figura 13. Vista jugador escena 2 35

Figura 14. Diagrama UML relación escenas de usuario 36

Figura 15. Ejercicios realizados en el entorno virtual, escena 1. 37

Figura 16. Ejercicios realizados en el entorno virtual, escena 2. 38

Figura 17. Ejercicios realizados en el entorno virtual, escena 2. 38

Figura 18. Mejora movilidad de extremidades 39

Figura 19. Eficiencia de la captura de movimientos 40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Profiles Capto Glove Left and Right 51

Anexo B. Cuestionario de usabilidad SUS 52

Anexo C. Selección de equipos..... 53

Anexo D. Encuesta sobre Rutinas de Rehabilitación para Síndrome del Túnel Carpiano 57

RESUMEN EJECUTIVO

El acceso a terapias de rehabilitación en Ecuador es limitado, especialmente para afecciones como el síndrome del túnel carpiano, que afecta la movilidad de las manos y requiere tratamientos profesionales. Este proyecto de investigación propone una solución innovadora utilizando entornos de realidad virtual creados con Unity y equipos hápticos, que optimizan los procesos de rehabilitación en tiempo y espacio simulando un entorno físico real.

La metodología combinó enfoques cualitativos y cuantitativos. Se realizaron entrevistas en focus groups con profesionales de salud para identificar ejercicios adecuados para la rehabilitación virtual y se usaron matrices de priorización para seleccionar los equipos adecuados. Además, se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva sobre tecnologías de RV aplicadas a la rehabilitación y estudios específicos del STC. La investigación incluyó pruebas del entorno virtual e integración de dispositivos hápticos. Finalmente, se usó la herramienta estadística T-Student para comparar la movilidad de las extremidades antes y después del tratamiento.

Dentro de los principales resultados obtenidos se muestra que el proceso de rehabilitación virtual es mucho más interactivo y presenta beneficios en la recuperación de la movilidad de las extremidades afectadas, además de que el entorno creado resulta fácil de usar para cualquier tipo de persona con dicha afección, por lo que se puede concluir que el uso de herramientas de realidad virtual son una oportunidad para innovar en procesos de rehabilitación virtual y que a su vez mejoren la calidad de vida de las personas y faciliten el acceso a las mismas desde cualquier lugar del mundo.

Palabras clave: Realidad virtual, Unity, CaptoGlove, HTC Vive Pro, Usabilidad, síndrome del túnel carpiano.

ABSTRACT

Access to rehabilitation therapies in Ecuador is limited, especially for conditions like carpal tunnel syndrome, which affects hand mobility and requires professional treatments. This research project proposes an innovative solution using virtual reality environments created with Unity and haptic devices, optimizing rehabilitation processes in time and space by simulating a real physical environment.

The methodology combined qualitative and quantitative approaches. Focus group interviews with healthcare professionals were conducted to identify suitable exercises for virtual rehabilitation, and prioritization matrices were used to select appropriate equipment. Additionally, an extensive literature review was carried out on VR technologies applied to rehabilitation and specific studies on CTS. The research included testing the virtual environment and integrating haptic devices. Finally, the T-Student statistical tool was used to compare limb mobility before and after treatment.

The main results show that the virtual rehabilitation process is much more interactive and offers benefits in recovering the mobility of affected limbs. Additionally, the created environment is easy to use for anyone with this condition. It can be concluded that using virtual reality tools is an opportunity to innovate in virtual rehabilitation processes, improving people's quality of life and facilitating access to these therapies from anywhere in the world..

Keywords: Virtual reality, Unity, CaptoGlove, HTC Vive Pro, Usability, Carpal Tunnel Syndrome.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

Entorno virtual enfocado en la rehabilitación del síndrome del túnel carpiano.

1.1.1 Planteamiento del problema

El comienzo evolutivo de la Realidad Virtual tiene su origen en la década de los noventa con algunos hitos significativos como los softwares Rend386 y ARToolKit, utilizados principalmente para renderizar objetos 3D y desarrollar aplicaciones de realidad aumentada. Además, el avance en hardware y sensores de movimiento, como los cascos de RV de Sega y Nintendo, sentaron las bases para la tecnología moderna de realidad virtual [1].

En los últimos años dentro de los nuevos métodos de enseñanza se encuentra la realidad virtual, ya que ha demostrado que influye de una manera positiva sobre los alumnos debido a que cautiva su atención, se puede afirmar que la RV tiene un gran potencial de aplicación para distintas áreas [2]. Los países más desarrollados apuestan por estas tecnologías tales como el caso de Japón, Finlandia, Singapur [3].

En el Ecuador se cuenta con 3 fisioterapistas por cada 10.000 habitantes, por lo que el acceso a centros de rehabilitación es muy limitado para la población afectada, haciendo que los mismos busquen alternativas no profesionales para tratar su afección poniendo en peligro su integridad [4].

El síndrome del túnel carpiano es una problemática que afecta a personas de todo el mundo, afectando a personas de todas las edades y géneros es una de las principales causas de dolor en las manos y los dedos, y puede afectar la capacidad de una persona para realizar tareas cotidianas [5]. El síndrome se produce cuando el nervio mediano, que va desde el antebrazo hasta la mano, se comprime en la muñeca, esto puede provocar entumecimiento, hormigueo y debilidad en la mano y los dedos [6].

Esta condición es común en personas que realizan trabajos que implican movimientos repetitivos de las manos y muñecas como son los trabajos de oficina [7]. Los tratamientos más comunes se los realizan en centros especializados para dichas

molestias que constan generalmente de ejercicios de fortalecimiento y cambios en la ergonomía del lugar de trabajo, sin embargo, en los casos más graves es recomendable la cirugía para liberar el nervio mediano [8].

Es más común que se presente en jóvenes y adultos entre 20 y 40 años que son una generación que han desarrollado una dependencia de dispositivos electrónicos para la gran mayoría de actividades diarias [9].

En Ecuador, el Síndrome del Túnel Carpiano está clasificado como una enfermedad profesional, según la Resolución No. 513 emitida por el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social en 2016. Con el fin de proteger a los trabajadores bajo el seguro general de riesgos del trabajo, se considerará como enfermedad profesional al STC cuando esté relacionado con períodos prolongados de trabajo intenso y repetitivo, labores que involucren vibraciones, posturas extremas de la muñeca o una combinación de estos tres factores[10].

1.2 Antecedentes investigativos

La aplicación de la realidad virtual (RV) en la fisioterapia está siendo explorada por diversas instituciones académicas con enfoques distintos. La Universidad Carlos III ha investigado el uso de la RV para rehabilitación del hombro, empleando simulaciones de movimientos específicos como la aducción y abducción, logrando resultados destacables según su estudio. Utilizan tecnología como el sensor de movimiento "Intel RealSense" y las gafas de RV "Oculus Rift DK2" [11]. Por otro lado, la Universidad de Barcelona (UB) se ha centrado en el uso de RV inmersiva en neurorrehabilitación y su impacto en la neuroplasticidad, utilizando la plataforma Unity3D para crear escenas virtuales. Aunque ambos enfoques comparten el uso de RV en rehabilitación, difieren en los aspectos específicos de aplicación y evaluación, resaltando la diversidad de investigaciones en este campo emergente [12].

El entorno virtual es ampliamente utilizado para la rehabilitación debido a que representa mejor calidad de vida para los pacientes, como menciona en [13] donde se obtuvo resultados a través del test Tinel que la rehabilitación convencional baja de un promedio de 5 a 3 grados de dolor y parestesia según la escala de Eva, mientras que en la rehabilitación con entorno virtual estos bajan de 4 a 1 en el mismo aspecto. Este

hallazgo respalda la eficacia de la realidad virtual como una herramienta complementaria en el tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano.

Un estudio realizado sobre los efectos de la realidad virtual inmersiva en pacientes con síntomas similares a los del Parkinson. Los resultados de la investigación muestran que la utilización de realidad virtual (RV) mediante juegos y los sensores de movimiento de Microsoft Kinect redujeron significativamente la bradicinesia. Esto se logró gracias a los ejercicios de repetición y amplitud, que mejoraron la destreza y habilidad de los miembros superiores. Este hallazgo subraya la importancia del entorno virtual en la rehabilitación. La posibilidad de realizar ejercicios de repetición y amplitud de movimiento de manera virtual ofrece una alternativa efectiva y motivadora para mejorar la función motora y la calidad de vida de los pacientes [14].

Por otro lado, es importante destacar del estudio realizado por Tovar sobre el "Manejo y detección del dolor a partir del uso de realidad virtual en pacientes con síndrome del túnel carpiano", en la que recurre a la realizar escenas en Unity 3D con juegos que incluyan los ejercicios necesarios para la rehabilitación lo que obliga al paciente a realizar los estiramientos de la manera correcta y sin ayudas externas para poder avanzar en el juego, lo que es una cualidad importante debido a que señala que comúnmente las personas que tienen rutinas de estiramientos como esta, tienden a realizarlos de una manera incorrecta utilizando la otra mano para hacer los ejercicios y flexionando los dedos más no la muñeca. De esta manera se promueve una correcta realización y supervisión de las terapias de rehabilitación del síndrome del túnel carpiano [15].

Una recopilación bibliográfica sobre la importancia de la realidad virtual (RV) en los procesos de rehabilitación física menciona que la RV ha sido utilizada para optimizar procesos de aprendizaje o reaprendizaje de movimientos en diversas condiciones médicas, como el ictus cerebral, la lesión cerebral adquirida, la enfermedad de Parkinson y la rehabilitación ortopédica. Investigadores han desarrollado sistemas de realidad virtual centrados en el movimiento de las extremidades superiores en pacientes con ictus, basados en el concepto de "aprendizaje por imitación", donde un profesor virtual ayuda al usuario a volver a entrenar movimientos del brazo, incluyendo hombro, codo, muñeca y mano [16].

1.3 Fundamentación teórica

Los avances tecnológicos han permitido al hombre alcanzar nuevos conocimientos y mejorar los ya aprendidos con anterioridad, dichos avances suponen cambios en sus estilos de vida y de realidad y es así mismo con estos avances tecnológicos surge la realidad virtual que es una herramienta tecnológica con un gran potencial de cambio de vida en las personas que se ha desarrollado con el paso de los años.

Se define por lo tanto a la realidad virtual (RV) como un entorno de realidad alterna inmersiva creado por un ordenador con el fin de provocar en el usuario una percepción de una nueva "realidad" donde se reflejan los actos, reacciones y acciones del usuario por medio de un ordenador [3]. Es la reproducción de entornos reales y la simulación de la presencia física de personas y objetos representados de manera grafica en tres dimensiones [17].

1.3.1 Clasificación de dispositivos para RV

Existe variedad a lo que respecta a la Realidad Virtual (RV), comprendida por los dispositivos periféricos utilizados, mismos que estimulan los sentidos de los usuarios, ya que pueden enviar y recibir señales mediante un ordenador. Usando este contexto, se clasifican los dispositivos de hardware en dispositivos de entrada y salida.

Los dispositivos de entrada y salida en la Realidad Virtual son fundamentales para la interacción y percepción del usuario. Los dispositivos de entrada permiten capturar los movimientos del usuario y enviarlos al computador, incluyendo posicionadores, guantes, micrófonos, ratones, andadores y mesas de visualización. Por otro lado, los dispositivos de salida son equipos encargados de enviar señales de audio, video y otras sensaciones desde el ordenador hacia el usuario para crear una percepción de realidad alternativa. Estos dispositivos incluyen plataformas móviles, sistemas de sonido, altavoces, entre otros [18].

1.3.2 Rehabilitación virtual

La rehabilitación virtual combina entornos virtuales con diversas terapias de rehabilitación para abordar condiciones clínicas físicas y cognitivas desde el hogar, proporcionando una solución accesible y conveniente para los usuarios. Aprovecha la inmersión y la interactividad de los entornos virtuales para ofrecer experiencias terapéuticas personalizadas y efectivas, mejorando la adherencia y los resultados del tratamiento. [19].



Figura 1. Rehabilitación virtual [16].

Los avances de la tecnología han permitido el desarrollo de nuevas formas de rehabilitación versátil y eficaz que van en aumento debido a que genera oportunidades de adaptarse a las necesidades de los usuarios/pacientes. La realidad virtual enfocada en la rehabilitación ha demostrado ser una herramienta que mejora la calidad de vida de los usuarios ya que permite mejoras tanto físicas como la función motora, cognitiva y psicológica [20].

1.3.3 Unity 3D

Unity es ampliamente utilizado para la creación de juegos y animaciones en 3D, pero su uso intuitivo e interfaz completa le han permitido expandirse en entornos de investigación para una gran variedad de aplicaciones. Estas incluyen experimentos de psicología, donde se emplea para crear entornos controlados que facilitan el estudio del comportamiento humano bajo diversas condiciones. También se utiliza en simulación quirúrgica, proporcionando plataformas virtuales para practicar

procedimientos médicos avanzados de manera segura. Además, en sistemas de rehabilitación ofreciendo ejercicios adaptativos [21].

La principal característica del motor gráfico Unity es su capacidad para exportar proyectos a múltiples plataformas, como Windows, MacOS, Linux y diversas consolas, incluyendo PlayStation, Xbox y Nintendo Switch. Además, ofrece compatibilidad con tecnologías emergentes como la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR), proporcionando herramientas específicas para el desarrollo de aplicaciones inmersivas en estos campos. Su motor gráfico potente y flexible permite la creación de gráficos de alta calidad y efectos visuales complejos, mientras que su arquitectura modular y extensible facilita la integración de plugins y herramientas de terceros.

Esta ofrece una variedad de herramientas y controles básicos que permiten interactuar con elementos virtuales de manera eficiente. Entre ellas, la herramienta de desplazamiento facilita la navegación por el entorno virtual, permitiendo moverse libremente por la escena. La herramienta de movimiento permite interactuar con los elementos de la escena, facilitando su desplazamiento de un punto a otro con precisión. La herramienta de rotación permite girar un elemento alrededor de cualquiera de sus ejes, proporcionando un control detallado sobre su orientación. Finalmente, la herramienta de escalado facilita el ajuste del tamaño de los objetos dentro de la escena para adaptarlos a las necesidades específicas del proyecto.

1.3.4 Steam VR

SteamVR es una plataforma que se destaca en el ámbito de la realidad virtual (VR) al integrar software y hardware para ofrecer experiencias inmersivas a través de diversos dispositivos compatibles. Su principal función es facilitar el acceso a contenido VR a través de la plataforma Steam, permitiendo a los usuarios explorar y disfrutar de entornos virtuales interactivos [22]. Entre sus características destacadas se encuentra el seguimiento avanzado de movimiento, que proporciona una experiencia de usuario natural al permitir interacciones precisas dentro de los entornos virtuales. Además, SteamVR ofrece soporte completo para una variedad de controladores VR, lo que

amplía las posibilidades de interacción y realismo en las aplicaciones y juegos VR disponibles.

1.3.5 Síndrome del Túnel Carpiano

En la actualidad, las enfermedades osteomusculares se posicionan en el primer lugar entre las afecciones profesionales. En particular, el Síndrome del Túnel Carpiano destaca como la principal causa de morbilidad laboral. Este síndrome, caracterizado por la compresión del nervio mediano en la muñeca, ha experimentado un aumento constante en su prevalencia a lo largo de los años. La complejidad de los factores contribuyentes y el impacto en la salud de los trabajadores hacen que sea crucial abordar y comprender las causas subyacentes para implementar medidas preventivas efectivas en el ámbito laboral [23].

El STC es un padecimiento que afecta a las muñecas debido a la compresión del nervio mediano en el canal del Carpio [24]. Es además considerado la primera causa de morbilidad profesional ya que afecta directamente en el desempeño de los trabajadores que realizan actividades vinculadas con el uso de computadoras, aseo, operadores de la industria, pianista, barrenderos, empacadores, secretarias, actividades del hogar y demás actividades que involucren el uso repetitivo de las manos, principalmente se experimentan dolor del pulgar, índice y dedo medio [25].



Figura 2. Síndrome del Túnel Carpiano [23].

El Síndrome del Túnel Carpiano puede ser influido por diversas actividades fuera del entorno laboral, tales como tejer, coser o bordar; realizar labores de cocina y domésticas; participar en juegos de computadora y realizar tareas informáticas en casa;

practicar deportes o juegos de cartas; así como dedicarse a pasatiempos o proyectos que impliquen el uso prolongado de herramientas potentes, como la carpintería [26].

Se utilizan distintas herramientas para diagnosticar el padecimiento en estudio como son los test físicos: Test de Durkan, Test de Phalen, Scratch collapse test; Estudios de imagen: Radiografía simple, ecografía, resonancia magnética; Exploraciones neurofisiológicas.

Los trastornos musculoesqueléticos (TME), como el Síndrome del Túnel Carpiano (STC), se desarrollan debido a diversas causas, incluyendo esfuerzos repetitivos, movimientos prolongados en posturas forzadas y otros factores. El STC, en particular, se atribuye frecuentemente al uso intensivo de las manos. Además, condiciones como la artritis reumatoide, acromegalias, fracturas de muñeca e incluso el embarazo pueden también contribuir al desarrollo de esta condición.

Las personas afectadas por el STC experimentan una variedad de síntomas que incluyen fuerte dolor, hormigueo, entumecimiento y pérdida de fuerza en las manos, especialmente durante la noche. Estos síntomas tienden a manifestarse con mayor frecuencia en áreas específicas como el pulgar, el índice, el medio y la porción media del dedo anular, sugiriendo una afectación localizada y recurrente.

En cuanto a los tratamientos, la elección depende del grado de la afección. Para casos leves a moderados, se utilizan enfoques conservadores como el uso de férulas nocturnas para estabilizar la muñeca y aliviar los síntomas durante el descanso. Las inyecciones de corticoides también se emplean para reducir la inflamación en casos menos severos, aunque su efectividad puede variar y continúa siendo objeto de estudio. La fisioterapia desempeña un papel crucial en el tratamiento del STC, incorporando ejercicios específicos para estirar nervios y tendones, complementando el uso de la férula nocturna para una recuperación efectiva en aproximadamente cuatro semanas.

En situaciones severas y cuando otras terapias no han sido efectivas, se considera el tratamiento quirúrgico como una opción viable y efectiva a corto y largo plazo. Este procedimiento consiste en la apertura del túnel carpiano mediante una pequeña incisión en el ligamento transverso del carpo, proporcionando alivio inmediato de los síntomas y restaurando la función adecuada de la mano.

1.3.6 Usabilidad y Test de Usabilidad

Según la Norma ISO/IEC 9241, la usabilidad se define por la efectividad, eficiencia y satisfacción con las que un producto permite a usuarios específicos alcanzar metas en un contexto particular de uso. Los tests de usabilidad son cruciales para evaluar cómo los usuarios interactúan con un software, centrándose en aspectos como la capacidad para manejar errores de forma efectiva, la atracción de la interfaz y la facilidad para aprender y recordar su funcionamiento a lo largo del tiempo.

Para llevar a cabo los tests de usabilidad, es común emplear cuestionarios o entrevistas con usuarios, utilizando a menudo cuestionarios estandarizados que ofrecen mayor confiabilidad y consistencia en sus resultados. Entre estos, destacan el System Usability Scale (SUS) y el Computer System Usability Questionnaire (CSUQ). El SUS, por ejemplo, presenta 23 declaraciones donde los participantes indican su grado de acuerdo, proporcionando así un índice de usabilidad del software en una escala de 0 a 100. Por otro lado, el CSUQ consiste en 19 enunciados evaluados en una escala del 1 al 7, permitiendo una evaluación detallada de la percepción del usuario sobre diversos aspectos de la usabilidad del sistema.

Sin embargo, el uso del SUS no está exento de críticas. Aunque es versátil y fácil de implementar para cualquier tipo de sistema, no proporciona explicaciones cualitativas de las respuestas, limitándose a ofrecer un índice numérico de usabilidad. Además, la subjetividad inherente a las respuestas puede llevar a interpretaciones variadas de los resultados entre usuarios, lo que requiere cautela al analizar los datos obtenidos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Desarrollar un entorno virtual enfocado en la rehabilitación del Síndrome del Túnel Carpiano

1.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar y adquirir las herramientas y equipos necesarios, como computadoras, dispositivos de captura de movimiento y otros periféricos, para la implementación del entorno virtual.
- Seleccionar los tratamientos fisioterapéuticos aplicables a un entorno virtual, considerando factores como la reducción del dolor, mejoría de la función motora y resultados a largo plazo.
- Desarrollar un prototipo funcional del entorno de realidad virtual utilizando el software Unity 3D y guantes hápticos, incorporando ejercicios específicos para la rehabilitación del STC y asegurando una retroalimentación sensorial adecuada.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Los materiales utilizados son una recopilación de software y hardware compatible a partir de la selección de equipos de realidad virtual y equipos hápticos que se adaptan al cumplimiento del objetivo general. Estos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales: Software – Hardware empleados.

SOFTWARE / HARDWARE	DESCRIPCIÓN	FIGURA
HTC VIVE PRO 2	Es un dispositivo de realidad virtual diseñado para proporcionar una experiencia inmersiva a los usuarios en entornos digitales tridimensionales.	
CONTROLADORES CAPTOGLOVE	Son dispositivos portátiles que se colocan en las manos y permiten a los usuarios interactuar con entornos virtuales utilizando gestos y movimientos naturales.	
UNITY 3D	Es un motor de desarrollo de videojuegos utilizado para crear juegos y aplicaciones interactivas para diversas plataformas.	
STEAM VR	Es una plataforma de realidad virtual creada por Valve Corporation que ofrece acceso a juegos, aplicaciones y contenido VR a través de dispositivos compatibles con SteamVR, como HTC Vive y Oculus Rift.	

SOFTWARE / HARDWARE	DESCRIPCIÓN	FIGURA
DRIVERS HTC VIVE	Son programas de software diseñados para permitir que el dispositivo de realidad virtual HTC Vive se comunique y funcione correctamente con una computadora.	

La manera en la que se seleccionó estos equipos fue siguiendo los criterios de ponderación y considerando la disponibilidad de los equipos que se detallan en el apartado de resultados.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

La presente investigación sobre el entorno virtual para la rehabilitación del Síndrome del Túnel Carpiano se fundamentó en una metodología mixta, la cual combinó enfoques cualitativos y cuantitativos para la recolección y análisis de información.

En el enfoque cualitativo, se llevó a cabo una entrevista focus group con el objetivo de determinar qué tratamiento podría ser implementado dentro del entorno virtual. Se exploró los ejercicios y actividades que podrían ser realizados, limitándose a aquellos movimientos que los dispositivos podían capturar de manera efectiva. Esto aseguró una selección precisa de los ejercicios que podrían ser aplicados en el entorno virtual, descartando aquellos que no podían ser capturados por los dispositivos.

Adicionalmente, se implementó un enfoque cuantitativo para la selección de los equipos, empleando matrices de priorización que ponderaron criterios como precio, resolución, disponibilidad y campo de visión. Esto posibilitó la comparación objetiva de las diferentes opciones disponibles, asegurando la adquisición de equipos que cumplieran con los requisitos técnicos y presupuestarios del proyecto.

Investigación bibliográfica

Esta investigación abarca una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre tecnologías de realidad virtual aplicadas a la rehabilitación, así como estudios específicos relacionados con el tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano.

Se revisaron investigaciones previas que detallan los ejercicios y tratamientos recomendados para la rehabilitación de esta condición, así como las tecnologías y dispositivos utilizados en entornos virtuales con propósitos terapéuticos. Además, se analizan las tendencias actuales en el uso de la realidad virtual en el campo de la fisioterapia y la rehabilitación, con el fin de identificar las mejores prácticas y aplicarlas en el diseño del entorno virtual propuesto. Esta investigación bibliográfica proporciona una base sólida y fundamentada para el desarrollo del proyecto, asegurando que se incorporen enfoques y técnicas respaldadas por la evidencia científica disponible.

Investigación aplicada

El presente proyecto es de aplicación debido a que se realizaron pruebas del funcionamiento para lograr implementarlo en el proceso de rehabilitación, además de la aplicación de conocimientos basados en programación orientada a objetos para la relación de los usuarios con el entorno.

La investigación aplicada permite lograr la conexión y relación de los equipos de visualización de realidad virtual y equipos hápticos que permiten la captura de movimiento para la interacción de los movimientos de los usuarios.

Las pruebas de funcionamiento del entorno virtual serán referentes a:

- Navegación a través de las ventanas virtuales
- Conexión de auriculares y guantes hápticos
- Captura de movimiento en tiempo real
- Lectura de niveles de apertura y cierre de manos

- Pruebas de comandos configurados
- Visualización de estado de equipos

2.2.2 Población y muestra

La validación del proyecto consta de la aplicación de una muestra poblacional de personas afectadas por el Síndrome del Túnel Carpiano. El túnel carpiano afecta al 3% de la población a nivel mundial por lo que para la factibilidad del estudio se limitó a la población de la ciudad de Ambato que posee una población de 177320 habitantes, siendo el equivalente al 3% de la población igual a 5320 las que pertenecen al grupo afectado por el Síndrome del Túnel Carpiano.

Los parámetros para determinar la muestra son un nivel de confianza (Z) igual al 85% y el error correspondiente al 15% a través de la fórmula de la muestra para población finita mediante los cuales se obtuvo que la muestra para el presente estudio es de 23.

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N-1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

$$n = \frac{5320 * 1.44^2 * 0.5 * 0.5}{0.15^2 * (5320-1) + 1.44^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = 23$$

La muestra se seleccionó bajo el criterio de nivel de afectación siendo únicamente aplicable para la fase inicial, siendo escogidos con ayuda de un profesional, que evaluó previamente a los mismos, cuyo objetivo es reducir la inflamación y dolor con ejercicios suaves de estiramiento y movilidad e intermedia además de mantener los ejercicios de estiramiento, y adicional se utilizó como un complemento para la terapia tradicional.

2.2.3 Recolección de información

Se llevó a cabo una entrevista focus group con un grupo de profesionales en el área del Distrito 3 de la salud, incluyendo fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales y médicos especialistas en mano, con el fin de comprender los tratamientos utilizados para el Síndrome del Túnel Carpiano (STC) y explorar cómo un entorno virtual podría adaptarse para mejorar la rehabilitación de esta condición. Durante la entrevista, los participantes fueron seleccionados por su experiencia en el tratamiento y rehabilitación del STC, y se exploraron los diferentes tipos de tratamientos utilizados, así como sus ventajas y desventajas percibidas en la rehabilitación del STC.

Los resultados de la entrevista proporcionaron una visión detallada de los tratamientos actuales para el Síndrome del Túnel Carpiano. Se identificaron diferentes enfoques de tratamiento, incluyendo el uso de férulas, terapia física, infiltraciones de corticosteroides y cirugía. Los profesionales de la salud discutieron las ventajas y desventajas de cada tratamiento, así como su efectividad percibida en la rehabilitación del STC. La terapia física se seleccionó como el enfoque principal para el estudio, ya que se considera adaptable a un entorno virtual.

Los ejercicios de terapia física, como los de estiramiento y fortalecimiento, fueron mencionados como una opción particularmente adecuada para la adaptación a un entorno virtual debido a su naturaleza repetitiva y su capacidad para ser guiados por instrucciones visuales. Esto permitiría una integración fluida de la terapia física en un entorno virtual, lo que podría mejorar la experiencia del paciente y la eficacia del tratamiento.

Los hallazgos respaldan la exploración de un entorno virtual como una herramienta complementaria para mejorar la efectividad y la experiencia de rehabilitación del Síndrome del Túnel Carpiano. La terapia física se identificó como un tratamiento adecuado para adaptarse a un entorno virtual, ofreciendo alternativas innovadoras y efectivas a los tratamientos convencionales. Esto podría conducir a una rehabilitación más eficiente y cómoda para los pacientes con STC, mejorando así su calidad de vida.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

Los parámetros de aplicación para el análisis y procesamiento de datos constan de:

- Evaluación de información recolectada y dando prioridad a los datos más relevantes para la investigación.
- Registrar los datos cuantitativos iniciales para establecer el punto de partida de evaluación.
- Implementar metodologías acordes a la información recolectada como los cuestionarios de usabilidad, pruebas estadísticas t student para evaluar la factibilidad del sistema.
- Analizar los resultados obtenidos mediante una comparación y determinar las mejoras y ventajas del uso de entornos virtuales enfocados en rehabilitación.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Selección de equipos y herramientas para entornos virtuales

Se llevó a cabo la selección de los equipos necesarios mediante una exhaustiva búsqueda y revisión bibliográfica de hardware y sus respectivas características en diversas plataformas web de venta tecnológica confiables. Entre estas plataformas destacan Amazon y eBay, reconocidas por ofrecer una interfaz intuitiva y de fácil manejo. Estas dos plataformas son piezas fundamentales en el ámbito del comercio tecnológico a nivel mundial, proporcionando información detallada sobre los productos y sus proveedores.

A través de esta investigación, se obtuvo información crucial para la búsqueda bibliográfica de manuales que detallan las características esenciales de los principales periféricos de realidad virtual (RV) y otros equipos relevantes. El objetivo principal de este proceso fue asegurarse de que los equipos seleccionados cumplieran con los requisitos específicos del presente proyecto.

Dado que se trabaja en un entorno virtual, es esencial contar con visores que faciliten la interacción con dicho entorno. Además, se requiere el uso de equipos hápticos que puedan vincularse con los visores y, al mismo tiempo, capturar el movimiento de las extremidades superiores, especialmente de las manos. Esto es crucial para llevar a cabo ejercicios de rehabilitación para el Síndrome del Túnel Carpiano (STC). En este contexto, se optó por la utilización de guantes hápticos.

La metodología de selección empleada se basa en matrices de priorización, en las cuales se presentaron los criterios clave evaluados. Estos criterios fueron fundamentales para determinar las alternativas de implementación que mejor se ajustan a los requerimientos del proyecto.

3.1.1 Equipos preseleccionados

Considerando los requisitos de los equipos necesarios, se realizó una preselección de cuatro modelos distintos de guantes hápticos y cinco tipos de visores de realidad virtual (VR). Estos dispositivos cumplen parcialmente con los requisitos del proyecto, según

la información detallada en los manuales proporcionados por cada fabricante. A partir de esta preselección, se llevó a cabo un proceso de evaluación de criterios de prioridad para seleccionar finalmente un tipo específico de guante háptico y un visor VR que se alinearan mejor con los objetivos y necesidades del proyecto.

A continuación, en la Tabla 3 se muestran los equipos preseleccionados:

Tabla 2. Equipos preseleccionados

Guantes Hápticos	Visores VR
Gloveone	Oculus Quest 3
Manus Quantum Metagloves	PlayStation VR 2
	HP Reverb G2
CaptoGlove	Oculus Rift S
Dexmo	HTC Vive Pro 2

3.1.2 Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación descritos en la Tabla 2 fueron seleccionados considerando las características comunes de cada equipo de realidad virtual y otros factores económicos y tecnológicos relevantes. Se otorgó especial importancia a la disponibilidad de equipos ya existentes en la Universidad Técnica de Ambato, dado que esta situación puede optimizar significativamente los recursos temporales y financieros disponibles para proyectos específicos.

El criterio de precio desempeña un papel fundamental en la toma de decisiones, incluso cuando los dispositivos ya están en posesión. Esto se debe a varios motivos. En primer lugar, la evaluación del costo asegura que la adquisición de equipos no supere el presupuesto asignado, facilitando una gestión financiera eficiente y responsable, especialmente en proyectos con recursos financieros limitados. Además, comparar los costos entre opciones similares permite optimizar el uso de recursos, asignando los fondos disponibles de manera estratégica hacia otras áreas críticas del proyecto.

Evaluar el costo en relación con el rendimiento y las características específicas del equipo es crucial. En algunos casos, un dispositivo puede ofrecer características adicionales que no son necesarias para el proyecto, haciendo que una opción más

económica sea la más adecuada y práctica. Asimismo, es importante considerar la sostenibilidad financiera a largo plazo, no limitándose solo al precio inicial de adquisición, sino también incluyendo los costos operativos y de mantenimiento durante el ciclo de vida del equipo.

Finalmente, la consideración del costo debe alinearse estrechamente con los objetivos y prioridades del proyecto en cuestión. Esto implica equilibrar la calidad y la eficiencia del equipo con la inversión financiera, garantizando que cada gasto esté justificado por el valor agregado al proyecto. En resumen, la integración efectiva del criterio de costo en el proceso de toma de decisiones no solo asegura una gestión financiera sólida, sino que también promueve la optimización de recursos y la alineación estratégica con los objetivos establecidos.

Tabla 3. Criterios de evaluación

Guantes Hápticos	**Visores VR**
Precio USD	Precio USD
Sensores	Resolución
Disponibilidad	Disponibilidad
Peso (gr)	Campo de visión
Plataformas soportadas	

A partir de los criterios determinados para cada uno de los equipos se ponderó los casos de acuerdo con su importancia en el proceso de evaluación y selección de equipos VR a implementar.

3.1.3 Ponderación criterios guantes hápticos

La ponderación de los criterios para la selección de guantes hápticos consta de los porcentajes que se muestran en la Tabla 4 a continuación, teniendo mayor relevancia la disponibilidad, ya que incurre en una reducción de los costos y con menor relevancia se encuentra el peso debido a la mínima diferencia encontrada para cada uno de los

fabricantes. Se aplicó una escala de calificación de 1 a 10 siendo 1 el valor que presenta el peor caso y 10 representa el mejor caso a partir de los cuales se evalúan las características considerando los criterios determinados anteriormente.

Tabla 4. Ponderación criterios guantes hápticos

Criterios	peso	Escala de calificación
Precio	25%	1 muy malo - 10 muy bueno
Sensores	20%	
Disponibilidad	30%	
Peso	5%	
Plataformas soportadas	20%	

3.1.4 Ponderación criterios visores VR

Se realizo el mismo proceso de ponderación para los criterios de selección de visores VR siendo el más importante la disponibilidad y el menos relevante el campo de visión como se puede apreciar en la Tabla 5, debido a que la diferencia entre cada uno de los visores es mínima lo cual asegura que la visualización del entorno virtual sea lo bastante optima sin afectar al usuario, pero complementando este criterio se encuentra la resolución que posee cada equipo que permite apreciar con mayor nitidez y fluidez los detalles que se utilicen en el proyecto siendo este último criterio más importante que el rango de visión.

Tabla 5. Ponderación criterios visores VR

Criterios	peso	Escala de calificación
Precio	30%	1 muy malo - 10 muy bueno
Resolución	20%	
Disponibilidad	40%	
Campo de visión	10%	

3.1.5 Selección guantes hápticos

El proceso de selección para guantes hápticos consta de actividades secuenciales a partir de los criterios determinados. Acorde con los criterios se recopiló la información necesaria de acuerdo con la investigación bibliográfica de cada uno de los proveedores para considerar los aspectos a calificar, los mismos que se muestran en el Anexo C.

Se utilizó la escala de calificación para la obtención de la matriz de calificación acorde a las características presentadas en la matriz inicial. Tomando en consideración al mejor de los casos con una calificación de 10 y redondeando a enteros las calificaciones de los demás equipos acorde al máximo puntaje. Finalmente se normalizan los datos acordes al porcentaje de ponderación de cada uno de los criterios para obtener la matriz normalizada con los resultados rankeados de la selección aplicada.

Tabla 6. Matriz normalizada con resultados

Criterios / Equipos	Precio	Sensores	Disponibilidad	Peso	Plataformas soportadas	Total	Ranking
Gloveone	2,5	2	0,3	0,25	1	6,05	3
Manus Quantum Metagloves	0,25	1,2	1,5	0,3	2	5,25	4
CaptoGlove	1	1	3	0,5	2	7,5	1
Dexmo	1,5	2	0,6	0,25	2	6,35	2

En el caso de los guantes hápticos se obtuvo como ganador a la marca CaptoGlove con un total de 7,5/10 sobresaliendo con los criterios de disponibilidad y plataformas soportadas debido, es decir que es la mejor alternativa que permite cumplir con las necesidades del proyecto.

3.1.6 Selección de visores VR

El proceso de selección para el visor VR consta de actividades secuenciales a partir de los criterios determinados. Acorde con los criterios, se recopiló la información necesaria de cada uno de los fabricantes para cada criterio a calificar, los mismos que se muestran en la matriz inicial. Este enfoque meticuloso asegura una comparación

exhaustiva y objetiva entre las opciones disponibles, facilitando una decisión informada y eficaz.

Tabla 7. Matriz normalizada con resultados

Criterios / Equipos	Precio	resolución	Disponibilidad	Campo de visión (grados)	Total	Ranking
Oculus Quest 3	1,8	1,6	2	0,8	6,2	4
PlayStation VR 2	2,1	1,6	2	0,8	6,5	3
HP Reverb G2	1,5	1,6	2	0,9	6	5
Oculus Rift S	3	0,8	2	0,8	6,6	2
HTC Vive Pro 2	1,2	2	4	1	8,2	1

Se utilizó la escala de calificación para la obtención de la matriz de calificación acorde a las características presentadas en la matriz inicial tomando en consideración con una calificación de 10 a la mejor alternativa de cada criterio y redondeando a enteros las calificaciones de los demás equipos acorde a la máxima puntuación. Por último, se normalizan los datos acordes al porcentaje de ponderación de cada uno de los criterios para obtener la matriz normalizada con los resultados rankeados de la selección aplicada.

En la Tabla 7 se muestra los valores obtenidos en la selección de visor VR en la que se tiene a los visores HTC Vive Pro 2, con una calificación de 8,2/10 destacando en aspectos como son resolución, disponibilidad y campo de visión siendo la mejor alternativa para la investigación.

3.2 Dispositivos

Los visores HTC Vive Pro 2 y los guantes hápticos CaptoGlove poseen cualidades y características que permiten su integración y conexión mediante las herramientas Steam VR y Unity 3D. Esta compatibilidad facilita la creación de entornos de realidad virtual avanzados y precisos, optimizando la interacción usuario-sistema.

Las gafas de realidad virtual HTC VIVE PRO 2 es uno de los mejores visores RV que se pueden encontrar en el mercado tecnológico debido a sus potentes características que sobresalen por encima de la competencia y su software que permite adaptarse a

múltiples plataformas de desarrollo, requiere un ordenador potente para desempeñarse al máximo de su capacidad. A continuación, se detalla las características de estos visores:

Tabla 8. Características HTC Vive Pro 2

Ficha de características HTC Vive Pro 2	
HTC VIVE PRO 2	
PANTALLAS	Paneles duales LCD RGB 2.448 × 2.448 px por ojo (4.896 x 2.448 px combinado) 90/120 Hz, hasta 120º
AUDIO	Auriculares integrados Certificaciones Hi-Res (vía 3,5 mm) Doble micrófono
SENSORES	G-sensor Giroscopio Proximidad IPD SteamVR Tracking V2.0
CONECTIVIDAD	Bluetooth Display Port

Para obtener el movimiento de las manos del usuario se utiliza los guantes CaptoGlove que permiten la conexión mediante bluetooth de bajo consumo y a su vez con la herramienta SteamVR. CaptoGlove nace como una herramienta de rehabilitación que con los años se ha convertido en una interfaz que permite la relación hombre máquina, con su software desarrollado permite innovar en distintos ámbitos de la tecnología.

Tabla 9. Características CaptoGlove

Ficha de características CaptoGlove	
CAPTOGLOVE	
SENSORES	5 sensores de flexión 1 CaptoSensor 1 sensor de presión Capto Suite
CONECTIVIDAD	Bluetooth Mini USB

3.3 Selección de tratamientos fisioterapéuticos aplicables a un entorno virtual.

Para la selección de los tratamientos óptimos se tomó en consideración diversos factores con base a la selección y prueba de equipos de realidad virtual mostrados en el apartado anterior y además se complementa con factores obtenidos mediante las técnicas como son: Observación, entrevistas y focus group.

Mediante entrevistas y Focus group con especialistas en rehabilitación se determinó los tipos de tratamiento de STC, para lo cual se debe llevar a cabo en primera instancia un diagnóstico de gravedad para establecer el grado de afección. Los tratamientos se aplican acorde al grado de afección, para los casos graves y para los cuales las terapias tradicionales no han mostrado mejoría se opta por cirugía, siendo la última alternativa a prescribir, por el contrario, si la afección se diagnostica a tiempo y se determina que tienen un grado de afección leve y moderado se aplican la terapia con tratamientos no quirúrgicos siendo estos los preseleccionados para ser implementados en un entorno virtual.

Dentro de los tratamientos se presentaron: el uso de férula, uso de antiinflamatorios, corticoides y terapia para manos. Los equipos seleccionados permiten establecer que los criterios de rehabilitación deben permitir el uso de terapia para manos, por lo cual se eliminan los tratamientos de uso de férula, uso de antiinflamatorios y corticoides ya que se aplican con medicamentos y herramientas externas a la fisioterapia.

La terapia para manos establece una serie de ejercicios enfocados en la reducción del dolor, recuperar la función motora y fortalecimiento de extremidades para recuperar fuerza en el agarre.

3.4 Selección del tratamiento y ejercicios.

El tratamiento seleccionado acorde al proyecto de investigación es la terapia de manos, en este contexto los procesos de rehabilitación buscan restaurar la función comprometida de la mano y la muñeca, afectada por la compresión del nervio mediano en el túnel carpiano. La gama de ejercicios existentes como: ejercicios de estiramiento, fortalecimiento muscular, movilidad articular, coordinación y destreza generan una última selección para el proyecto de investigación.

Al tratarse de un síndrome que causa una compresión del nervio mediano en la muñeca, lo que resulta en debilidad muscular y pérdida de control en la mano y los dedos. Al fortalecer los músculos afectados, se puede mejorar la estabilidad de la articulación y reducir la presión sobre el nervio afectado, facilitando así la rehabilitación y la recuperación funcional.

los ejercicios de fortalecimiento articular proporcionan una base sólida para la creación de un entorno virtual de rehabilitación. Este enfoque permite diseñar programas de ejercicio específicamente adaptados para ser realizados dentro de un entorno interactivo y motivador. Utilizando tecnología como Captoglove u otros dispositivos de realidad virtual, se puede monitorizar y optimizar la ejecución de los ejercicios, proporcionando retroalimentación en tiempo real.

3.4.1 Arquitectura del sistema de realidad virtual

La arquitectura de realidad virtual utilizada en el presente proyecto se basa en una conexión que permite la relación y el intercambio de información mediante el motor gráfico Unity 3D. Este motor se encarga de recibir la información de los equipos de realidad virtual, específicamente los auriculares HTC, y de los equipos hápticos, en este caso, los guantes CaptoGlove. Unity 3D procesa estos datos para determinar las

acciones y movimientos realizados por el usuario, mostrando en tiempo real los movimientos y acciones a través de los visores de realidad virtual.

La incorporación de equipos hápticos permite el enfoque hacia el cumplimiento del objetivo del proyecto, que es la mejora de la movilidad de las extremidades superiores mediante la realización de rutinas de rehabilitación apropiadas para el paciente. Los guantes CaptoGlove capturan los movimientos de la mano y los dedos, permitiendo una interacción precisa y natural dentro del entorno virtual.

En la Figura 11 se muestra la arquitectura del sistema de realidad virtual se resume en un flujo de trabajo donde los dispositivos de entrada/salida (I/O), específicamente los auriculares HTC y los guantes CaptoGlove, capturan y transmiten datos de los movimientos del usuario. Estos datos son recibidos y procesados por el motor de realidad virtual Unity 3D, que coordina la lógica del entorno virtual y renderiza las escenas en tiempo real. El usuario interactúa con el entorno virtual a través de estos dispositivos I/O, realizando las rutinas de ejercicios diseñadas para la rehabilitación. Las rutinas incluyen ejercicios específicos para mejorar la movilidad de las manos y muñecas, con tiempos y objetivos claramente definidos para cada escena.

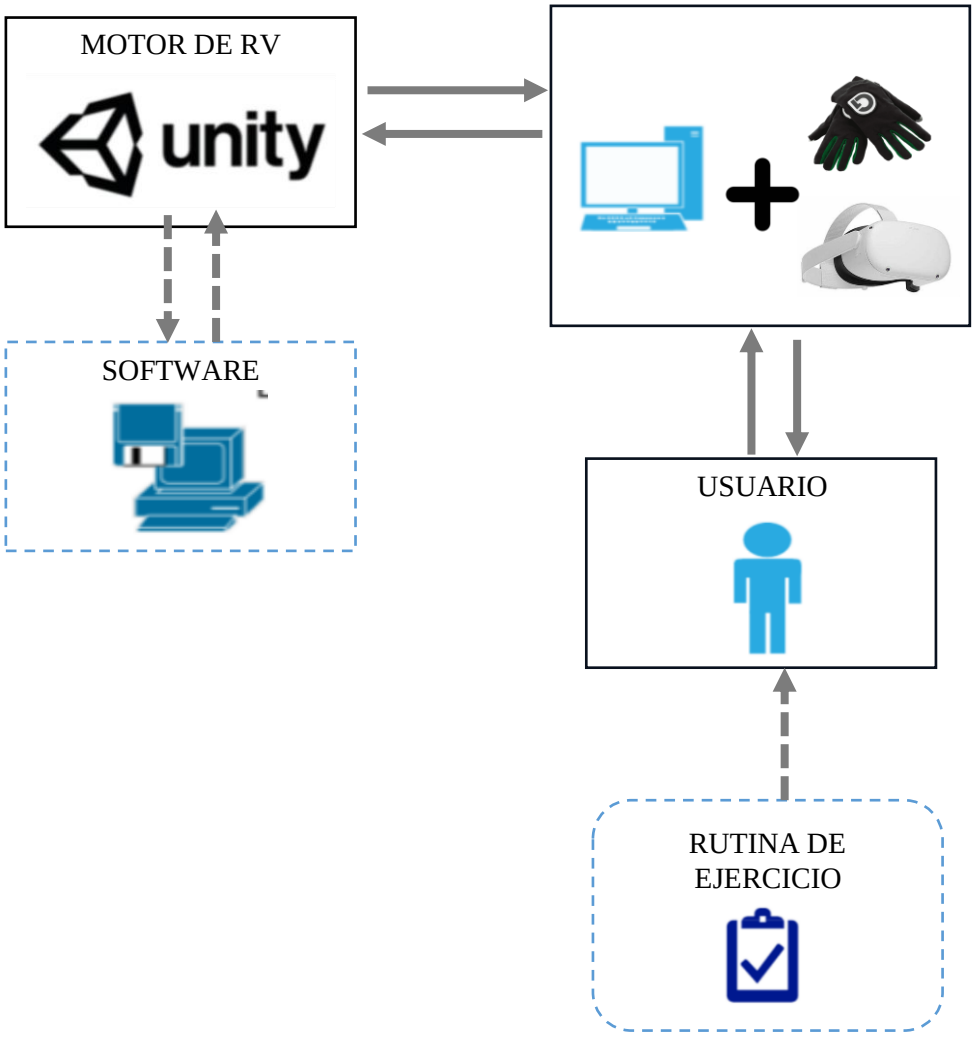


Figura 3 Arquitectura realidad virtual

3.4.2 Perfiles Captoglovc

En el contexto de los ejercicios seleccionados de fortalecimiento muscular, se han optado por adaptar 4 movimiento, cierre y apertura de mano y flexión de pulgar y reposición del mismo. Para ajustar los perfiles disponibles en Captoglove y capturar con precisión los movimientos específicos utilizados en la rehabilitación del Síndrome del Túnel Carpiano, varios parámetros clave fueron modificados para optimizar la detección y la respuesta del guante inteligente. Los perfiles estándar como Middle Bending, Thumb Bending y Pressure Thumb proporcionan una base, pero requerían adaptaciones específicas para cumplir con los objetivos terapéuticos.

Primero, se ajustaron los parámetros de sensibilidad dentro de cada perfil para asegurar que los movimientos de cierre y apertura de mano fueran detectados con precisión. Esto implicó calibrar la sensibilidad de los sensores para reconocer la flexión de los dedos medio y anular durante el movimiento de agarre. Al modificar estos parámetros, se logró una respuesta más precisa y consistente en la captura del movimiento de cierre de mano, crucial para la restauración de la fuerza y la destreza en las actividades diarias.

En contraste, para el movimiento de apertura de mano, que se basó en la extensión de los dedos, se realizaron ajustes adicionales en la configuración de sensibilidad para detectar la liberación controlada de objetos virtuales. Aunque este movimiento no estaba explícitamente delineado en los perfiles estándar de Captoglove, se logró adaptar la respuesta del dispositivo mediante una configuración cuidadosa de los parámetros existentes, permitiendo así una rehabilitación efectiva de la funcionalidad de la mano comprometida por el Síndrome del Túnel Carpiano.

El perfil de Thumb Bending se modificó específicamente para capturar la flexión precisa del pulgar hacia la palma. Ajustes en la sensibilidad y en la asignación de acciones, como la manipulación virtual de objetos con el pulgar, fueron implementados para asegurar que este movimiento crucial para la precisión del agarre fuera detectado con exactitud y reproducibilidad.

Por último, el perfil de Pressure Thumb fue adaptado para registrar la presión aplicada por el pulgar durante la reposición a su posición inicial después de la flexión. Ajustes en la respuesta de los sensores permitieron capturar de manera precisa la fuerza y la dirección del movimiento del pulgar, facilitando así la rehabilitación enfocada en la restauración de la coordinación fina y la funcionalidad de la mano afectada por el Síndrome del Túnel Carpiano.

A través de las pruebas realizadas se establecieron los principales movimientos y ejercicios de rehabilitación a implementar en el entorno virtual siendo los mostrados a continuación:



Figura 4. Flexión de pulgar



Figura 5. Apertura y cierre de la mano



Figura 6. Rotación palmar

3.5 Diseño de escenas en Unity

El desarrollo del escenario virtual se manejó la combinación de dispositivos de realidad virtual, equipos hápticos y el uso de tecnologías (Unity, CaptoGlove, Steam VR) que a través del análisis y manejo individual de cada uno de ellos permitió combinarlos para una correcta relación en tiempo real para el beneficio del presente proyecto. Las escenas constan de una ventana de inicio en el cual se muestra la interfaz de usuario y el menú para manejarse a través de las escenas de ejercicios, en la misma el usuario puede realizar pruebas de funcionamiento de los comandos principales de uso de los equipos. Además, se utilizan dos escenas en la cuales se implementan los ejercicios y movimientos de rehabilitación con el tiempo del desarrollo para cada uno de estos, así mismo constan de botones que permiten navegar entre escenas.

3.5.1 Interfaz de usuario

El proceso para crear las pantallas, botones, menús y objetos que se relacionan con el usuario se detallan en este apartado de diseño de interfaz de usuario y desarrollo de escenas. Además, es importante establecer el diagrama de navegación para comprender la relación de las distintas escenas de ejercicios con la escena de menú principal como se detalla en la Figura 7.

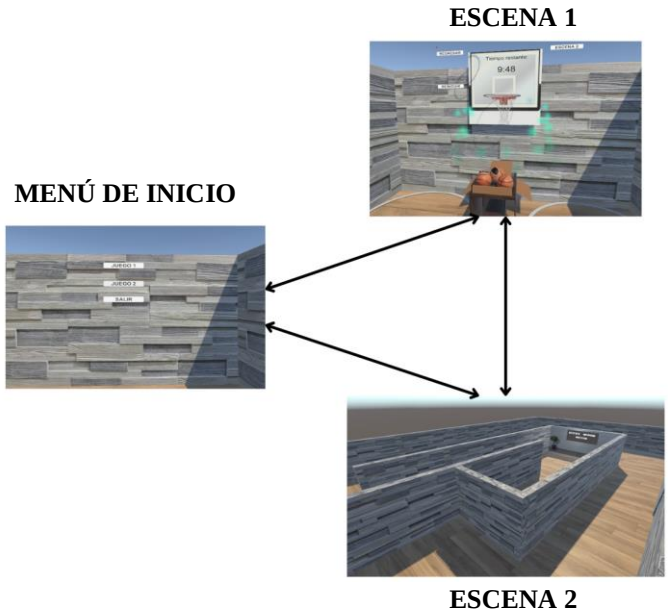


Figura 7. Diagrama de navegación de interfaz

En la Figura 14 se muestra el diagrama de navegación de la interfaz. Este diagrama ilustra cómo, al utilizar el entorno virtual, el usuario puede navegar desde el menú principal a la escena 1 o la escena 2. En cada una de estas pantallas, hay botones que permiten moverse entre la escena 1 y la escena 2, así como regresar al menú principal o a la escena anterior. En resumen, todas las escenas permiten la navegación hacia cualquier otra escena.

3.5.2 Desarrollo escena de menú principal

En la escena virtual 3D del menú principal contiene un botón para trasladarse a cada una de las escenas de ejercicios de rehabilitación, un botón que permite salir del entorno virtual.

Para el desarrollo de la escena de menú principal se debe considerar como base la conexión realizada en las pruebas de funcionamiento para proceder a crear esta escena mediante el uso de canvas y un panel en el cual se muestran los botones, siendo de consideración un escalamiento del canvas en el mismo que se debe considerar el render mode como *World Space* debido a que el visor presenta dos pantallas, de igual manera se establece como cámara de evento a la VRCamera del player que se mencionó anteriormente.

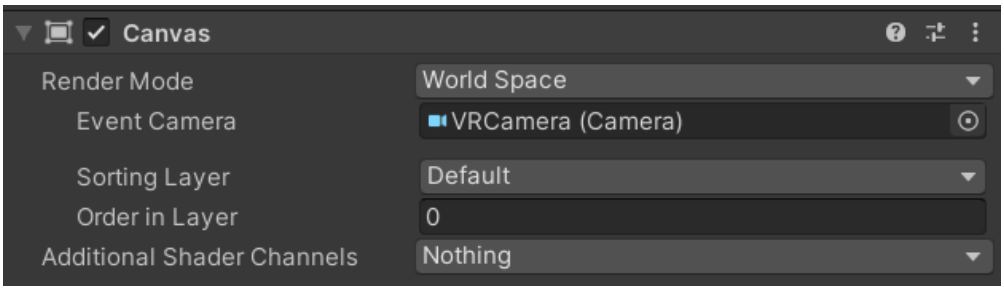


Figura 8. Configuración visión canvas

En el canvas se encuentran los botones de escenas y salir que permiten la navegación entre escenas, además de incorporar un diseño de una habitación de museo con el espacio para desarrollar prácticas de los comandos y captura de movimiento y reflejo en tiempo real de los equipos hápticos.



Figura 9. Escena menú principal

3.5.3 Diseño escena 1 (encestar el balón)

En el desarrollo de las rutinas de ejercicios se consideraron los principales movimientos capturados a través de Unity y se estableció seccionarlos en dos escenas con distintas rutinas de ejercicios. En la primera escena, se diseñó una rutina de diez minutos de duración, siendo este el promedio de realización de cada ejercicio. Los ejercicios incluyen la apertura y cierre de mano para tomar objetos dentro del entorno virtual, así como el desplazamiento y rotación de las muñecas para el movimiento y cambio de posición de los objetos utilizados.

Para el efecto he diseñado una escena de baloncesto en Unity como parte de un programa de rehabilitación para el Síndrome del Túnel Carpiano, enfocándome en ejercicios específicos de cierre, apertura y extensión de la muñeca. La razón principal para elegir el acto de encestar el balón es que este movimiento involucra una serie de acciones que son cruciales para la recuperación funcional de la mano y la muñeca. Al diseñar una actividad en la que el paciente debe agarrar el balón, prepararse para el lanzamiento y finalmente encestar, se promueve un rango completo de movimientos que fortalecen y flexibilizan las articulaciones afectadas.

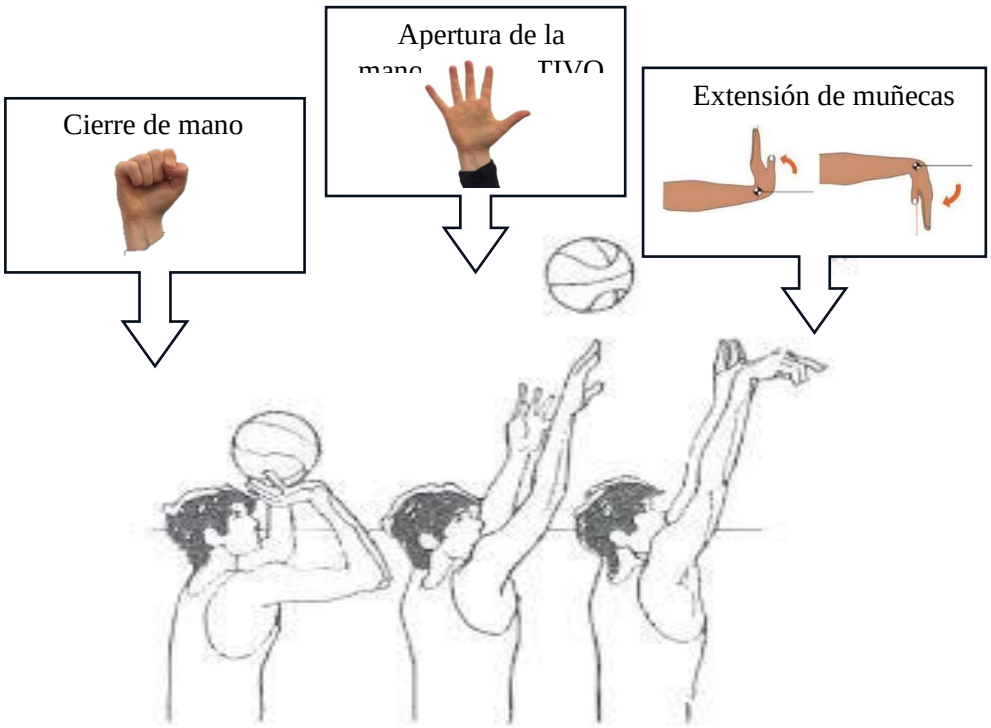


Figura 10. Ejercicios empleados en la escena 1

El beneficio de este enfoque es múltiple. Primero, el movimiento de agarrar el balón simula el cierre de la mano, un ejercicio esencial para recuperar la fuerza de agarre. Luego, al soltar el balón, se practica la apertura de la mano, un movimiento fundamental para la destreza manual. Finalmente, el lanzamiento del balón hacia la canasta implica la extensión de la muñeca, un ejercicio crucial para mejorar el rango de movimiento y la flexibilidad de la muñeca. Estos movimientos combinados no solo trabajan los músculos y las articulaciones de la mano y la muñeca, sino que también mejoran la coordinación y la precisión motora.

Además, la actividad de encestar un balón de baloncesto añade un elemento lúdico y motivacional al proceso de rehabilitación. La gamificación del ejercicio terapéutico hace que el paciente esté más comprometido y disfrute del proceso de recuperación, lo cual es esencial para la adherencia a largo plazo al tratamiento. En la Figura 7., se muestra al jugador en frente de un aro de básquet. La idea principal del juego es encestar el balón durante el tiempo mostrado.

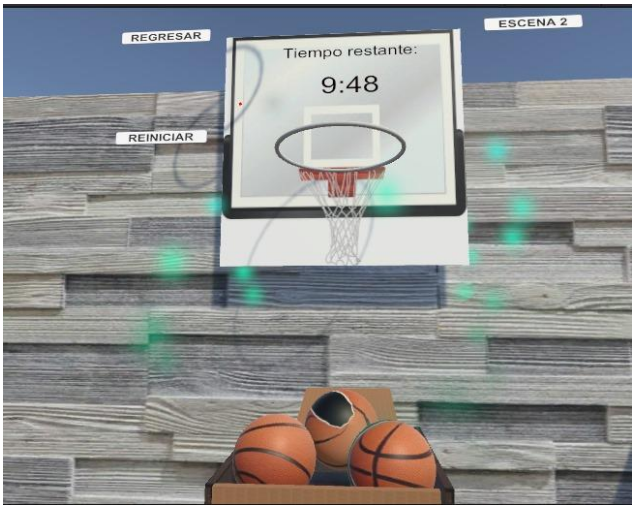


Figura 11. Vista jugador escena 1.

3.5.4 Diseño escena 2 (teletransportación)

Finalmente, en la última escena se incluyó un ejercicio que implica el estiramiento y flexión de pulgar a través de un laberinto básico. En este ejercicio, mediante la flexión del pulgar, se determina el lugar de desplazamiento, y con la extensión del mismo, se logra el cambio de posición. Esta escena busca que el paciente logre encontrar la salida en un tiempo aproximado de cinco a diez minutos, evitando la frustración y sobreexigencia de las extremidades a rehabilitar.



Figura 12. Ejercicios empleados en la escena 2.

La escena diseñada del laberinto virtual se centra en el ejercicio de flexión de pulgar con reposición, utilizado para mejorar la coordinación y la destreza del pulgar. Durante la navegación por el laberinto, los usuarios realizan movimientos de flexión y reposición del pulgar para activar el teletransporte y avanzar a través del entorno virtual. Este ejercicio no solo contribuye a fortalecer los músculos responsables del

movimiento del pulgar, sino que también mejora la capacidad del paciente para realizar tareas que requieren precisión y control, como la manipulación de objetos y la realización de movimientos delicados. En la Figura 9 se muestra la escena diseñada de lo que se describe.

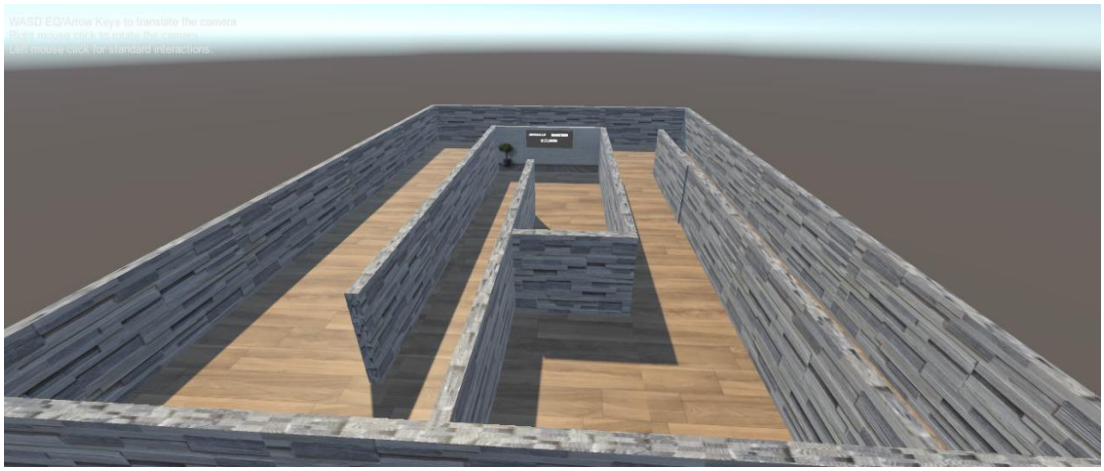


Figura 13. Vista jugador escena 2

3.5.5 Relación de escenas con el usuario

Para establecer la conexión entre la escena, los guantes hápticos y los visores se utilizó los drivers CaptoGlove y SteamVR mediante los plugin de Steam que facilitan las acciones de interactividad con los objetos creados virtualmente. A continuación, en la Figura 13 se muestra la arquitectura de los elementos implicados dentro del entorno. La escena consta de un menú principal y las acciones del usuario a través de las herramientas RV mismas que contienen los elementos mostrados en el diagrama de clase UML mostrado a continuación:

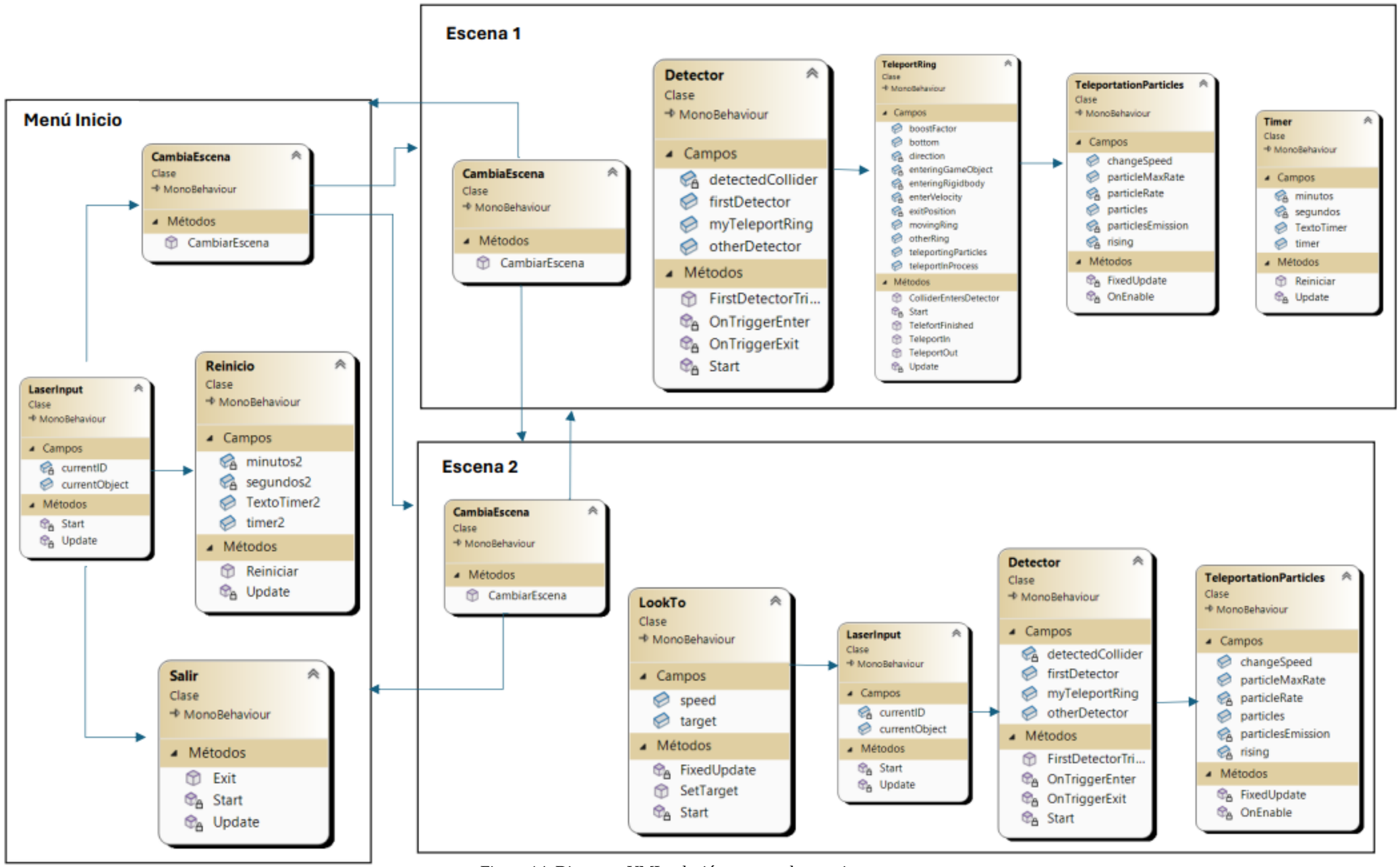


Figura 14. Diagrama UML relación escenas de usuario

3.6 Pruebas de aplicación

Las pruebas de la aplicación se realizaron sobre la población preestablecida para lo cual se llevó a cabo la evaluación inicial en cada uno de los pacientes para determinar el porcentaje de movilidad que poseen en cada una de sus extremidades, dentro de los pacientes considerados para las pruebas se encontraron pacientes con rehabilitación post operatoria y pacientes con un nivel de afección considerados leves y moderados.

El número de pruebas realizadas con el grupo seleccionado utilizando el entorno de realidad virtual desarrollado fue de 20 sesiones, es decir 4 semanas de pruebas, cada sesión consta de una duración de aproximada entre 10 y 15 minutos, entre actividad se realiza un descanso de 2 minutos, dentro de los mismos también se toma en consideración la repetición de los ejercicios de acuerdo con las escenas presentadas.



Figura 15. Ejercicios realizados en el entorno virtual, escena 1.



Figura 16. Ejercicios realizados en el entorno virtual, escena 2.



Figura 17. Ejercicios realizados en el entorno virtual, escena 2.

Al realizar la primera sesión se da a conocer a cada uno de los pacientes el funcionamiento del entorno con cada una de las escenas y los objetivos presentados en las mismas, además de presentar los equipos utilizados y sus comandos de funcionamiento. Los resultados obtenidos antes de la primera sesión con respecto a la movilidad de cada una de las manos de los pacientes se muestran en la Figura 15 con valores referenciales en porcentaje.

Las observaciones de la evaluación inicial con respecto a cada uno de los pacientes fueron que los mejores resultados de movilidad se presentaron en pacientes que se encontraban en etapa de rehabilitación post operatoria y pacientes que llevan el proceso de rehabilitación medio-avanzado. En su gran mayoría la etapa de afección del STC es leve para la diferencia de pacientes por lo que los resultados de factibilidad serán alentadores.

Los resultados que se presentaron al final de las pruebas de funcionamiento se muestran en la Figura 18 en la misma que se puede observar la mejoría de cada uno de los pacientes. La distribución normalizada de la evaluación final se muestra con un desplazamiento hacia la derecha lo cual muestra el avance con respecto a la movilidad de las extremidades de los pacientes involucrados.

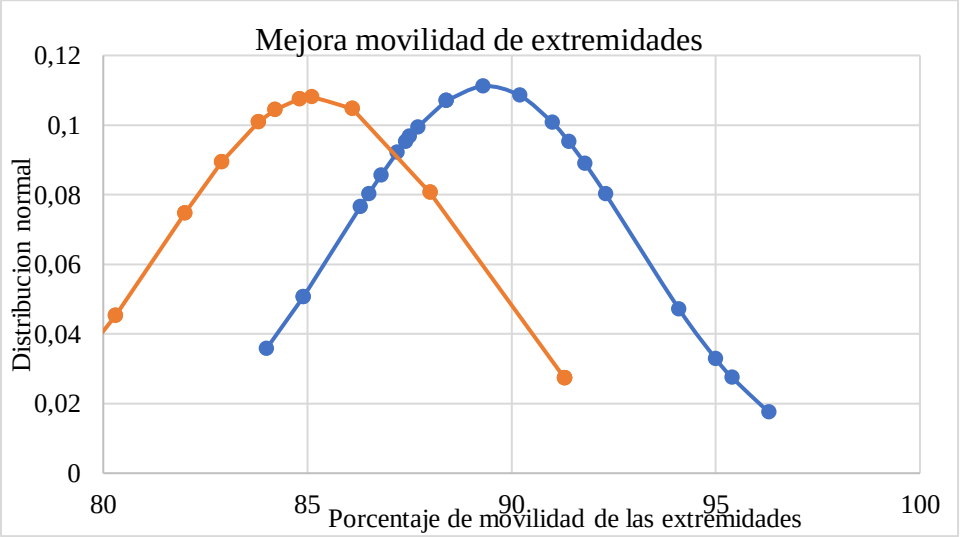


Figura 18. Mejora movilidad de extremidades

Dentro de las pruebas de aplicación se consideró el margen de error al detectar el correcto cierre de la mano y estiramiento y flexión de pulgar, siendo distintas las

repeticiones realizadas de cada ejercicio por cada uno de los pacientes, se analizó los agarres de objetos correctamente realizados y detectados por Unity, de igual manera los agarres fallidos o el error al realizar el agarre de los objetos virtuales siendo que en su mayoría se lo realizaron de una manera óptima, únicamente se generó un error promedio de 3.60% en cada uno de los cierres de mano detectados, mismos que se muestran en la Figura 16.

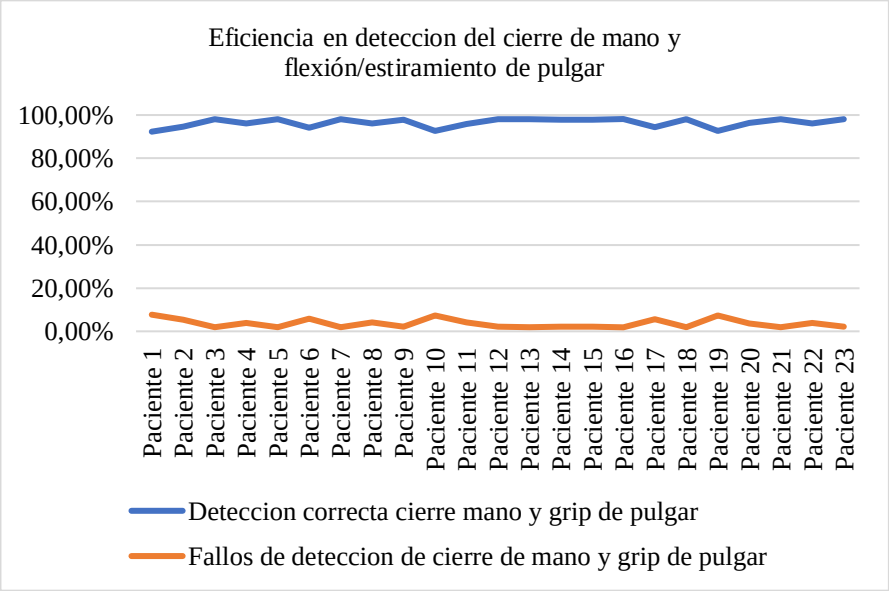


Figura 19. Eficiencia de la captura de movimientos

Resultados

Los resultados de las mediciones de aplicación iniciales y finales del funcionamiento permiten formular la hipótesis alternativa y nula mediante las cuales se utiliza la herramienta estadística T-student para muestras independientes, a partir de los datos muestrales, siendo que esta herramienta se puede aplicar para muestra menores a 30 y se determina como la óptima para el proyecto presentado.

Además de ser utilizada para comparar las medidas de dos grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos, siendo el primer grupo los datos recolectados de una evaluación inicial y el segundo grupo los datos recolectados al final del tratamiento, con el acompañamiento de un profesional fisioterapeuta que garantice que el sistema cumpla con el objetivo del proyecto y que las mediciones de evolución de los pacientes sean las adecuadas.

Hipótesis Alterna

Existe una diferencia significativa entre las medidas de los resultados antes y después del tratamiento $\mu 1 \neq \mu 2$.

Hipótesis Nula

Existe una diferencia no significativa entre las medidas de los resultados antes y después del tratamiento $\mu 1 = \mu 2$.

En consideración para el nivel de significancia se toma el 0,05 que se tomara en referencia para determinar posteriormente el estadístico *p* que permite validar o rechazar las hipótesis planteadas.

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (1)$$

$$t = \frac{(85{,}470 - 89{,}505)}{\sqrt{\frac{3{,}583^2}{20} + \frac{3{,}627^2}{20}}}$$

$$t = -3{,}538$$

El valor estadístico de la herramienta t student para los dos grupos dio como resultado -3,5389 que al compararla con la tabla p con grados de libertad de 40 se obtiene un valor *p=0.0005* para el total de las dos colas de la distribución se le otorga el valor de p≈0.001 y de esta manera se valida la hipótesis alterna debido a que el estadístico p es menor al grado de significancia (0.05) y se rechaza la hipótesis nula.

$$\mu 1 \neq \mu 2$$

$$0.0005 \neq 0.001$$

3.6.1 Cuestionario de usabilidad (SUS)

El Cuestionario de Usabilidad del Sistema (SUS, por sus siglas en inglés) es una herramienta comúnmente utilizada para evaluar la usabilidad de los sistemas, productos o servicios. Consiste en una serie de 10 preguntas que abordan aspectos como la facilidad de uso, la eficacia, la satisfacción del usuario y la intuitividad del sistema. A continuación, se describe cada pregunta para entender los diferentes aspectos que se evalúan en la usabilidad de un sistema.

La primera pregunta, "Creo que me gustaría usar este sistema con frecuencia", tiene como objetivo evaluar la disposición del usuario a utilizar el sistema en el futuro y su nivel de satisfacción general con él. Una respuesta positiva a esta pregunta indica que el usuario ha tenido una experiencia lo suficientemente buena como para considerar el uso continuo del sistema, lo que es crucial para la retención y el éxito a largo plazo del sistema. Si los usuarios expresan un deseo de usar el sistema regularmente, se puede inferir que encuentran valor en él y que satisface sus necesidades de manera efectiva.

En la segunda pregunta, "Encontré el sistema innecesariamente complejo", se mide la percepción del usuario sobre la complejidad del sistema. Un sistema fácil de usar debería recibir una calificación baja en esta pregunta, ya que la alta complejidad puede desalentar a los usuarios y dificultar su adopción. La simplicidad es un aspecto fundamental del diseño de la experiencia del usuario, y un sistema que se percibe como innecesariamente complicado puede generar frustración y rechazo, afectando negativamente la tasa de adopción y la satisfacción general del usuario.

La tercera pregunta, "Considero que el sistema es fácil de usar", evalúa la facilidad de uso percibida del sistema. Una calificación alta en esta pregunta sugiere que los usuarios encuentran el sistema intuitivo y accesible, lo cual es crucial para su aceptación y uso regular. La facilidad de uso no solo mejora la satisfacción del usuario, sino que también puede reducir la necesidad de soporte técnico y formación, lo que a su vez disminuye los costos operativos y mejora la eficiencia general del sistema.

La cuarta pregunta, "Creo que necesitaría la ayuda de una persona experta para usar este sistema", mide la percepción del usuario sobre la necesidad de ayuda externa para

utilizar el sistema. Un sistema bien diseñado debe ser lo suficientemente intuitivo como para que los usuarios no necesiten asistencia externa, reflejándose en una calificación baja en esta pregunta. La independencia del usuario es un indicador clave de una interfaz bien diseñada, ya que permite una mayor autonomía y reduce la dependencia de recursos de soporte.

La quinta pregunta, "Me sentí confiado utilizando el sistema", evalúa el nivel de confianza del usuario al utilizar el sistema. Una calificación alta indica que el usuario se sintió seguro y cómodo interactuando con el sistema, lo cual es fundamental para una experiencia de usuario positiva. La confianza en el uso del sistema puede llevar a una mayor eficiencia y productividad, ya que los usuarios se sienten capacitados para explorar y utilizar todas las funcionalidades disponibles sin temor a cometer errores.

La sexta pregunta, "Necesité aprender muchas cosas antes de poder utilizar el sistema", mide la percepción del usuario sobre la curva de aprendizaje del sistema. Se espera que un sistema bien diseñado tenga una curva de aprendizaje baja, facilitando la adopción rápida y eficaz por parte de los usuarios. Una curva de aprendizaje empinada puede ser una barrera significativa para la adopción, ya que los usuarios pueden sentirse abrumados y desmotivados si sienten que deben invertir mucho tiempo y esfuerzo para utilizar el sistema de manera efectiva.

La séptima pregunta, "Encontré que el sistema era muy inconsistente", evalúa la consistencia del sistema en términos de diseño y funcionamiento. Un sistema bien diseñado debe tener una interfaz coherente y predecible, por lo que una calificación baja en esta pregunta indica una experiencia de usuario positiva. La consistencia en el diseño ayuda a los usuarios a formarse expectativas claras sobre cómo funcionará el sistema, lo que puede reducir la carga cognitiva y aumentar la eficiencia y la satisfacción general.

La octava pregunta, "Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a usar este sistema rápidamente", mide la percepción del usuario sobre la facilidad de aprendizaje del sistema para otros usuarios. Una calificación alta indica que el usuario cree que otros también encontrarían el sistema fácil de aprender y utilizar. Esto es un buen indicador de la accesibilidad y usabilidad del sistema, sugiriendo que no solo es

intuitivo para el usuario actual, sino que también tiene un diseño universalmente accesible.

La novena pregunta, "Me resultó muy tedioso usar el sistema", evalúa la experiencia del usuario en términos de esfuerzo percibido al utilizar el sistema. Una calificación baja en esta pregunta sugiere que los usuarios no encontraron tedioso el uso del sistema, lo cual es un indicador de buena experiencia de usuario. La percepción de tedio puede ser un gran obstáculo para la adopción continua y el uso regular del sistema, por lo que minimizar esta percepción es clave para mantener el interés y la satisfacción del usuario.

Finalmente, la décima pregunta, "Estoy satisfecho con el sistema", evalúa la satisfacción general del usuario con el sistema. Una calificación alta en esta pregunta indica que el usuario está satisfecho con la experiencia general de uso del sistema, abarcando aspectos como la usabilidad, la funcionalidad y la eficiencia. La satisfacción del usuario es un indicador holístico de éxito, sugiriendo que el sistema cumple con las expectativas y necesidades del usuario, y que es probable que continúe siendo utilizado y recomendado.

Estas preguntas han sido adaptadas al presente proyecto con el fin de conocer la experiencia del usuario acerca de lo que se ha desarrollado. La usabilidad del sistema es de fácil entendimiento para los pacientes debido a que tiene una interfaz fácil de comprender de acuerdo con los ejercicios a realizar para rehabilitación del STC.

A los pacientes se evaluó mediante el cuestionario SUS para evaluar la usabilidad del sistema, consta de 10 preguntas con escalas de valoración de 1 (totalmente desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo) donde los resultados se sitúan en una escala de 0 a 100 siendo los valores más altos los que indican mayor usabilidad.

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los pacientes.

Tabla 10. Resultados cuestionario SUS

PREGUNTAS	PROMEDIO
Creo que me gustará jugar con frecuencia en este Sistema de Rehabilitación Virtual.	**5**

PREGUNTAS	PROMEDIO
Encontré el Sistema de Rehabilitación Virtual innecesariamente complejo.	**2**
Pienso que el Sistema de Rehabilitación Virtual es fácil de usar.	**5**
Creo que necesitaría apoyo de un experto para utilizar el sistema de Rehabilitación Virtual.	**2**
Encontré las diversas posibilidades del Sistema de Rehabilitación Virtual bastante bien integradas.	**4**
Pienso que hay demasiada inconsistencia en el Sistema de Rehabilitación Virtual.	**2**
Creo que la mayoría de los pacientes aprenderían muy rápidamente a utilizar el Sistema de Rehabilitación Virtual.	**5**
He encontrado el Sistema de Rehabilitación Virtual bastante incómodo de utilizar.	**2**
Me he sentido muy seguro utilizando el Sistema de Rehabilitación Virtual.	**4**
Necesito aprender muchas cosas antes de utilizar el Sistema de Rehabilitación Virtual.	**2**

Para el sistema de Rehabilitación propuesto, al evaluar a los 23 pacientes con el cuestionario SUS se obtuvo una calificación de *83/100*, y según las investigaciones el rango en el que se encuentra el sistema es *bueno* ya que es superior a *68/100* que es el mínimo aceptable lo que indica que el sistema puede ser utilizado en más pacientes.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La integración de tecnologías innovadoras facilita la rehabilitación virtual de forma eficiente. Al aprovechar las últimas innovaciones, se personalizan los programas de rehabilitación, adaptándolos a las necesidades individuales. Esto no solo optimiza la eficacia y añade motivación, sino que redefine cómo se aborda la rehabilitación virtual, abriendo nuevas posibilidades para mejorar la calidad de vida de los participantes.

El sistema virtual de rehabilitación propuesto incorporó una interfaz gráfica 3D desarrollada con el motor gráfico Unity, además del uso de equipos hápticos que captan el movimiento en tiempo real de la mano en complemento de los visores de realidad virtual para la relación con el entorno virtual para el desarrollo de los ejercicios de rehabilitación.

El sistema puede ser implementado para el proceso de rehabilitación del STC en distintos centros de rehabilitación ya que cumple con el objetivo por el cual se realizó mediante el uso de la realidad virtual.

La medición de movilidad de cada uno de los dedos de las manos permitió valorar el desempeño del entorno virtual además de monitorear el estado de evolución de recuperación de los pacientes. La obtención de estos datos fue realizado con la ayuda de un profesional en el área de fisioterapia, lo cual permitió un seguimiento detallado y preciso de los resultados obtenidos.

4.2 Recomendaciones

Para la planificación y creación de las ventanas de usuario se recomienda evitar el uso de elementos innecesarios que puedan llevar a desviar la atención del usuario desenfocándolo del objetivo del proyecto, además que los mismos pueden llevar a saturar de los comandos a realizar dificultando de igual manera el objetivo principal.

En el entorno físico se recomienda la limitación de objetos electrónicos que puedan llegar a interferir con las señales de los equipos utilizados durante la rehabilitación

virtual como pueden ser teléfonos celulares, smarth watch, entre otros comúnmente utilizados por los usuarios.

Para una óptima rehabilitación se recomienda el acompañamiento de profesionales del área fisioterapéutica que ayudaran a comprender de mejor manera las ventajas de cada uno de los ejercicios desarrollados y el correcto progreso de dichos ejercicios.

Para futuros proyectos de investigación en la mejora de la conectividad, se recomienda el uso de una antena bluetooth externa. Esta solución proporcionará una señal más fuerte y estable, un mayor alcance y reduciría las interferencias, garantizando una experiencia de rehabilitación más fluida y precisa. Las pruebas con la antena externa permitirán a los pacientes realizar sus ejercicios sin interrupciones y con una captura de datos más continua y precisa ya que permite la conexión de hasta 6 dispositivos de manera simultánea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. S. Ferreira, C. X. Rogério Aparecido, y A. S. Rodrigues Ancioto, «Virtual reality as a tool for basic and vocational education», *Revista Cientifica General Jose Maria Cordova*, vol. 19, n.º 33, pp. 223-241, ene. 2021, doi: 10.21830/19006586.728.

[2] N. Campos Soto, M. Ramos Navas-Parejo, y A. J. Moreno Guerrero, «Realidad virtual y motivación en el contexto educativo: Estudio bibliométrico de los últimos veinte años de Scopus», *Alteridad*, vol. 15, n.º 1, pp. 47-60, dic. 2019, doi: 10.17163/alt.v15n1.2020.04.

[3] M. P. Caballero Bermudez, C. Mejía Corredor, y J. C. Romero Rincón, «Realidad aumentada vs. realidad virtual: Una revisión conceptual», *Teknos*, pp. 10-19, 2019.

[4] X. Ramos, «4,5 millones de personas requieren cada año algún tipo de rehabilitación en Ecuador, pero deben estar alerta ante falsos profesionales que podrían causar graves consecuencias a la salud», El Universo. Accedido: 28 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.eluniverso.com/noticias/informes/45-millones-de-personas-requieren-cada-ano-algun-tipo-de-rehabilitacion-en-ecuador-pero-deben-estar-alerta-a-falsos-profesionales-que-podrian-causar-graves-consecuencias-a-la-salud-nota/

[5] A. P. Zambrano Arevalo, «Factores de riesgo y manejo integral del síndrome del túnel carpiano», 2020.

[6] INSST, «Síndrome del túnel carpiano por compresión del nervio mediano en la muñeca», Madrid, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/

[7] M. G. Caballero Mendoza, «Prevalencia del síndrome del túnel carpiano como enfermedad profesional, y la adopción de posturas forzadas», 2021.

[8] Á. Sutil Blanco, S. Bernaldo de Quirós Ramos, D. Varillas Delgado, y F. García de Lucas, «Factores de riesgo y síndrome del túnel carpiano en el

entorno laboral», *Revista Iberoamericana de Cirugía de la Mano*, vol. 46, n.º 01, pp. 020-025, may 2018, doi: 10.1055/s-0038-1642596.

[9] B. Acosta July María y C. Quiroz María Del Carmen, «Perfil epidemiologico del síndrome del túnel carpiano en pacientes entre 20 y 60 años», 2019.

[10] F. del R. Lozada López, V. A. Salame Ortiz, y R. G. López Torres, «Factores de riesgo y acciones de educación para la salud para minimizar la prevalencia del síndrome del túnel carpiano», jun. 2022.

[11] Realidad en Aumento, «Los 5 tipos de realidad virtual».

[12] D. Ramos Perdomo, «Adaptación del Baloncesto en Silla de Ruedas a un entorno VR», abr. 2022.

[13] C. M. Laverde Zambrano, «Relación de la escala de Bostón con el test neurodinámico del nervio mediano en el síndrome del túnel carpiano», 2019.

[14] T. De Fin *et al.*, «APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA LA REHABILITACIÓN APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA LA REHABILITACIÓN Memoria y Anexos».

[15] A. DE La Realidad Virtual En La Rehabilitación Motora Del Paciente Con Parkinson, M. Aguirre Anderson Stalin, y M. María Belén Pérez García Riobamba, «UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD CARRERA DE TERAPIA FÍSICA Y DEPORTIVA TÍTULO».

[16] A. Alvear Suárez y G. E. Quintero Ramírez, «Ambientes virtuales para rehabilitación física y cognitiva».

[17] E. Menjivar Valencia, E. Sánchez Rivas, J. Ruiz Palmero, y T. Linde Valenzuela, «Revisión de la producción científica sobre la Realidad Virtual entre 2016 y 2020 a través de Scopus y WOS», *EDMETIC*, vol. 10, n.º 2, pp. 26-55, jul. 2021, doi: 10.21071/edmetic.v10i2.13422.

[18] G. Lara, A. Santana, A. Lira, y A. Peña, «El Desarrollo del Hardware para la Realidad Virtual», *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, n.º 31, pp. 106-117, ene. 2019, doi: 10.17013/risti.31.106-117.

[19] Rehametrics, «Rehabilitación virtual», rehametrics.com.

[20] J. Gonzalez Argote, «Uso de la realidad virtual en la rehabilitación», *Interdisciplinary Rehabilitation / Rehabilitacion Interdisciplinaria*, vol. 2, p. 24, dic. 2022, doi: 10.56294/ri202224.

[21] J. Brookes, M. Warburton, M. Alghadier, M. Mon-Williams, y F. Mushtaq, «Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework», *Behav Res Methods*, vol. 52, n.º 2, pp. 455-463, abr. 2020, doi: 10.3758/s13428-019-01242-0.

[22] Cárdenas Bocanegra V, «Desarrollo de un entorno virtual de entrenamiento con interacción háptica para la prevención y gestión del riesgo laboral», 2021.

[23] K. M. Arévalo Sánchez, R. R. Reyes Sánchez, M. J. Ramírez Ortiz, y Villavicencio Bourme Carlos Xavier, «Síndrome del túnel carpiano», mayo de 2019. doi: 10.26820/reciamuc/3.(2).abril.2019.827-853.

[24] K. M. Arévalo Sánchez, R. R. Reyes Sánchez, M. J. Ramírez Ortiz, y C. X. Villavicencio Bourne, «Síndrome del túnel carpiano», mayo de 2019. doi: 10.26820/reciamuc/3.(2).abril.2019.827-853.

[25] F. O. López Contreras, «Tratamiento del síndrome del túnel del carpo Carpal tunnel syndrome treatment», 2020. [En línea]. Disponible en: https://orcid.org/0000-0003-3882-

[26] Y. Jebbar, N. Promwongsa, F. Belqasmi, y R. H. Glitho, «A Case Study on the Deployment of a Tactile Internet Application in a Hybrid Cloud, Edge, and Mobile Ad Hoc Cloud Environment», *IEEE Syst J*, vol. 16, n.º 1, pp. 1182-1193, mar. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3074095.

ANEXOS

Anexo A. Profiles Capto Glove Left and Right





Anexo B. Cuestionario de usabilidad SUS

Se recomienda pasarla inmediatamente tras la PRIMERA SESION de prueba

Nombre del paciente: …….
Edad: ……
Fecha: ……
Por favor, rodea la puntuación que refleje mejor tu opinión.

PREGUNTAS	**Totalmente en Desacuerdo**	**En Desacuerdo**	**Indeciso**	**De acuerdo**	**Totalmente de Acuerdo**
Creo que me gustará jugar con frecuencia en este Sistema de Rehabilitación Virtual					
Encontré el Sistema de Rehabilitación Virtual innecesariamente complejo					
Pienso que el Sistema de Rehabilitación Virtual es fácil de usar					
Creo que necesitaría apoyo de un experto para utilizar el sistema de Rehabilitación Virtual					
Encontré las diversas posibilidades del Sistema de Rehabilitación Virtual bastante bien integradas.					
Pienso que hay demasiada inconsistencia en el Sistema de Rehabilitación Virtual					
Creo que la mayoría de pacientes aprenderían muy rápidamente a utilizar el Sistema de Rehabilitación Virtual					
He encontrado el Sistema de Rehabilitación Virtual bastante incómodo de utilizar.					
Me he sentido muy seguro utilizando el Sistema de Rehabilitación Virtual.					
Necesito aprender muchas cosas antes de utilizar el Sistema de Rehabilitación Virtual.					

Anexo C. Selección de equipos

La selección de equipos se realizó mediante el uso de matrices de comparaciones pareadas, que permite determinar el peso ponderado de cada uno de los criterios seleccionados para la evaluación correspondiente, siendo el resultado un valor relatico de significancia que permite posteriormente calificar de acuerdo a la información recopilada cada uno de los criterios siendo el resultado final un ranking de calificaciones con respecto a la mejor selección.

En primera instancia se consideró la escala de preferencias con la calificación numérica correspondiente según el modelo AHP y el procedimiento correspondiente que se muestra a continuación:

Tabla C1. Escala de preferencia

Planteamiento verbal de la preferencia	**Calificación numérica**
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Tabla C2. Matriz de doble entrada con criterios de evaluación de guantes hápticos.

x \ j	**Precio**	**Sensores**	**Disponibilidad**	**Peso**	**Plataformas soportadas**	$\sum xj$	$\sum xj/n$	**Peso relativo**
Precio	1,00	1,00	0,33	5,00	2,00	9,33	1,87	0,25
Sensores	1,00	1,00	0,50	5,00	0,33	7,83	1,57	0,20
Disponibilidad	3,00	2,00	1,00	4,00	2,00	12,00	2,40	0,30
Peso	0,20	0,20	0,25	1,00	0,33	1,98	0,40	0,05
Plataformas soportadas	0,50	3,00	0,50	3,00	1,00	8,00	1,60	0,20
						$\sum\left(\sum xj/n\right) =$	7,83	1,00

Tabla C3. Pesos ponderados guantes hápticos

Criterios	peso	Escala de calificación
Precio	25%	1 muy malo - 10 muy bueno
Sensores	20%	
Disponibilidad	30%	
Peso	5%	
Plataformas soportadas	20%	
Total	**100%**	

Tabla C4. Matriz de doble entrada con criterios de evaluación de auriculares VR.

x \ j	Precio	Resolución	Disponibilidad	Campo de visión	$\sum xj$	$\sum xj/n$	Peso relativo
Precio	1,00	2,00	1,00	2,00	6,00	1,50	0,30
Resolución	0,50	1,00	0,33	2,00	3,83	0,96	0,20
Disponibilidad	1,00	3,00	1,00	3,00	8,00	2,00	0,40
Campo de visión	0,50	0,50	0,33	1,00	2,33	0,58	0,10
					$\sum\left(\sum xj/n\right) =$	5,04	1,00

Tabla C5. Pesos ponderados visores RV

Criterios	Peso	Escala de calificación
Precio	30%	1 muy malo - 10 muy bueno
Resolución	20%	
Disponibilidad	40%	
Campo de visión	10%	
Total	100%	

Tabla C6. Características recopiladas de los guantes hápticos.

	Precio ($)	Sensores	Disponibilidad	Peso (gr)	Plataformas soportadas
Gloveone	210	22	Sin disponibilidad	85	Unity, Unreal
Manus Quantum Metagloves	7900	14	Digital	70	HTC Vive, Unreal, Unity, Maya, Blender, MotionBuilder
CaptoGlove	490	12	Física	40	HTC Vive, Unity, Unreal
Dexmo	358	22	Digital	85	Unity, Oculus CV1, HTC Vive, PSVR

Tabla C7. Características recopiladas de los auriculares VR

	Precio ($)	Resolución	Disponibilidad	Campo de visión (grados)
Oculus Quest 3	699	4k	Digital	100
PlayStation VR 2	549	4k	Digital	110
HP Reverb G2	816	4k	Digital	114
Oculus Rift S	399	2k	Digital	110
HTC Vive Pro 2	990	5k	Física	120

Tabla C8. Matriz de calificación guantes hápticos

	Precio	Sensores	Disponibilidad	Peso	Plataformas soportadas
Gloveone	10	10	1	5	5
Manus Quantum Metagloves	1	6	5	6	10
CaptoGlove	4	5	10	10	10
Dexmo	6	10	2	5	10

Tabla C9. Matriz normalizada guantes hápticos

	Precio	Sensores	Disponibilidad	Peso	Plataformas soportadas	Total	Ranking
Gloveone	2,5	2	0,3	0,25	1	6,05	3
Manus Quantum Metagloves	0,25	1,2	1,5	0,3	2	5,25	4
CaptoGlove	1	1	3	0,5	2	7,5	1
Dexmo	1,5	2	0,6	0,25	2	6,35	2

Tabla C10. Matriz de calificación visores RV.

	Precio	Resolución	Disponibilidad	Campo de visión (grados)
Oculus Quest 3	6	8	5	8
PlayStation VR 2	7	8	5	8
HP Reverb G2	5	8	5	9
Oculus Rift S	10	4	5	8
HTC Vive Pro 2	4	10	10	10

Tabla C11. Matriz normalizada visores RV.

	Precio	Resolución	Disponibilidad	Campo de visión (grados)	Total	Ranking
Oculus Quest 3	1,8	1,6	2	0,8	6,2	4
PlayStation VR 2	2,1	1,6	2	0,8	6,5	3
HP Reverb G2	1,5	1,6	2	0,9	6	5
Oculus Rift S	3	0,8	2	0,8	6,6	2
HTC Vive Pro 2	1,2	2	4	1	8,2	1

Anexo D. Encuesta sobre Rutinas de Rehabilitación para Síndrome del Túnel Carpiano

Objetivo: Identificar y determinar los ejercicios de rehabilitación más adecuados y la duración óptima de cada uno para su implementación en programas de rehabilitación virtual.

Instrucciones: Por favor, complete esta encuesta basada en su experiencia profesional con pacientes que tienen síndrome del túnel carpiano. Sus respuestas ayudarán a mejorar la comprensión y la eficacia de las rutinas de rehabilitación para esta condición.

1. Información General:

a. ¿Cuántos años de experiencia tiene como fisioterapeuta?

- Menos de 1 año
- 1-3 años
- 4-6 años
- 7-10 años
- Más de 10 años

b. ¿Ha tratado pacientes con síndrome del túnel carpiano en los últimos 12 meses?

- Sí
- No

2. Evaluación Inicial:

a. ¿Qué métodos utiliza para evaluar la gravedad del síndrome del túnel carpiano en sus pacientes? (Seleccione todos los que apliquen)

- Evaluación física
- Pruebas de conducción nerviosa
- Electromiografía (EMG)
- Cuestionarios de síntomas
- Otros (por favor especifique): _____

3. Ejercicios de Rehabilitación:

a. ¿Cuáles son los ejercicios más comunes que recomienda para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano? (Seleccione todos los que apliquen)

- Estiramientos del nervio mediano
- Ejercicios de deslizamiento del nervio
- Ejercicios de fortalecimiento de la muñeca

- Ejercicios de fortalecimiento de los dedos
- Movilización de la muñeca
- Terapia manual
- Otros (por favor especifique): _____

b. Por favor, indique la duración óptima recomendada para cada tipo de ejercicio en una sesión típica:

- Estiramientos del nervio mediano: _____ minutos
- Ejercicios de deslizamiento del nervio: _____ minutos
- Ejercicios de fortalecimiento de la muñeca: _____ minutos
- Ejercicios de fortalecimiento de los dedos: _____ minutos
- Movilización de la muñeca: _____ minutos
- Terapia manual: _____ minutos
- Otros (especificar y indicar duración): _____

4. Frecuencia de Ejercicios:

a. ¿Con qué frecuencia recomienda que los pacientes realicen los ejercicios de rehabilitación en casa?

- Diariamente
- 3-5 veces por semana
- 1-2 veces por semana
- Sólo en sesiones de fisioterapia
- Otros (por favor especifique): _____

5. Resultados y Progresión:

a. En su experiencia, ¿cuánto tiempo generalmente toman los pacientes con síndrome del túnel carpiano leve a moderado para mostrar una mejora significativa con la fisioterapia?

- Menos de 2 semanas
- 2-4 semanas
- 4-6 semanas
- 6-8 semanas
- Más de 8 semanas

b. ¿Qué criterios utiliza para determinar si un paciente está listo para reducir o terminar con las sesiones de fisioterapia?

- Reducción significativa del dolor
- Mejora de la función de la mano y la muñeca
- Evaluación clínica de la fuerza y movilidad
- Retroalimentación del paciente
- Otros (por favor especifique): _____

6. Comentarios Adicionales:

a. ¿Tiene alguna sugerencia o comentario adicional sobre la rehabilitación del síndrome del túnel carpiano que le gustaría compartir?

Gracias por completar esta encuesta.