

Incidencia de los dispositivos hápticos y de visión en la evolución de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior



Diego Enrique Guzmán Villamarín
Trabajo de Grado de Maestría en Automática

Director: PhD. Carlos Felipe Rengifo Rodas
Codirector: MSc. Jerónimo Londoño Prieto

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Maestría en Automática
Popayán, Enero de 2018

Diego Enrique Guzmán Villamarin

Incidencia de los dispositivos hápticos y de visión en la evolución de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la obtención del título de

Magister en:
Automática

Popayán, Enero 2018

Dedicatoria

...A mi abuelo Enrique Lemos Barragan en el cielo QEPD
...A mi amigo Cristian Camilo Orozco Alarcón en el cielo QEPD

Agradecimientos

- ...A Dios por tenerme aquí en este momento y lugar, además de darme la oportunidad de conocer a tan grandes personas con las que comparto día a día.
- ...A mi Director, mentor, compañero y amigo Carlos Felipe Rengifo por guiarme, la paciencia, el apoyo y sobretodo por todo lo que he aprendido de usted como persona y profesional.
- ...A mi co-director y amigo Jeronimo Londoño quien fue como un compañero de tesis y me enseñó muchas cosas sobre el área de la salud durante esta travesía.
- ...A mi hermano Juan David Guzmán por darme una mano cuando la necesitaba y aportarme tanto con sus conocimientos en bases de datos.
- ...A Vladimir Trujillo y Alvaro Restrepo por darme la oportunidad de trabajar con tan gran equipo como es el Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control de la Universidad del Cauca.
- ...A mi familia, mis padres y mi hermanos por estar siempre junto a mi.
- ...A mis compañeros de master por hacer entretenido este periodo.
- ...A la universidad del Cauca por ser mi alma mater.
- ...A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca por darme la oportunidad de dar mis primeros pasos como profesional en la docencia y la investigación.
- ...A Cecilia, Marie y el equipo de AURA por la gran experiencia de trabajar junto a ellos en Madrid durante mi estancia como pasante.

Resumen

El objetivo de este trabajo es comparar la incidencia de los dispositivos hápticos frente a los dispositivos de visión, en este caso la interfaz háptica OmniPhanton y el dispositivo LeapMotion respectivamente, en la funcionalidad motriz de miembro superior cuando se realiza entrenamiento basado en entornos virtuales. Para ello se estableció la necesidad de seleccionar un método de evaluación de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior, en este trabajo se utilizó el Nine-Hole-Peg Test y un método propuesto, con el fin de contar con dos formas de medir dicha incidencia. Con el fin de realizar el experimento se desarrolló un entorno virtual para evaluación de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior con soporte para los dispositivos OmniPhantom y LeapMotion en el motor de juegos Unity3D en lenguaje C#. Finalmente se evaluó la funcionalidad motriz gruesa de dos grupos de usuarios sin antecedentes médicos en cuanto a motricidad de miembro superior, unos entrenados con la interfaz háptica OmniPhanton y los otros con el dispositivo LeapMotion, los resultados evidenciaron que el entrenamiento con realidad virtual y los respectivos hardware mejoraron la funcionalidad motriz al finalizar el experimento, sin embargo, entre los dispositivos hardware en sí mismos no hay diferencia en cuanto a su incidencia, para el caso de estudio en específico. Adicionalmente se contó con dos casos de estudio con patologías diferentes, dadas sus situaciones, no eran directamente comparables, ellos entrenaron con ambos dispositivos y se pudo evidenciar que en caso de la mano dominante tuvieron mayor evolución utilizando el LeapMotion y en el caso de la mano no dominante su desempeño fue superior con OmniPhantom

Palabras clave: Miembro superior, rehabilitación, hápticos, leapmotion

Abstract

The objective of this work is to compare the incidence of haptic devices versus vision devices, using the OmniPhanton haptic interface and the LeapMotion device respectively in the motor functionality of upper limb when training based on virtual environments. For this matter, it was established the need to select a method for evaluating the gross motor function of the upper limb, in this work the Nine-Hole-Peg Test and a proposed method were used, in order to have two ways to measure the incidence. In order to carry out the experiment, a virtual environment was developed to evaluate the gross motor function of the upper limb with support for the OmniPhantom and LeapMotion devices in the Unity3D game engine on C# language. Finally, the gross motor functionality of two groups of users with no medical history was evaluated in terms of upper limb motor skills, some trained with the haptic interface OmniPhanton and the others with the LeapMotion device, the results showed that the training with virtual reality and the respective hardware improved the motor functionality at the end of the experiment, however, among the hardware devices themselves there is no difference in their incidence, for the specific study case. Additionally, there

were two cases of study with different pathologies, given their situations, they were not directly comparable, they trained with both devices and it could be watch that in the case of the dominant hand they had greater evolution than using the LeapMotion and in the case of the non-dominant hand the performance was superior with OmniPhantom.

Keywords: Upper limb, rehabilitation, haptic, leapmotion

Tabla de contenido

Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XI
1. Conceptualización del tema de investigación	1
1.1. Discapacidad	1
1.2. Rehabilitación	2
1.2.1. Rehabilitación virtual	3
1.2.2. Planteamiento del problema	3
1.2.3. Otros dispositivos tecnológicos utilizados en la rehabilitación	4
1.3. Objetivos	6
1.4. Otros trabajos derivados de está tesis	7
1.5. Publicaciones asociadas a está tesis	7
1.6. Organización de la tesis	8
2. Pruebas de funcionalidad motriz de miembro superior	9
2.1. Anatomía del miembro superior	9
2.1.1. Movimientos del miembro superior y motricidad	9
2.2. Medición de la habilidad motriz de miembro superior	12
2.3. Métodos seleccionados para analizar el progreso	14
2.3.1. Nine-hole-peg test	16

2.3.2. Pendiente normalizada según el tiempo para culminar una tarea	17
2.3.3. Fitts Reaching Test	17
3. Plataforma software para rehabilitación	19
3.1. Parámetros a tener en cuenta para el concepto de la aplicación interactiva 3D . . .	19
3.2. Hardware utilizado en el proyecto	20
3.2.1. OmniPhantom	20
3.2.2. LeapMotion	22
3.3. Metodología de desarrollo	23
3.3.1. Marco de trabajo Scrum	23
3.3.2. Historias de usuario	24
3.3.3. Arquitectura del sistema	25
3.3.4. Usabilidad del software	30
4. Experimentación y resultados	35
4.1. Participantes	35
4.1.1. Población sin antecedentes médicos	35
4.1.2. Usuarios con antecedentes médicos	37
4.2. Protocolos	37
4.2.1. Protocolo para NHPT	37
4.2.2. Utilización del entorno virtual	39
4.3. Medidas de desempeño	40
4.4. Resultados	45
4.4.1. Nine-hole peg test	45
4.4.2. Pendiente normalizada	47
4.5. Discusión	52

5. Conclusiones y trabajos futuros **55**

5.1. Conclusiones 55

5.2. Trabajos futuros 55

Bibliografía **57**

Lista de figuras

1.1. Configuraciones de dispositivos robóticos [1]	5
1.2. Exoesqueleto de asistencia MyoPro siendo usado en actividades de la vida diaria [2]	6
2.1. Anatomía del miembro superior[3]	10
2.2. Movimientos del miembro superior [1]	11
2.3. Prensiones de la mano	11
2.4. <i>Nine-hole peg test</i> utilizado en el proyecto	16
3.1. Movimientos del OmniPhantom [4]	21
3.2. Tipos de interfaces hápticas [5]	21
3.3. Conexiones hardware [4]	22
3.4. LeapMotion	22
3.5. Espacio de trabajo del LeapMotion	23
3.6. Ciclo de desarrollo del marco de trabajo SCRUM	24
3.7. Historias de usuario en la plataforma Trello	25
3.8. Componentes del sistema	25
3.9. Casos de uso	26
3.10. Implementación caso de uso agregar usuario	27
3.11. Implementación caso de uso editar o eliminar usuario	27
3.12. Diagrama entidad-relación de la base de datos del subsistema gestión de usuarios	28
3.13. Diagrama de clases del subsistema gestión de usuarios	29

3.14. Diagrama de arquitectura informal del sistema háptico-software	31
3.15. Pruebas de compatibilidad con ambos dispositivos	32
3.16. Resultado pregunta 1	33
3.17. Resultado pregunta 2	33
3.18. Resultado pregunta 3	33
3.19. Resultado pregunta 4	33
4.1. Consentimiento informado	38
4.2. Parámetros a tener en cuenta en el protocolo experimental	38
4.3. Usuarios realizando NHPT	39
4.4. Experimentación con usuarios sin antecedentes médicos	39
4.5. Diagrama de cajas y bigotes OmniPhantom para NHPT en el grupo intervenido	46
4.6. Diagrama de cajas y bigotes LeapMotion para NHPT en el grupo intervenido	47
4.7. Diagrama de caja y bigotes para las pendientes obtenidas OmniPhantom con la mano dominante (diagrama de la izquierda) y mano no dominante (diagrama de la derecha)	49
4.8. Diagrama de caja y bigotes para las pendientes obtenidas LeapMotion con la mano dominante (diagrama de la izquierda) y mano no dominante (diagrama de la derecha)	49
4.9. Desempeño con OmniPhantom	50
4.10. Desempeño con LeapMotion	51
4.11. Evolución del sujeto 1 con ambos dispositivos	51
4.12. Evolución del sujeto 2 con ambos dispositivos	52

Lista de tablas

1.1. Lesiones del miembro superior según su origen [1]	2
2.1. Utilidad clínica de las medidas de miembro superior [6]	13
2.2. Resumen de propiedades psicométricas de las medidas del miembro superior [6] .	15
2.3. Puntuaciones para cada opción	16
3.1. Caso de uso Ver desempeño	26
3.2. Caso de uso Agregar usuario	26
3.3. Caso de uso Editar información	27
3.4. Caso de uso Borrar usuario	27
3.5. Caso de uso Nueva sesión	28
3.6. Caso de uso Realizar rehabilitación	28
4.1. Características de la población sin antecedentes médicos y tipo de interfaz utilizada	36
4.2. Tiempo en segundos requeridos por los participantes del grupo no intervenido para completar el NHPT	40
4.3. Tiempo en segundos requeridos por los participantes del grupo intervenido con OmniPhantom para completar el NHPT	41
4.4. Tiempo en segundos requeridos por los participantes del grupo intervenido con LeapMotion para completar el NHPT	42
4.5. Tiempos totales obtenidos en cada sesión por los usuarios intervenidos entrenados con OmniPhantom	43

4.6. Tiempos totales obtenidos en cada sesión por los usuarios intervenidos entrenados con LeapMotion	44
4.7. Tiempos obtenidos en las 4 sesiones por el sujeto 1 con antecedentes médicos . .	44
4.8. Tiempos obtenidos en las 4 sesiones por el sujeto 2 con antecedentes médicos . .	45
4.9. Resumen estadístico de NHPT en el experimento	46
4.10. Pendientes obtenidas con los datos normalizados para mano dominante y no dominante utilizando OmniPhantom	47
4.11. Pendientes obtenidas con los datos normalizados para mano dominante y no dominante utilizando LeapMotion	48
4.12. Resumen estadístico de las pendientes obtenidas en el experimento	48

Capítulo 1

Conceptualización del tema de investigación

Este capítulo busca dar una introducción conceptual a la temática de este proyecto, haciendo una revisión bibliográfica de conceptos relacionados con la rehabilitación motriz de miembro superior y los dispositivos tecnológicos utilizados. Finalmente se presentan los objetivos del proyecto, publicaciones asociadas a este trabajo y la organización de la tesis.

1.1. Discapacidad

La discapacidad es una restricción en la capacidad funcional de un ser humano [7]. Esta puede presentarse desde el nacimiento, ser consecuencia de un accidente o derivarse de trastornos psicomotores [1]. Como consecuencia de esto, el movimiento puede estar disminuido o completamente limitado (paresia y plejia respectivamente), lo anterior puede tener su origen en una o varias lesiones del sistema nervioso central y/o periférico.

En la Tabla 1.1 se puede observar de acuerdo al origen de la discapacidad la lesión que la produce.

En el caso de las discapacidades de origen cerebral, las lesiones tienen en común la pérdida de la función motora y la alteración del control postural en las personas, variando aspectos como el grado de afectación y los síntomas clínicos [8]. Es posible identificar entonces dos tipos de lesiones cerebro-vasculares que pueden llevar al compromiso del movimiento:

- **Accidente cerebro-vascular isquémico:** Es la aparición repentina de un déficit neurológico

Origen	Lesión
Cerebral	Parálisis cerebral, Trauma craneoencefálico, Tumores
Espinal	Poliomielitis, Espina bífida, Lesiones medulares degenerativas, Traumatismo medular
Muscular	Miopatías (distrofia muscular progresiva de Duchenne, distrofia escapular de Landouzy-Djerine), Malformaciones congénitas (amputaciones, luxaciones, artrogriposis), Distróficas (condrodistrofia, osteogénesis imperfecta)
Osteo-articular	Microbianas (osteomielitis aguda, tuberculosis ósea articular), Reumatismos infantiles (reumatismo articular agudo, reumatismo crónico), Lesiones osteo-articulares por desviación de la raquis (cifosis, escoliosis, lordosis)

Tabla 1.1: Lesiones del miembro superior según su origen [1]

como consecuencia de la isquemia (disfunción del sistema circulatorio para llevar la cantidad de sangre necesaria a los tejidos) relacionada con una enfermedad trombótica.

- **Accidente cerebro-vascular hemorrágico:** Es la aparición repentina de un déficit neurológico causado por una hemorragia (pérdida de sangre por parte del sistema circulatorio) intracerebral, generalmente causada por la ruptura de los vasos sanguíneos, un aneurisma o una malformación arteriovenosa.

1.2. Rehabilitación

Según la Real Academia Española la rehabilitación es un *'Conjunto de métodos que tiene por finalidad la recuperación de una actividad o función perdida o disminuida por traumatismo o enfermedad'*¹. La rehabilitación es un proceso complejo y continuo de duración limitada que resulta de muchos procedimientos para lograr que el individuo recupere su estado funcional. Por su parte la Organización Mundial de la Salud define: *'la rehabilitación y la habilitación son procesos destinados a permitir que las personas con discapacidad alcancen y mantengan un nivel óptimo de desempeño físico, sensorial, intelectual, psicológico y/o social. La rehabilitación abarca un amplio abanico de actividades, como atención médica de rehabilitación, fisioterapia, psicoterapia, terapia del lenguaje, terapia ocupacional y servicios de apoyo'*².

¹<http://dle.rae.es/?id=VkJTOWOU>

²<http://www.who.int/disabilities/care/es/>

Una de las áreas de interés en la rehabilitación es la rehabilitación motriz, que busca mejorar funciones que se han perdido o se han visto disminuidas a causa de alguna lesión o patología [9]. La pérdida o disminución motriz generalmente se caracteriza por alteraciones en las funciones del cuerpo, que interfieren en el movimiento y/o locomoción de las personas. Existen varios tipos de rehabilitación: física, sensorial, cognitiva, musicoterapia, practica mental y rehabilitación virtual. Todos los anteriores tienen el propósito de estimular diferentes funciones mentales y cerebrales necesarias para la realización de secuencias motoras complejas para el desarrollo de acciones o actividades funcionales, como: cocer un pantalón, pintar un cuadro, escribir entre otras.

1.2.1. Rehabilitación virtual

De la combinación de los conceptos de rehabilitación y realidad virtual surge el concepto de *rehabilitación virtual*, este término fue acuñado por los profesores Daniel Thalmann y Grigore Burdea [10]. La rehabilitación virtual se define como el entrenamiento basado en ejercicios de simulación mediante tecnología de realidad virtual [11].

La rehabilitación virtual ofrece la capacidad de individualizar las necesidades de tratamiento, mientras que permite la estandarización en los protocolos de evaluación y capacitación. De hecho, la evidencia indica que la realidad virtual ofrece un medio único en el que la terapia puede ser proporcionada dentro de un contexto funcional, útil y motivador, donde se pueden clasificar y documentar los resultados fácilmente [12].

Múltiples estudios han demostrado las ventajas de la rehabilitación virtual. Por ejemplo, del estudio presentado en [13] se concluyó que la rehabilitación virtual permite intensificar el tratamiento sin la presencia constante de los terapeutas y en consecuencia disminuye sus costos. Por otro lado, en [14, 15] se mostró la mejoría en la funcionalidad de la extremidad superior y en la calidad de vida de los pacientes que habían sufrido un ECV. Sin embargo, los autores resaltan que los métodos para estimar o medir el progreso de la habilidad motriz presentan resultados muy variables, que el número de estudios es limitado y que no se evalúan aspectos como motivación o participación, lo cual puede producir sesgo en los resultados.

La realidad virtual con fines terapéuticos se ha utilizado en mayor medida en pacientes con alteraciones motoras, como en el caso de un ECV, estos sistemas generalmente son de tipo semiinmersivo o no inmersivo [16]. Aunque han mostrado resultados positivos, se necesitan más estudios con tamaños de muestras más grandes para llegar a conclusiones más veraces y robustas.

1.2.2. Planteamiento del problema

Uno de los grandes retos de la rehabilitación virtual consiste en emular apropiadamente el mundo real y permitir una interacción fluida con el usuario [17]. Para ello, el usuario puede interactuar

con el entorno a través de diferentes tipos de interfaces que, aunque de naturaleza muy diversa, pueden clasificarse en dos grandes grupos dependiendo de si proveen o no realimentación cinestésica:

En el primer grupo están los dispositivos hápticos como los guantes mecánicos de rigidez variable [18], las bandas caminadoras accionadas [19], los exoesqueletos [20] y los trajes con sensores [21, 22], este tipo de dispositivos tiene alta precisión y no requiere procesos computacionales adicionales, pues la posición y la dirección son extraídas desde los sensores del dispositivo. Cuando el usuario colisiona en el mundo virtual con alguno de los objetos que este contiene, tendrá una realimentación de fuerza proporcionada por la interfaz háptica [23]. Pero en [24] se afirma que las interfaces hápticas son limitadas en usabilidad, portabilidad y adaptabilidad haciéndolas costosas y obsoletas, adicionalmente no son recomendadas en rehabilitación pues limitan los movimientos del paciente [25]. En otros contextos, por ejemplo en juegos de simulación es recomendable proveer re-alimentación al usuario.

En el segundo grupo están las interfaces que por sí mismas no retornan información al usuario como los sistemas de visión *Kinect*³ [26, 27] y *LeapMotion*⁴ [28] cuyo funcionamiento se basa en la información obtenida a través de las cámaras, sin embargo algunos como el control de movimiento de Sony⁵ aún requiere interfaces hápticas para los movimientos del usuario, por lo que es posible hablar de sistema híbridos.

Dado el alto costo de las interfaces hápticas, es importante determinar su efectividad en los procesos de rehabilitación. Pese a lo anterior, a la fecha no se han encontrado estudios en los cuales se comparen los sistemas de visión con las interfaces hápticas en el contexto de la rehabilitación basada en entornos virtuales.

Concluir sobre la superioridad de las tecnologías hápticas con respecto a las de visión o viceversa, requerirá de muchos estudios con diferentes dispositivos, diversos ejercicios y distintos tipos de rehabilitación, aplicados en todos los casos a grupos de usuarios suficientemente heterogéneos. En el presente proyecto se buscó dar un primer paso en este proceso de comparación de tecnologías dando respuesta al interrogante ¿Qué ventajas ofrece la interfaz háptica *OmniPhanton* sobre el dispositivo *LeapMotion* en el contexto de la rehabilitación motriz gruesa del miembro superior basada en entornos virtuales?.

1.2.3. Otros dispositivos tecnológicos utilizados en la rehabilitación

En el caso de la rehabilitación asistida, el uso de robots permite un entrenamiento más intensivo, de mayor duración, repetitivo y orientado a tareas [29], existen múltiples sistemas para proveer dicha rehabilitación asistida, a continuación se presenta algunos de ellos:

³<https://www.microsoftstore.com/store/msusa/en-US/pdp/Kinect-Sensor-for-Xbox-One/productID.2267482500>

⁴<https://www.leapmotion.com/about-us>

⁵<https://www.playstation.com/en-us/explore/accessories/playstation-move/>

- iPAM [30]: Es un brazo robótico con actuadores neumáticos, es semi-automatizado y proporciona ejercicios de extremidades superiores para personas con pérdida funcional. El sistema emula la asistencia de un fisioterapeuta; entre sus características está que compensa la gravedad y elimina cualquier carga potencialmente peligrosa para el paciente [31]. La realimentación del paciente en cuanto a desempeño, usabilidad en el ejercicio y motivación fueron claves para el despliegue exitoso del sistema.
- MIT-MANUS [32]: Nació como una investigación para el desarrollo de una aplicación robótica como ayuda en la terapia neurológica y en particular una herramienta para terapeutas . El objetivo era lograr un dispositivo clínico interactivo y con un diseño que permitiera no solo evaluar los pacientes, sino también una terapia con significativa participación.
- ARMEOPOWER [33]: Es un sistema de rehabilitación de miembro superior de tipo exoesqueleto, eficaz para el miembro superior en pacientes con disminución del movimiento (sin llegar a la parálisis) debido a un ECV.
- REOGO [34]: Está diseñado para proveer terapia robótica para los pacientes de ECV, el objetivo era hacer un sistema capaz de cuantificar, diagnosticar y monitorear la terapia de los pacientes. El sistema fue diseñado para ser de bajo costo y portable para incrementar el acceso a la rehabilitación de miembro superior [35].
- PuParm [36]: Bajo los requisitos de ser sencillo y modular, ofrece una terapia capaz de aumentar la motivación y compromiso de los pacientes, como medir su progreso desde el punto de vista funcional [37].

La rehabilitación asistida con robots puede presentar diferentes configuraciones, como se observa en la Figura 1.1:

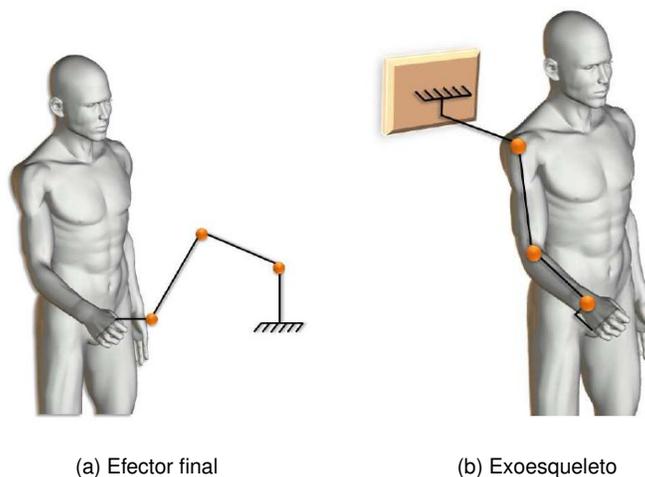


Figura 1.1: Configuraciones de dispositivos robóticos [1]

Cabe resaltar que el uso de sistemas de reconocimiento de intención de movimiento utilizando señales electromiográficas aportan mayor nivel de inmersión en el sistema de realidad virtual, aunque el problema se centra principalmente en la extracción de características de la señal más que la técnica de clasificación en sí misma e identificar correctamente el estado de prensión [38].

Por otro lado, al lograr un reconocimiento fiable de un pensamiento consciente como mover el brazo y accionar un mecanismo por medio de la transformación y transmisión de una señal, es posible desarrollar exoesqueletos más simples, de menor costo y con mayores funciones y grados de libertad [2], entre estos resulta interesante el dispositivo MyoPro que se presenta en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Exoesqueleto de asistencia MyoPro siendo usado en actividades de la vida diaria [2]

Aunque no es un dispositivo propiamente para rehabilitación, provee asistencia a personas con debilidad muscular a causa de un daño neuromuscular, cuenta con sensores mioeléctricos no invasivos que permite a la persona iniciar el movimiento de su brazo y controlarlo. Entre las actividades que permita realizar están: estirarse para alcanzar o levantar un objeto, comer, entre otras.

1.3. Objetivos

En esta sección se presenta el objetivo general del proyecto y los objetivos específicos para alcanzarlo.

Objetivo general

Comparar la interfaz háptica OmniPhantom con el dispositivo LeapMotion en cuanto a su incidencia en la evolución de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior, cuando se realiza entrenamiento basado en entornos virtuales.

Objetivo específicos

1. Seleccionar un método de evaluación de la funcionalidad motriz gruesa de miembro superior de un ser humano.
2. Desarrollar un entorno virtual para la evaluación de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior con soporte para los dispositivos OmniPhantom y LeapMotion.
3. Evaluar la funcionalidad motriz gruesa de dos grupos de usuarios, unos entrenados con la interfaz háptica OmniPhantom y los otros con el dispositivo LeapMotion.

1.4. Otros trabajos derivados de está tesis

Dos proyectos adicionales se generaron a partir de este proyecto:

1. *Incidencia de la realimentación háptica en el desempeño de la rehabilitación motriz de miembro superior: Caso de estudio.*
2. *Evaluación mediante herramientas tecnológicas de la habilidad motriz fina de miembro superior: Caso de estudio.* Este proyecto recibió mención honorífica.
3. *Incidencia de un control de dificultad automático en aplicaciones de realidad virtual para rehabilitación motriz de miembro superior.*

1.5. Publicaciones asociadas a está tesis

A continuación se presenta la producción científica asociada a estos trabajos:

- D. E. Guzmán y J. Londoño, 'Rehabilitación de miembro superior con ambientes virtuales: revisión', Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, vol 37, no. 3, 271-258, Sep-Dic, 2016. Disponible en: <http://www.rmib.somib.org.mx/pdfs/Vol37/No3/8.pdf>

- Milton H. Arango, Alejandro Mejia, Carlos F. Rengifo, Diego E. Guzmán, Jerónimo Londoño, 'Virtual haptic training compared with a conventional exercise for the improvement of upper limb gross motor skills', ICVR 2017, junio, Montreal, Canada.
- J. D. Guzmán, E. F. Fonseca, C. F. Rengifo, D. E. Guzmán, J. L. Prieto, E. M. España. 'Implementación de la prueba de funcionalidad motriz de miembro superior nine-hole-peg test en un entorno virtual 3D', IBERDISCAP 2017, Bogota, Colombia.
- Pendiente la publicación de resultados finales del proyecto en el journal PM&R.

1.6. Organización de la tesis

La presente monografía se divide en 5 capítulos. El capítulo 1 (ya abordado) presenta una breve introducción conceptual al tema de investigación, para contextualizar al lector. El capítulo 2 abarca la información relacionada con las medidas para estimar la habilidad motriz. El capítulo 3 presenta el proceso de desarrollo de la plataforma software para la rehabilitación utilizando el dispositivo háptico OmniPhantom y el dispositivo de visión LeapMotion. El capítulo 4 presenta el proceso de experimentación llevado a cabo y los resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Pruebas de funcionalidad motriz de miembro superior

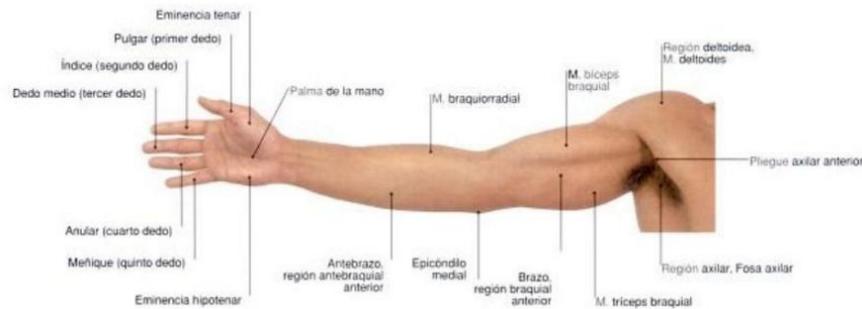
Para realizar el seguimiento de la evolución motriz de la habilidad del miembro superior y realizar la posterior comparación del entrenamiento con OmniPhantom y LeapMotion es necesario establecer un método para ello. En este capítulo se presenta una introducción conceptual al miembro superior y la motricidad, posteriormente diferentes herramientas utilizadas para cuantificar la habilidad motriz del miembro superior, la selección de una de ellas para el desarrollo de este proyecto y finalmente se muestran las características de dicha técnica.

2.1. Anatomía del miembro superior

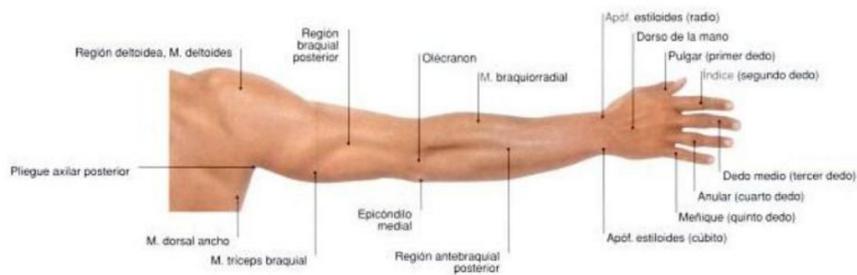
El miembro superior es una estructura multifuncional que permite la interacción y reconocimiento del ser humano con su entorno, puede realizar gran cantidad de actividades como la manipulación, comunicación, construcción, elaboración y la sujeción o agarre de diferentes objetos, entre otras. En [39] se aprecia que el miembro superior está constituido por dos segmentos principales; la cintura escapular con huesos como la escápula y la clavícula; y la porción libre del miembro superior con huesos como el húmero, el radio y el cúbito, huesos del carpo, metacarpo y los dedos, en la Figura 2.1 se ilustra la estructura básica del miembro superior del cuerpo humano.

2.1.1. Movimientos del miembro superior y motricidad

El movimiento del miembro superior se lleva a cabo a través de los músculos, huesos y articulaciones. En donde el sistema nervioso periférico (así como las fibras nerviosas que conectan los



(a) Vista anterior



(b) Vista posterior

Figura 2.1: Anatomía del miembro superior[3]

órganos con la médula espinal y cerebro) obtiene información de la actividad táctil y cinestésica de la extremidad, esta información es enviada al sistema nervioso central (médula espinal y cerebro) en donde es procesada y como consecuencia, se envían impulsos de control a los músculos a través de la unión neuromuscular, para así, realizar correctamente el movimiento [1].

La capacidad de uso del miembro superior humano se mide en términos de destreza y/o habilidad. La destreza o habilidad motriz se considera según [40] como la capacidad adquirida por aprendizaje para alcanzar metas establecidas con un **máximo de precisión en el menor tiempo**, menor uso de energía o las dos. En consecuencia la habilidad motriz es el nivel de destreza de un usuario al ejecutar una tarea específica, dicha tarea puede tener movimientos como los descritos en la Figura 2.2 y/o prensiones como las mostradas en la Figura 2.3.

Es de aclarar que los tipos de prensión mencionados en la Figura 2.3 se pueden clasificar en dos tipos de agarres mencionados en [42]:

- **Presiones palmares:** En estas tenemos los agarres esférico y cilíndricos, que se caracterizan por la intervención de los dedos y la palma de la mano. Siendo útil para tomar objetos pesados o voluminosos.
- **Presiones digitales:** En estas se involucra el dedo pulgar y el índice, sirve para ejecutar tareas de precisión.

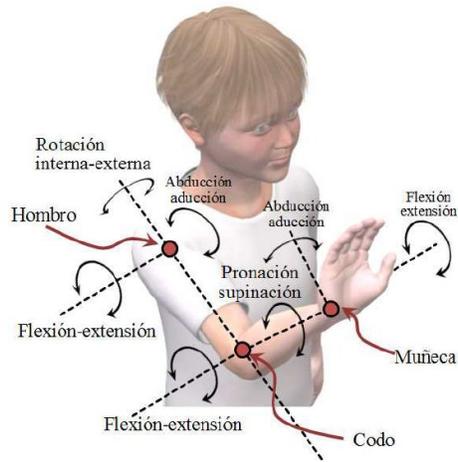


Figura 2.2: Movimientos del miembro superior [1]



Figura 2.3: Prensiones de la mano [41]

En [42] se habla de dos tipos de motricidad: **La motricidad gruesa** involucra todos aquellos movimientos, como mantener el equilibrio, desplazarse, saltar, entre otros. Estos movimientos exigen fuerza, no necesitan precisión y requieren el uso de gran cantidad de músculos; por otro lado **la motricidad fina** es aquella que involucra movimientos de las manos y los dedos, se utiliza en tareas de precisión como la escritura, coser, etc. La Figura 2.2 muestra los movimientos del hombro, el codo y el antebrazo siendo estos ejemplo de motricidad gruesa.

2.2. Medición de la habilidad motriz de miembro superior

Las técnicas para medir habilidad motriz datan de los 80' y en múltiples estudios de revisión se hace referencia a ellas, por ejemplo en la Tabla 2.1 se presenta una evaluación de dichas técnicas de acuerdo a parámetros como son: el tiempo requerido para completar la prueba, el costo, la portabilidad y la necesidad de equipo especializado. Nótese que las técnicas denotadas con '*' corresponden a aquellas que cuyo puntaje es mayor a 8 y se consideran factibles de utilizar en la práctica clínica.

A continuación se presenta la descripción de algunos de las pruebas que resultan interesantes dada su ponderación en Tabla 2.1, dichas descripciones fueron tomadas de Rehabilitation Measures Database¹:

- **Box and block test:** Toma menos de 5 minutos su ejecución, no requiere entrenamiento especializado para llevarlo a cabo y se ha probado en población con ECV, esclerosis múltiple, desordenes neuromusculares, fibromalgia y lesión de la médula espinal. En la prueba los individuos están sentados en una mesa sobre la cual se coloca una caja rectangular que se divide en dos compartimientos cuadrados de igual dimensión por medio de un tabique. Se colocan ciento cincuenta cubos o bloques de madera de 2,5 cm en un compartimento u otro, se indica al individuo que mueva tantos bloques como sea posible en un minuto, uno a la vez (requiere motricidad gruesa y un tipo de agarre).
- **Nine-hole peg test:** Se necesita menos de 5 minutos, no requiere entrenamiento, se ha probado en población con lesión cerebral, ECV y enfermedad de Parkinson. El test pide al paciente que tome las clavijas de un contenedor, una por una, y las coloque en los agujeros de una tabla, tan pronto como sea posible. Los participantes deben retirar las clavijas de los orificios, uno por uno, y volver a colocarlos en el contenedor. El tablero debe colocarse en la línea media del cliente y las clavijas deben estar orientadas hacia la mano que se está probando (sólo la mano que se está evaluando debe realizar la prueba) y la mano que no está siendo evaluada puede sujetar el borde del tablero para proporcionar estabilidad. Las

¹<http://www.rehabmeasures.org/default.aspx>

Test	Duración	Costo	Portabili- dad	Equipo especial	Total (max=10)
Fitts reaching test*	3	3	2	2	10
Reaching Performance Scale	3	3	2	2	3
Observation of upper limb movements	3	3	1	2	3
Frenchay Arm Test	2	3	1	1	7
Box and Block test*	3	3	1	1	8
Nine-Hole Peg Test*	3	3	1	1	8
TEMPA	1	3	1	1	6
Wolf Motor Function Test (also known as the Emory Motor Test)	1	3	1	1	6
Jebsen Hand Tests	1	2	1	1	5
Modified Jebsen Hand Test	2	3	1	1	7
(Modified) Arm Motor Ability Test	1	3	1	1	6
Action Research Arm Test*	3	3	1	1	8
Abilhand*	2	3	2	2	9
Motor Activity Log*	3	3	2	2	10
Accelerometry/activity monitors	0	0	2	0	2
Rivermead Motor Assessment—arm section*	2	3	2	2	9
Motor Status Score*	2	3	1	2	8
Chedoke Arm & Hand Action Inventory	2	3	1	1	7
Sollerman hand function test*	3	3	1	1	8
STREAM—upper-limb section*	3	3	3	2	10
Simplified STREAM—upper-limb section	3	3	3	2	10
Motor Assessment Scale (upper limb section)	2	3	1	1	7

Tabla 2.1: Utilidad clínica de las medidas de miembro superior [6]

puntuaciones se basan en el tiempo que se tarda en completar la actividad de prueba, registrada en segundos. El cronómetro debe iniciarse desde el momento en que el participante toca la primera clavija hasta el momento en que la última clavija toca el contenedor (requiere motricidad gruesa y un tipo de agarre).

- **Action research arm test:** Dura de 6 a 30 minutos, no requiere entrenamiento y se utiliza en población con ECV, esclerosis múltiple y lesión cerebral traumática. Tiene 4 sub-pruebas que involucran distintos tipos de agarre y depende del concepto del fisioterapeuta en cuanto a la normalidad del paciente en la ejecución.
- **Motor Activity Log:** Es una entrevista semi-estructurada para evaluar la función del brazo, que requiere de 6 a 30 minutos para su realización, requiere manejar previamente el manual y se ha probado en población con ECV. Consiste en una calificación de la calidad de movimiento y la cantidad de movimiento durante 30 tareas de la vida diaria, 28 tareas funcionales o 14 tareas. Las tareas incluyen manipulación de objetos así como el uso del brazo.
- **Fitts Reaching Test:** No define una actividad a llevar a cabo, sin embargo establece un método para el seguimiento del aprendizaje de habilidades motoras a través de la aplicación práctica de la ley de Fitts [43].
- **Sollerman:** Dura de 6 a 30 minutos, requiere leer un manual, para la prueba se ubica una caja con el equipo frente al sujeto sentado, son 20 pruebas y al sujeto se conceden 60 segundos para cada una, se califica cada ítem y al final se suma el resultado.

La Tabla 2.2 presenta información relacionada sobre las propiedades psicométricas de cada prueba, valora lo encontrado en la literatura en cuanto a: validez, confiabilidad y la detección de cambios. Estableciendo otro parámetro importante a tener en cuenta al momento de seleccionar la que mejor se adecua a la implementación en este proyecto, las cruces indican o son la abreviación de: débil (+), moderado (++) y fuerte(+++) respecto al grado de cumplimiento de las propiedades.

Las pruebas anteriormente mencionadas se enfocan en medir, bien sea el tiempo requerido para realizar una tarea, o bien el número de veces que el participante puede realizar una misma actividad en un intervalo dado de tiempo.

2.3. Métodos seleccionados para analizar el progreso

En esta sección se presentan 2 formas propuestas por diferentes autores para realizar el seguimiento de la evolución de la habilidad motriz en un entrenamiento basado en realidad virtual, las cuales se utilizaron en este proyecto para medir la evolución de los usuarios en el entrenamiento con OmniPhantom y con LeapMotion. La selección se realizó con el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), que es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas, el resultado de la aplicación de la técnica se observa en la Tabla 2.3:

	Grupo	Validez	Test-retest	inter-test	Mínimo cambio detectable
Impedimentos de las extremidades superiores-mano (apreton, agarre y destreza)					
Fitts Reaching test	Stroke	++	+++		
Box and Block test	Stroke, other pathologiesMS, TBI	+++	+++	+++	MDC = 6 blocks
Nine-Hole Peg Test	Stroke, MS	+++	+++		MDC = 32.8s
Action Research Arm Test	Stroke	+++	++	+++	MDC = 6
Upper-Limb Activity in Everyday LifeAbilhand	Stroke	++/+++			
Motor Activity Log	Stroke	++/+++	+++		
Rivermead Motor Assessment–arm section	Stroke	+/++			
Motor Status Score	Stroke	+++	+++		
Sollerman hand function test	Stroke		+++	+++	
Simplified STREAM–upper-limb section	Stroke	+++	+++		

Tabla 2.2: Resumen de propiedades psicométricas de las medidas del miembro superior [6]

	Costo	Duración de la prueba	Necesidad de un experto	Total
Box and block test	0,28	0,47	0,45	0,40
Nine-hole-peg test	0,64	0,47	0,45	0,52
Action research arm test	0,07	0,07	0,09	0,08
Ponderación:	0,33	0,33	0,33	

Tabla 2.3: Puntuaciones para cada opción

Siendo el primer lugar para Nine-Hole-Peg test, seguido por el Box and Block Test y finalmente el Action research arm test.

2.3.1. Nine-hole-peg test

Aunque esta prueba se describió anteriormente, es de resaltar que resulta útil por su facilidad de aplicación (y su alta puntuación), su bajo costo, la posibilidad de encontrarla en cualquier centro de rehabilitación y la disposición de la caja. Como se habló anteriormente en [6] el NHPT puede ser utilizado en practicas clínicas, además se puede aplicar al inicio y al final del experimento para evidenciar diferencias en la habilidad motriz de los usuarios. La herramienta utilizada para este proyecto siguió como referencia el estándar establecido para sus medidas y aplicación, como se aprecia en la Figura 2.4:

Figura 2.4: *Nine-hole peg test* utilizado en el proyecto

Aunque la prueba NHPT tiene como propósito medir la destreza de los dedos de ambas manos en personas afectadas con patologías neurológicas, también requiere de movimientos de las articulaciones del codo y del hombro que corresponden a lo que se denomina motricidad gruesa, que es la que se busca ejercitar con el aplicativo desarrollado en este proyecto.

2.3.2. Pendiente normalizada según el tiempo para culminar una tarea

Siendo este un método propuesto en uno de los trabajos de grado derivados de este proyecto y teniendo en cuenta que no se puede comparar directamente una tarea ejecutada de dos formas distintas, para este proyecto se propone su uso de la siguiente manera:

1. Medir el tiempo requerido por el usuario para culminar el ejercicio de rehabilitación en cada una de las N sesiones. Con estos valores crear el vector de tiempos $[S_1, S_2, \dots, S_N]$.
2. Dicho vector de tiempos se normaliza dividiendo cada uno de sus elementos entre el máximo valor, como se muestra en la ecuación 2.1 donde N representa el número de sesiones.

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{\max(S)} \quad i = 1, \dots, N \quad (2.1)$$

3. Se realiza una regresión lineal con los elementos del vector de tiempo y se utiliza la pendiente resultante para medir el progreso promedio por sesión, por lo que una pendiente con un valor negativo más alto indicará un efecto mayor del entrenamiento con una herramienta respecto a otra.

2.3.3. Fitts Reaching Test

El modelo de Fitts, presentado a continuación, es una relación empírica que define el tiempo T que le toma a una persona alcanzar un área W del espacio localizada a una distancia D

$$T = a + b \left[\log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \right] \quad (2.2)$$

Los coeficientes a y b dependen de cada persona y se obtienen al aplicar regresión lineal a un conjunto de pares ordenados $(P_1, T_1), (P_2, T_2), \dots, (P_n, T_n)$, donde $P_i = \log_2 \left(\frac{D_i}{W_i} + 1 \right)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) es la dificultad asociada a alcanzar un área W_i localizada a una distancia D_i .

Durante la formulación del anteproyecto que dió origen al presente trabajo de maestría, se consideró el uso de los coeficientes a y b para cuantificar la evolución de la habilidad motriz de un participante. Sin embargo, para algunos usuarios se obtuvieron coeficientes de correlación de

Pearson cercanos a cero que indicaban que las variables T e P no se relacionaban linealmente. Lo anterior consideramos que fue debido a la utilización de un entorno virtual en el cual la profundidad no existe realmente y se simula mediante efectos gráficos.

Capítulo 3

Plataforma software para rehabilitación

En el presente capítulo se desglosan todos los aspectos relevantes en el proceso de desarrollo incluyendo el marco de trabajo, los modelos con Lenguaje Unificado de Modelado (UML) diseñados para documentar el sistema y las herramientas de Entorno de Desarrollo Integrado (IDE's) utilizados para desarrollar este proyecto.

3.1. Parámetros a tener en cuenta para el concepto de la aplicación interactiva 3D

Para que un entorno virtual destinado a rehabilitación tenga un gran impacto en los usuarios, es necesario asegurarse de que el usuario/paciente realice correctamente los movimientos necesarios en un contexto motivador para maximizar los resultados de dicha terapia. Los aspectos principales según [44] para tener en cuenta son:

- **Contexto social:** Una realidad virtual con carácter competitivo o cooperativo genera mayor motivación en la rehabilitación.
- **Tipo de movimiento:** Hace referencia a los músculos que deben ser activados en la ejecución del movimiento en actividades como buscar, alcanzar o golpear objetivos.
- **Reto cognitivo:** Se refiere al nivel de pensamiento necesario para llevar a cabo la actividad. Puede ser alto si el usuario requiere memorizar o reconocer, o puede ser bajo donde es intuitivo para el usuario que debe hacer.

En [44, 45, 46, 47] se presenta una serie de ejercicios aplicados a la rehabilitación con VR que cumplen las características mencionadas anteriormente. Entre ellos vale la pena resaltar el ejercicio 'Golpea al topo' pues es un concepto simple, que requiere movimientos de hombro, codo y

antebrazo, resulta sencillo a nivel cognitivo, pueden configurarse niveles de dificultad para adaptarlo al usuario y además puede tener un carácter competitivo entre usuarios, juntando así buena parte de los requerimientos deseados en una tarea de rehabilitación con VR.

En [48] se menciona que los procesos cognitivos complejos de la corteza prefrontal del cerebro están relacionadas dentro de lo que se conoce como “Funciones Ejecutivas Centrales”, y que se encuentra dividido en tres áreas principales; el área de la inhibición (habilidad para prevenir una acción o un comportamiento), el área del cambio (habilidad para cambiar entre tareas) y el área de la actualización (habilidad para actualizar la memoria de trabajo), en donde el ejercicio ‘Golpea el topo’ puede estimular estos tres aspectos, incluyendo en mayor medida el área de inhibición.

En este proyecto se optó por una mecánica de juego estilo ‘Golpea al topo’, por todas las ventajas mencionadas, donde en una ambientación de cielo aparecen globos al azar y el usuario debe utilizar un clavo para poder reventar los globos (con la finalidad de promover e incentivar el movimiento motriz grueso del miembro superior), el sistema de puntos motivacional (y al mismo tiempo el parámetro de estudio) está dado por cumplir el objetivo en el menor tiempo posible (ver Figuras 3.15).

3.2. Hardware utilizado en el proyecto

En esta sección se presenta una descripción detallada de los dispositivos propuestos para este proyecto, con el fin de conocer su funcionamiento.

3.2.1. OmniPhantom

Es un dispositivo de realimentación de fuerzas activas cinestésicas en los ejes X, Y y Z mediante la medición de la posición y la velocidad instantánea, las cuales son obtenidas por un conjunto de sensores propioceptivos (encoder ópticos) [49]. El dispositivo y sus posibles movimientos se presentan en la Figura 3.1.

Este dispositivo robótico tiene 6 grados de libertad, sin embargo el dispositivo transmite fuerza en los 3 ejes traslacionales, cabe notar que el dispositivo es del tipo efector final tipo serial. Sus aplicaciones más comunes son en entretenimiento, teleoperación y algunas como la rehabilitación y el diagnóstico [49]. En la Figura 3.2 se describen los tipos de dispositivos hápticos.

El dispositivo OmniPhantom se conecta a un ordenador por el puerto FireWire de 6 pines o también conocido como puerto IEEE 1394 [4] como se puede apreciar en la Figura 3.3. Este puerto trabaja a alta frecuencia de muestreo con el fin de siempre tener variaciones suaves en la realimentación de fuerzas, para así, no esforzar los actuadores ni dejar que la resolución del dispositivo sea notable por el usuario [50].



Figura 3.1: Movimientos del OmniPhantom [4]

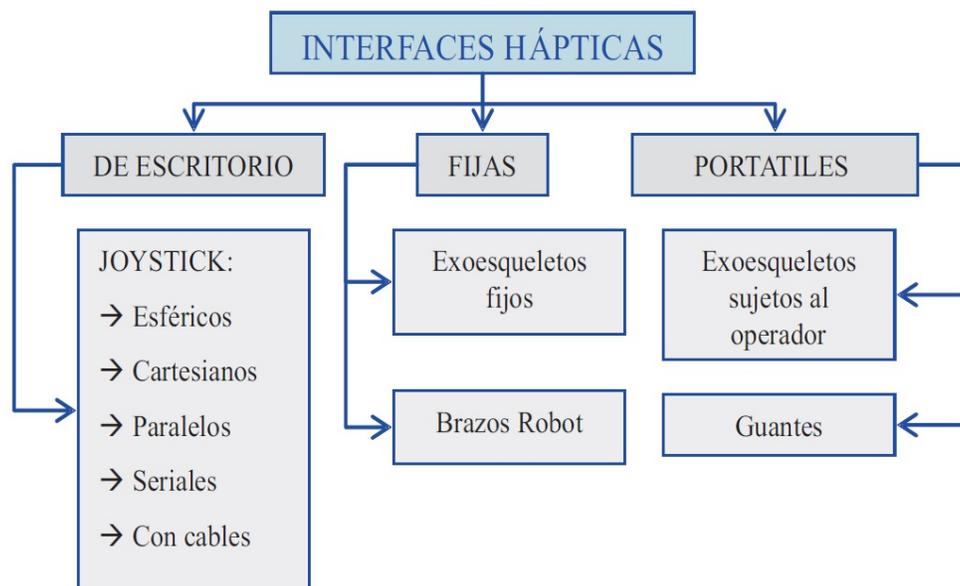
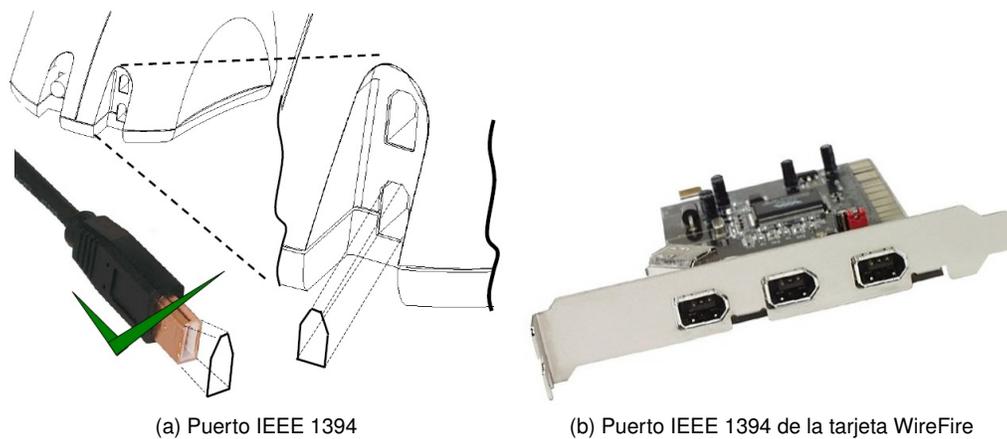


Figura 3.2: Tipos de interfaces hápticas [5]



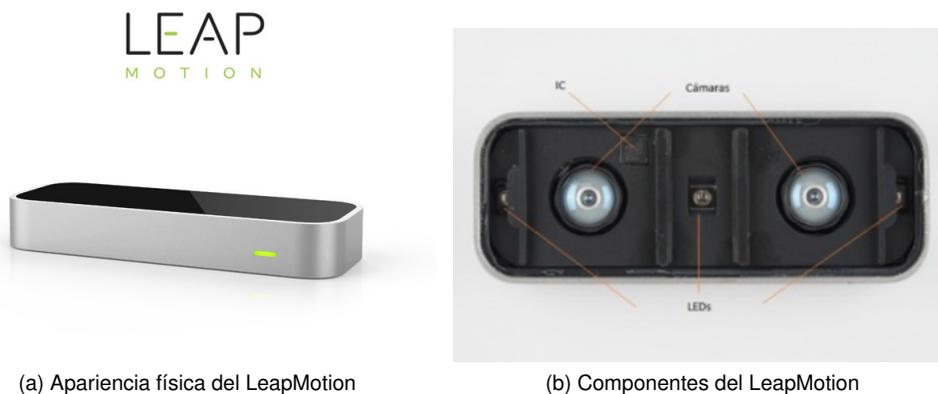
(a) Puerto IEEE 1394

(b) Puerto IEEE 1394 de la tarjeta WireFire

Figura 3.3: Conexiones hardware [4]

3.2.2. LeapMotion

Este dispositivo sensor, basado en visión artificial, soporta el movimiento de la mano y de los dedos como entrada sin contacto o toque al mismo. Su estructura se puede observar en la Figura 3.4:



(a) Apariencia física del LeapMotion

(b) Componentes del LeapMotion

Figura 3.4: LeapMotion

El funcionamiento del LeapMotion consta de 3 pasos:

- Obtiene imágenes desde los sensores de las cámaras del dispositivo.
- Aplica una corrección de la distorsión que producen los sensores.
- Aplica un modelo matemático para determinar la posición de cada mano ejecutando un algoritmo de visión estéreo entre cada par de imágenes para obtener la posición en el plano tridimensional.

Las cámaras que condicionan el correcto funcionamiento del sistema; cuentan con un sensor

monocromático, sensible a la luz infrarroja, con una longitud de onda de 850 nm. Estos sensores pueden trabajar a una velocidad de hasta 200 fps dependiendo del ordenador. Los LED infrarrojos se encargan de iluminar la zona de cobertura a la misma longitud de onda a la que son sensibles los sensores, los LEDS varían su consumo eléctrico y lumínico dependiendo la luz que haya en la zona de cobertura.

Finalmente el microcontrolador es un circuito integrado que controla el dispositivo y se encarga de recoger la información de los sensores para enviarla al driver instalado en el ordenador. La Figura 3.5 muestra la zona de cobertura del dispositivo LeapMotion:

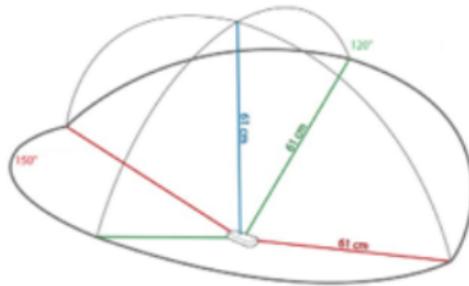


Figura 3.5: Espacio de trabajo del LeapMotion

3.3. Metodología de desarrollo

Esta sección documenta el proceso de desarrollo y se apoya en el estándar UML 2.0 para la documentación general de la implementación, siendo una guía para replicar fácilmente el proyecto.

3.3.1. Marco de trabajo Scrum

El marco de trabajo Scrum [51], presentada en la Figura 3.6:

Los resultados del marco de trabajo se vislumbran en ciclos iterativos incrementales, donde en cada ciclo de desarrollo se obtiene un resultado del producto final deseado. En cuanto a sus roles más importantes (para familiarizarse) en la metodología son:

- **Scrum master:** Aquel que modera las reuniones del equipo de trabajo y asegura un adecuado seguimiento del proyecto.
- **Product owner:** Uno de los roles mas importantes pues establece los requerimientos del proyecto y debe realizar realimentación oportuna de los avances alcanzados en cada sprint.

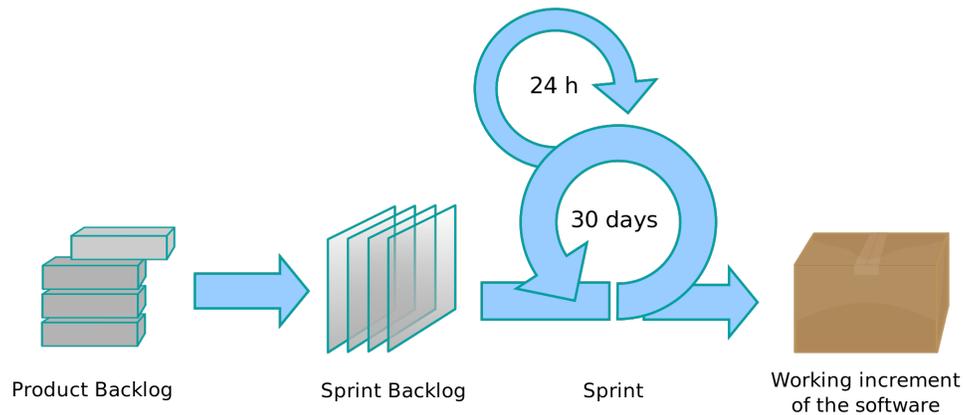


Figura 3.6: Ciclo de desarrollo del marco de trabajo SCRUM

- **Sprint:** Consiste en un ciclo de desarrollo que puede ir de 1 a 4 semanas y donde se espera obtener resultados tangibles.
- **Historias de usuario:** Son tarjetas donde se realiza una adecuada descripción de los requerimientos establecidos por el product owner (también por el equipo de desarrollo), debe tener un título, una numeración (o identificación), una descripción, una duración definida en cantidad de sprint, la dependencia o no de otra historia de usuario y una lista de chequeo con las condiciones que debe cumplir para considerarse satisfecho dicho requerimiento.
- **Product backlog:** Es una lista compuesta por las historias de usuario establecidas por el Product Owner y los desarrolladores para el desarrollo de todo el proyecto y que en su totalidad representan al producto terminado.
- **Sprint backlog:** Corresponde a la lista de historias de usuarios que se quiere cumplir dentro de un sprint.
- **Daily meeting:** Es una reunión diaria del equipo de desarrollo donde se confirma el estado actual de avance y los problemas encontrados.
- **Reunión al final del sprint:** Es una reunión de mayor duración donde se busca verificar el cumplimiento de las historias de usuario durante el sprint, realizar realimentación de los productos obtenidos y ajustar o seleccionar las historias de usuario para el próximo sprint.

3.3.2. Historias de usuario

La definición de los requerimientos funcionales y no funcionales se realizó aprovechando las ventajas que brindan las historias de usuario las cuales fueron definidas en la plataforma web Trello (para gestión de proyectos), como se puede observar en la Figura 3.7:

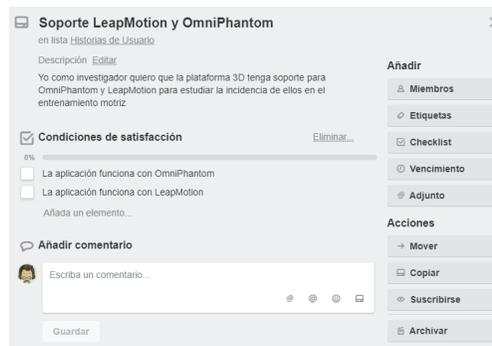


Figura 3.7: Historias de usuario en la plataforma Trello

3.3.3. Arquitectura del sistema

La plataforma desarrollada está dividida en dos grandes componentes que se comunican a través de una base de datos, como se presenta en la Figura 3.8.

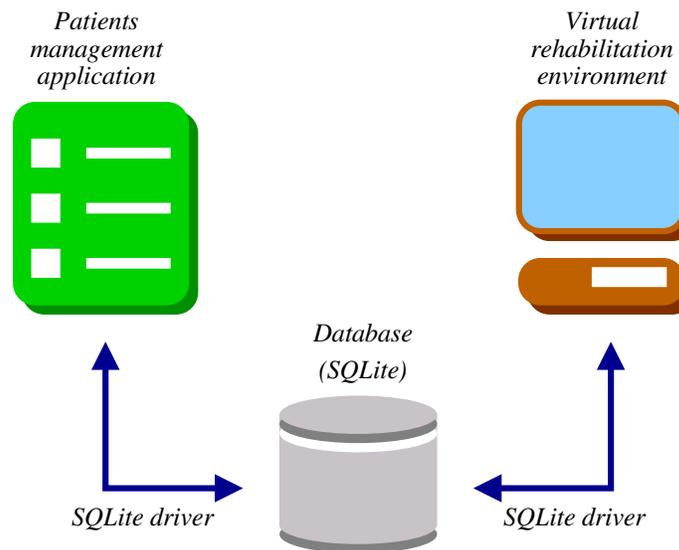


Figura 3.8: Componentes del sistema

El primer módulo es la aplicación para administración de información de los usuarios, desarrollado en Visual Studio 2015 en lenguaje C#, permite ver, agregar, editar y borrar información personal de los usuarios de la herramienta, incluyendo información relacionada con la evolución durante la rehabilitación. El segundo módulo es la herramienta para hacer ejercicios de rehabilitación en una VR 3D desarrollada con Unity3D. Finalmente ambos módulos interactúan para almacenar información a través de una base de datos en SQLite.

Aplicativo para la gestión de usuarios

Desarrollado en Visual Studio 2015 y bajo el lenguaje C# se diseñó y programó bajo un gestor de base de datos llamado SQLite; para documentar los requerimientos propuestos por el Product Owner se realizó el respectivo diagrama de casos de uso, como se observa en la figura 3.9.

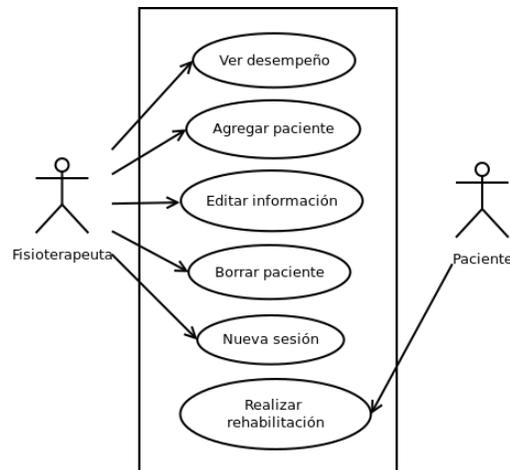


Figura 3.9: Casos de uso

La información detallada de cada caso de uso se puede observar en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6:

Iniciador:	Terapeuta
Prioridad:	Media
Descripción:	Permite visualizar en un gráfico la evolución sesión a sesión del tiempo total en realizar la prueba de los usuarios.

Tabla 3.1: Caso de uso Ver desempeño

Iniciador:	Terapeuta
Prioridad:	Media
Descripción:	Permite ingresar un nuevo usuario con sus datos mas relevantes para hacer seguimiento en las sesiones.

Tabla 3.2: Caso de uso Agregar usuario

La implementación de dicha funcionalidad se puede evidenciar en la Figura 3.10 donde puede ver su apariencia desarrollada en Visual Studio.

La Figura 3.11 muestra que la interfaz del caso de uso 'Editar usuario' y 'Borrar usuario' es la misma que 'Agregar usuario', sin embargo los botones que habilitan las funcionalidad se activan

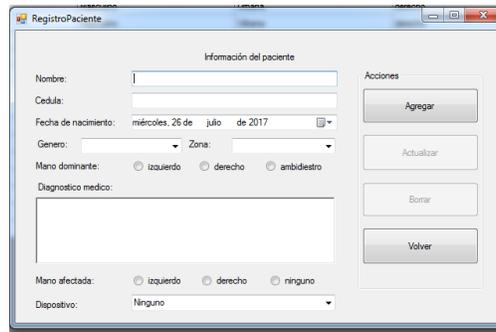


Figura 3.10: Implementación caso de uso agregar usuario

Iniciador:	Terapeuta
Prioridad:	Media
Descripción:	Permite modificar los datos personales de un usuario en caso de haber cometido algún error o querer anotar alguna novedad.

Tabla 3.3: Caso de uso Editar información

Iniciador:	Terapeuta
Prioridad:	Baja
Descripción:	Permite eliminar el registro de un usuario.

Tabla 3.4: Caso de uso Borrar usuario

y des-activan acorde a como accede el usuario a la herramienta.

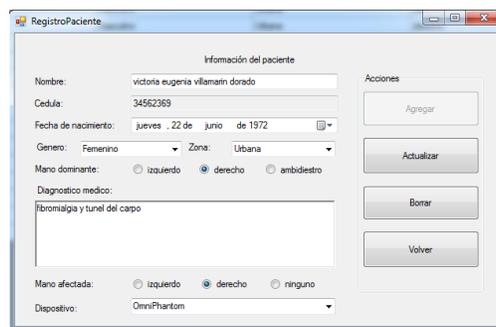


Figura 3.11: Implementación caso de uso editar o eliminar usuario

La implementación de la base de datos se evidencia en la Figura 3.12 donde se presenta el diagrama entidad relación para identificar las tablas, los campos y las relaciones que componen la base de datos, en la Figura 3.13 se evidencia el diagrama de clases para documentar la codificación del modulo de gestión de usuarios.

Iniciador:	Terapeuta
Prioridad:	Alta
Descripción:	Permite generar una conexión entre el aplicativo de gestión de usuarios con la aplicación de realidad virtual donde el usuario realiza el ejercicio, para poder asignar los datos a un determinado usuario.

Tabla 3.5: Caso de uso Nueva sesión

Iniciador:	Usuario
Prioridad:	Media
Descripción:	Permite al usuario interactuar con una realidad virtual para realizar ejercicios orientados a la rehabilitación.

Tabla 3.6: Caso de uso Realizar rehabilitación

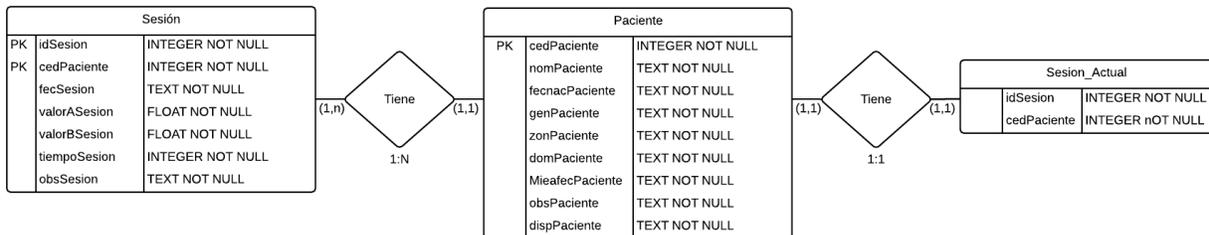


Figura 3.12: Diagrama entidad-relación de la base de datos del subsistema gestión de usuarios

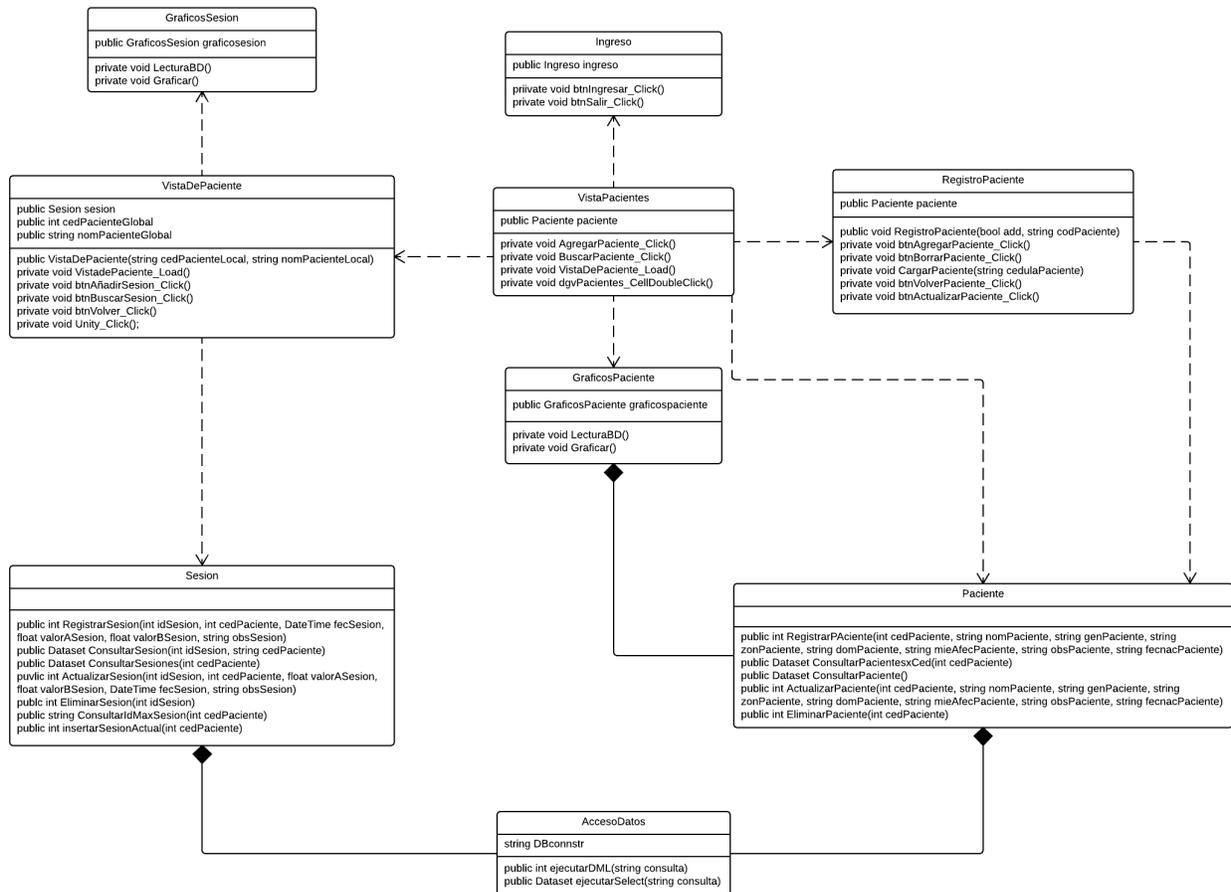


Figura 3.13: Diagrama de clases del subsistema gestión de usuarios

Entorno virtual para rehabilitación

Desarrollado en Unity 4.3 y programado en lenguaje C#, debe cumplir el requerimiento de ser compatible con los dispositivos OmniPhantom y LeapMotion.

La conexión entre el OmniPhantom y el computador se logró a través de la librería **ASimpleHapticPlugin.dll** (desarrollada por el Estudio de Diseño Digital de la Escuela de Arte de Glasgow [52]), la cual comunica el OmniPhantom con Unity3D.

Un script llamado PluginImport.cs importa y hereda los métodos de la librería mencionada, el esquema de comunicación entre a nivel lógico, entre el entorno virtual y el dispositivo se observa en la Figura 3.14, la cual representa un diseño de arquitectura informal del flujo de datos.

Las Figura 3.15a y 3.15b evidencian la compatibilidad del aplicativo desarrollado con ambos dispositivos hardware OmniPhantom y LeapMotion.

3.3.4. Usabilidad del software

Para establecer la usabilidad se propuso una prueba final a la plataforma desarrollada, antes de usarla y tomar datos con usuarios, está se realizó con 19 usuarios quienes hicieron una prueba piloto y a los que se aplicó una encuesta con algunas preguntas para conocer su opinión, así:

1. ¿Las indicaciones y el nivel de tutorial fueron claras y suficientes para llevar acabo la prueba?.
2. ¿Esta usted familiarizado con este tipo de tecnología?.
3. ¿El entorno resulta agradable y de fácil comprensión?.
4. ¿Que grado de dificultad tuvo para realizar el ejercicio? donde sencillo (1) y difícil (5).

La Figura 3.16, muestra que la prueba resultó comprensible para la totalidad de los usuarios.

De la Figura 3.17 se evidencia que la mitad de los usuarios está familiarizado con estas tecnologías.

La Figura 3.18 muestra que para la mayoría resulta fácil y agradable el uso de la herramienta.

En la Figura 3.19 genera interés el hecho que hay opiniones variadas en cuanto a la dificultad que les representó la realización de la prueba.

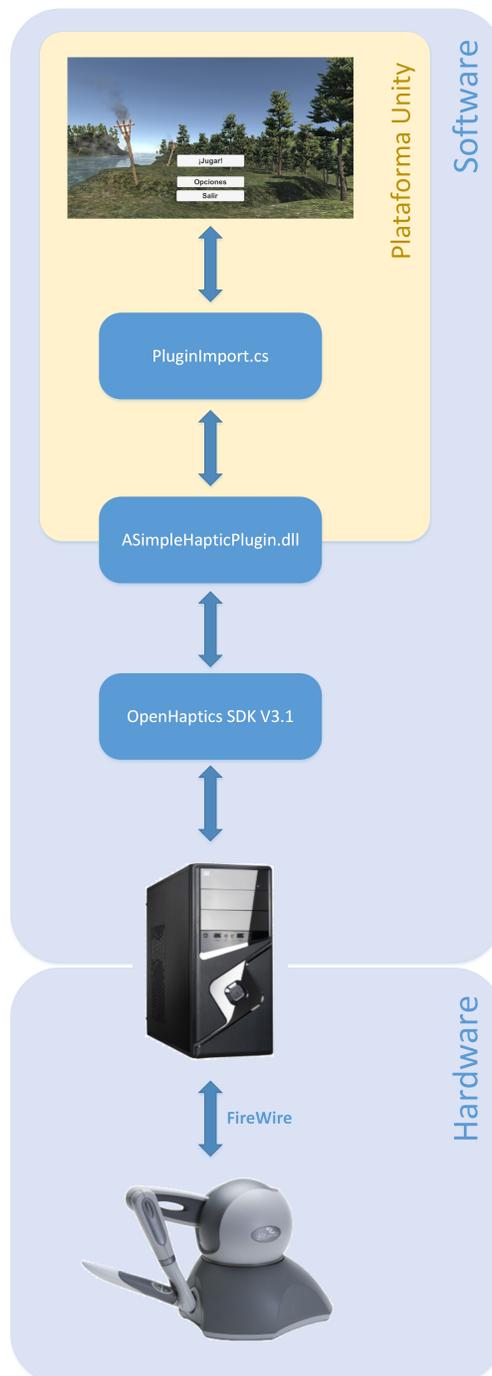
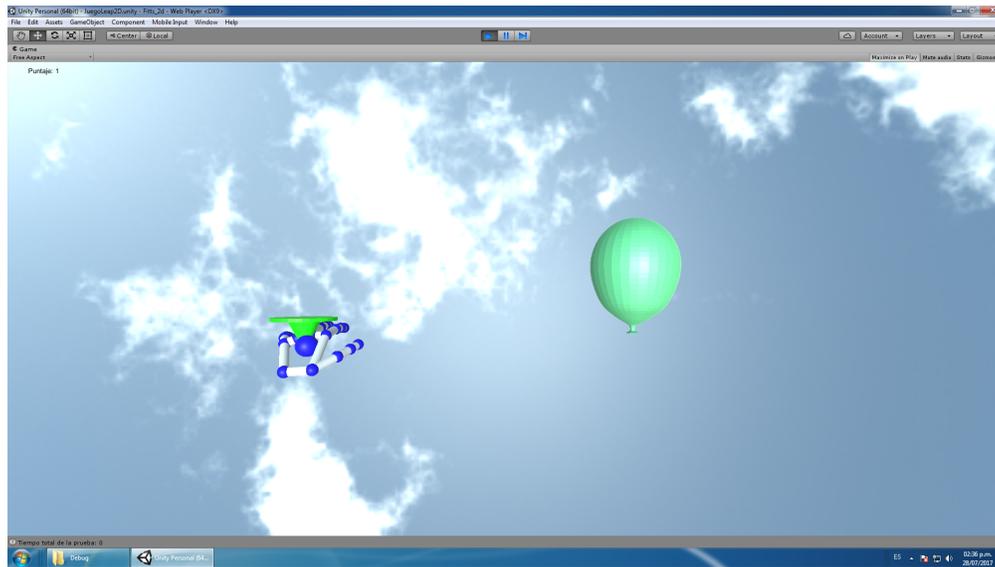
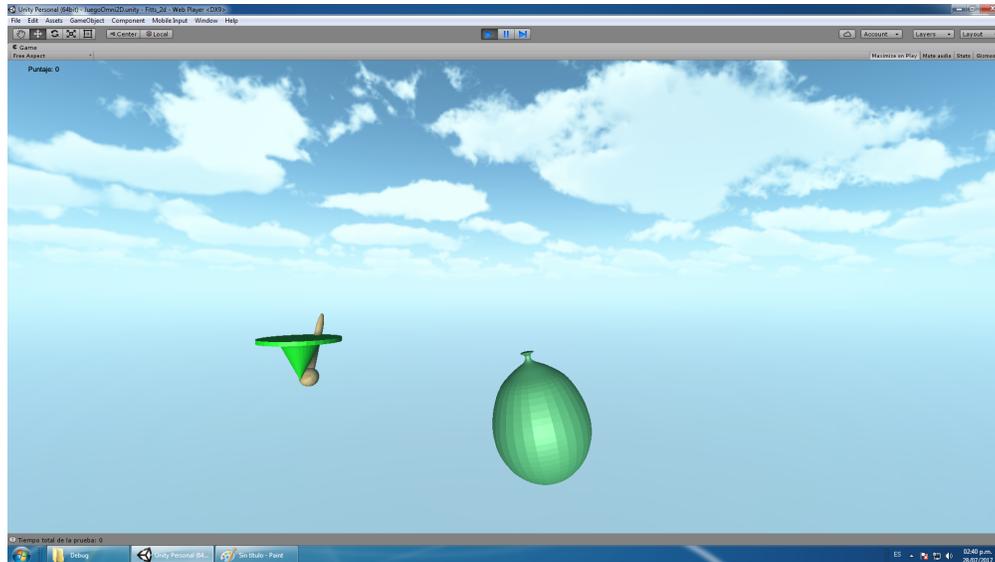


Figura 3.14: Diagrama de arquitectura informal del sistema háptico-software



(a) Entorno con LeapMotion



(b) Entorno con OmniPhantom

Figura 3.15: Pruebas de compatibilidad con ambos dispositivos

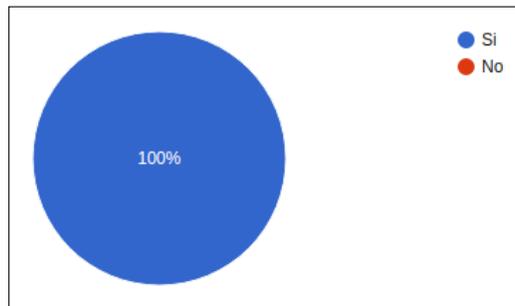


Figura 3.16: Resultado pregunta 1

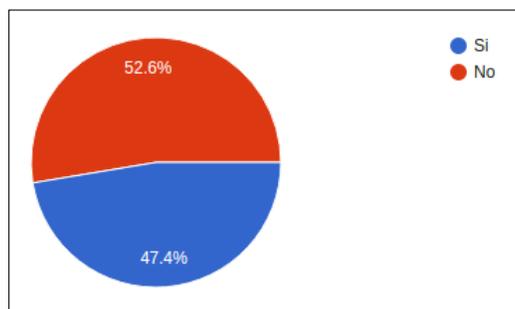


Figura 3.17: Resultado pregunta 2

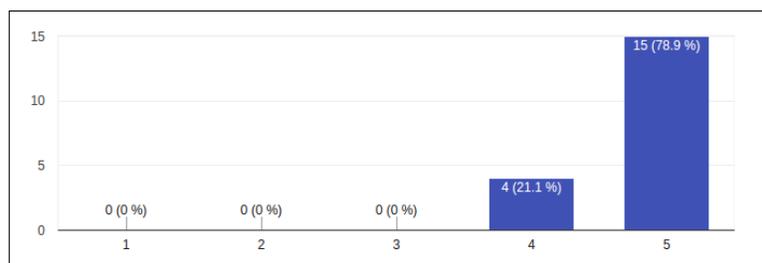


Figura 3.18: Resultado pregunta 3

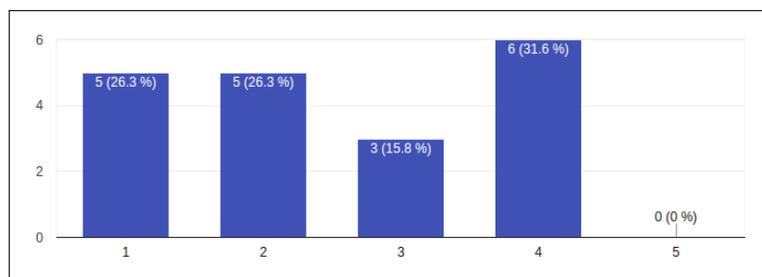


Figura 3.19: Resultado pregunta 4

Capítulo 4

Experimentación y resultados

En el presente capítulo se presentan el protocolo de experimentación, los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas a los 32 participantes y las inferencias estadísticas asociadas.

4.1. Participantes

Para el experimento se seleccionaron 30 usuarios jóvenes entre 18 y 30 años quienes no debían tener antecedentes médicos que involucrarán el miembro superior, la distribución de usuarios fue la siguiente: (i) 11 participantes como grupo no intervenido, (ii) 19 usuarios sin antecedentes médicos para entrenar con la herramienta desarrollada, de los cuales 10 con OmniPhantom y 9 con LeapMotion (la distribución de quienes utilizaban OmniPhantom o LeapMotion se realizó con el lanzamiento de una moneda con el fin de no generar sesgos en el experimento). Adicionalmente se contó con (iii) 2 sujetos caso de estudio con antecedentes médicos quienes decidieron de forma voluntaria hacer parte del experimento.

4.1.1. Población sin antecedentes médicos

La Tabla 4.1 presenta los usuarios que participaron de la prueba piloto y posterior toma de datos del experimento usando OmniPhantom y LeapMotion, una sesión previa al experimento se realizó como entrenamiento, acondicionamiento y reconocimiento de las herramientas a usar en el experimento.

Adicionalmente se contó con un tercer grupo de 11 sujetos, el cual no realizó ningún tipo de entrenamiento, se les aplicó el NHPT al inicio de los experimentos y una vez concluido el experimento se realizó nuevamente la prueba, con el fin de verificar si los resultados obtenidos se pueden o no deber al entrenamiento con LeapMotion u OmniPhantom.

Sujeto	Edad	Género	Mano	Dispositivo
1	24	M	Diestro	OmniPhantom
2	22	M	Diestro	OmniPhantom
3	25	M	Diestro	LeapMotion
4	30	M	Diestro	OmniPhantom
5	25	M	Diestro	OmniPhantom
6	23	M	Diestro	OmniPhantom
7	23	M	Diestro	OmniPhantom
8	21	M	Diestro	LeapMotion
9	21	M	Diestro	LeapMotion
10	20	F	Diestro	LeapMotion
11	20	F	Diestro	LeapMotion
12	20	M	Diestro	LeapMotion
13	19	M	Diestro	LeapMotion
14	24	M	Diestro	LeapMotion
15	19	M	Diestro	OmniPhantom
16	26	M	Diestro	OmniPhantom
17	23	M	Ambidiestro	OmniPhantom
18	22	M	Diestro	LeapMotion
19	23	M	Diestro	OmniPhantom

Tabla 4.1: Características de la población sin antecedentes médicos y tipo de interfaz utilizada

4.1.2. Usuarios con antecedentes médicos

A continuación se presentan los dos sujetos caso de estudio:

Sujeto 1

La paciente es de género femenino de 45 años, que hace aproximadamente 10 años fue diagnosticada con síndrome de túnel del carpo bilateral con mayor compromiso de la mano derecha lo cual le conlleva a referir síntomas sensitivos que limitan levemente sus actividades funcionales; también hace 2 años fue diagnosticada de fibromialgia, lo cual también limita levemente las actividades funcionales y motrices finas y gruesas de las extremidades superiores.

Sujeto 2

El paciente es una persona de 26 años de género masculino que sufrió hace aproximadamente 6 años un trauma craneoencefálico debido a una herida por arma de fuego, la cual le generó una hemiparesia que limitó la realización de actividades motrices finas y gruesas de su miembro superior izquierdo. En el miembro superior derecho no se evidenció limitación funcional.

Todos los sujetos que participaron en: (i) la prueba piloto, (ii) estudio con población sana y (iii) población con algún tipo de condición médica firmaron el consentimiento informado para permitir el análisis y publicación de los datos obtenidos en el presente trabajo (ver Figura 4.1)

4.2. Protocolos

En la presente sección se detalla el procedimiento experimental llevado a cabo, en cuanto a la posición del usuario, la Figura 4.2 indica el ángulo de visión y la posición postural para llevar a cabo el experimento, dado que es importante garantizar que el participante se encuentre en una posición cómoda y no realice movimientos compensatorios indeseados.

4.2.1. Protocolo para NHPT

Previo a iniciar el experimento y una vez concluidas la totalidad de las sesiones previstas, se solicitaba a los participantes sin antecedentes médicos realizar el NHPT con el fin de evaluar la condición motriz previa e identificar diferencias con la condición final posterior al entrenamiento. La manera de ejecutar el test se describe en detalle en la sección 2.2 y se puede evidenciar en la Figura 4.3.

	<p>Incidencia de los dispositivos hápticos y de visión en la evolución de la funcionalidad motriz gruesa del miembro superior</p> <p>Autorización de almacenamiento, tratamiento y uso de datos</p>
<p>Dando cumplimiento a lo dispuesto en la Ley 1581 de 2012, "Por el cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales" y de conformidad con lo señalado en el Decreto 1377 de 2013, con la firma de este documento manifiesto que he sido informado por los responsables del proyecto de lo siguiente:</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Es de carácter voluntario responder las preguntas realizadas durante el proceso. 2. El sistema desarrollado mide los tiempos tomados en realizar la tarea solicitada, los cuales posteriormente se van procesar. 3. Me he informado que la finalidad es académica y buscan realizar una publicación en evento o revista científica con los resultados obtenidos. 4. Los datos personales se han suministrado de forma voluntaria y son verídicos. 	
<p>___ Conozco y acepto el tratamiento de datos personales de los responsables del proyecto.</p>	
<p>Se firma en la ciudad de Popayán, el día ____ del mes de _____ del año _____.</p>	
Nombre:	
Firma:	
Celular:	
Correo electrónico:	

Figura 4.1: Consentimiento informado

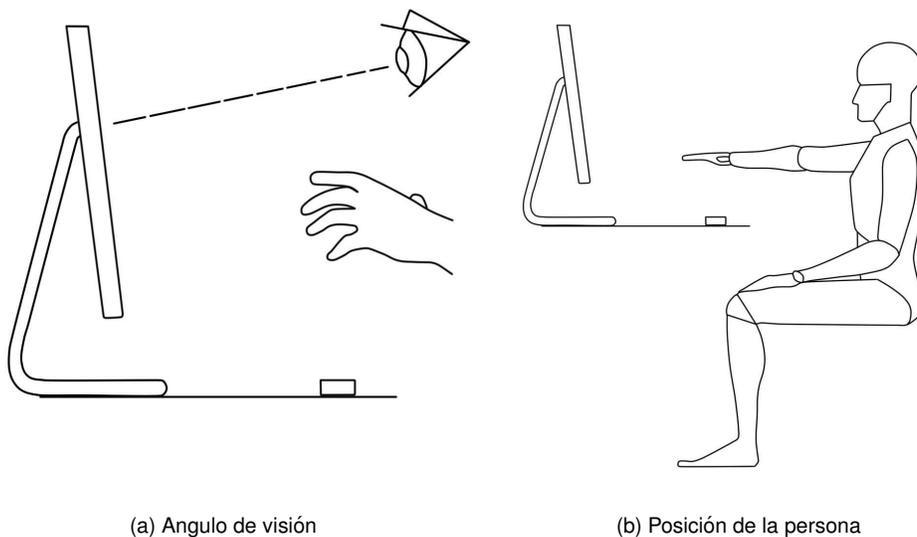


Figura 4.2: Parámetros a tener en cuenta en el protocolo experimental

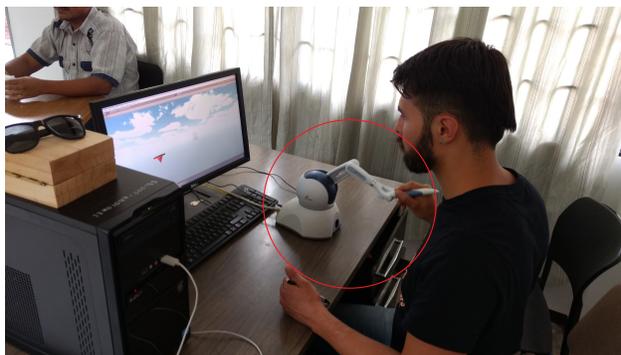


Figura 4.3: Usuarios realizando NHPT

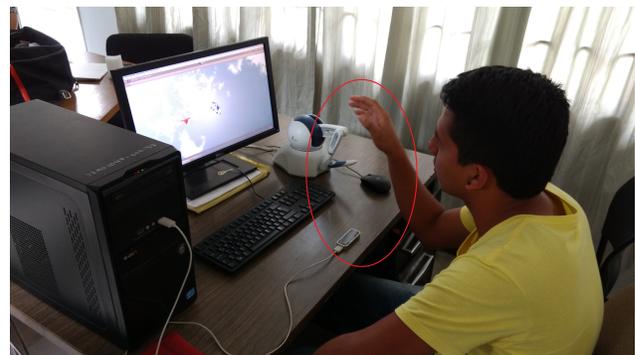
4.2.2. Utilización del entorno virtual

Los usuarios con y sin antecedentes médicos realizaron una primera sesión de exploración del entorno 3D, cuyo propósito era que se familiarizaran con el mismo. Las sesiones posteriores, en las cuales si se registraba el desempeño del participante, siempre se llevaban a cabo iniciando con la mano dominante, luego se tenía un breve periodo de descanso y se finalizaba con la mano no dominante. El desempeño se definió como el tiempo total requerido desde el inicio del juego hasta lograr golpear el último objetivo en la escena. A todos los usuarios se les configuró un total de 20 objetivos.

La Figura 4.4a muestra un usuario entrenado con LeapMotion y la Figura 4.4b a un usuario entrenado con OmniPhantom.



(a) Entrenamiento con OmniPhantom



(b) Entrenamiento con LeapMotion

Figura 4.4: Experimentación con usuarios sin antecedentes médicos

4.3. Medidas de desempeño

Los tiempos requeridos por los participantes no intervenidos se muestran en la Tabla 4.2, el procedimiento se realizó de forma manual. Las columnas 4, 5, 6 y 7 indican los tiempos obtenidos en segundos obtenidos en la prueba NHPT (con mano dominante y no dominante) en la semana inicial y una semana después.

Sujeto	Edad	Mano dominante	NHPT dominante inicial	NHPT no dominante inicial	NHPT dominante final	NHPT dominante final
1	20	Diestro	20,78	23,75	22,76	22,43
2	21	Diestro	20,33	22,87	20,58	21,38
3	20	Diestro	21,79	20,51	19,64	20,71
4	19	Diestro	30,62	28,41	21,95	25,53
5	20	Diestro	18,84	20,02	18,95	18,50
6	18	Diestro	21,90	24,31	21,32	22,79
7	30	Diestro	21,59	19,32	20,54	20,15
8	20	Diestro	24,46	27,98	22,51	24,16
9	23	Diestro	23,61	24,96	20,96	22,68
10	21	Diestro	21,93	24,41	23,19	24,59
11	22	Diestro	19,02	22,01	18,22	24,33

Tabla 4.2: Tiempo en segundos requeridos por los participantes del grupo no intervenido para completar el NHPT

La Tabla 4.3 y 4.4 tiene los resultados del NHPT del grupo intervenido, con los valores obtenidos previo a iniciar el experimento y una vez terminado el mismo.

Sujeto	NHPT dominante inicial	NHPT no dominante inicial	NHPT dominante Final	NHPT no dominante final
1	19,88	21,81	19,56	22,14
2	24,42	22,98	20,05	18,85
4	23,65	23,79	23,00	25,25
5	23,50	25,75	21,19	22,19
6	21,20	21,62	19,79	22,21
7	27,15	29,62	23,70	25,95
15	24,58	27,56	20,19	23,74
16	20,77	22,39	19,21	20,46
17	19,63	21,48	16,78	20,90
19	17,97	21,02	18,42	21,77

Tabla 4.3: Tiempo en segundos requeridos por los participantes del grupo intervenido con OmniPhantom para completar el NHPT

La Tabla 4.5 relaciona los datos de los tiempos totales obtenidos en cada test por cada uno de los participantes del grupo intervenido sin antecedentes médicos y entrenado con OmniPhantom.

La Tabla 4.6 relaciona los datos de los tiempos totales obtenidos en cada test por cada uno de los participantes del grupo intervenido sin antecedentes médicos y entrenado con LeapMotion.

Los tiempos presentados en cada sesión y por cada usuario son dos: Tiempo en segundos con mano dominante y tiempo en segundos con mano no dominante respectivamente.

Finalmente las Tablas 4.7 y 4.8 relacionan los tiempos obtenidos por los usuarios con antecedentes médicos. Cabe resaltar que en cada sesión entrenaron con ambos dispositivos, iniciando con la mano no afectada y finalizando con la afectada. Además en cada sesión se intercaló el dispositivo con el que iniciaron.

En la Tabla 4.8 los tiempos corresponden a la mano no afectada (la dominante) y la mano afectada (no dominante) respectivamente.

Sujeto	NHPT dominante inicial	NHPT no dominante inicial	NHPT dominante Final	NHPT no dominante final
3	21,38	24,45	19,70	22,82
8	24,42	28,96	22,56	25,05
9	22,34	23,79	20,71	22,49
10	21,31	23,53	18,63	18,79
11	24,84	23,90	21,73	20,73
12	22,39	24,14	20,80	21,06
13	21,32	25,60	21,05	23,34
14	20,97	19,63	21,24	22,43
18	19,66	23,79	20,79	23,94

Tabla 4.4: Tiempo en segundos requeridos por los participantes del grupo intervenido con LeapMotion para completar el NHPT

Suje- to	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
1	51,28880 59,66034	62,82413 54,78492	41,70094 47,75450	37,08604 48,82363	33,84032 44,72292
2	79,96493 109,16570	86,00147 82,23144	53,35190 50,39150	62,63632 54,14477	61,00740 53,65181
4	49,95359 41,98729	40,58019 40,78753	47,13326 40,80809	46,44709 36,76575	38,11362 38,43234
5	36,86524 39,42406	49,72751 36,60746	40,62202 27,65139	42,81395 28,54874	38,29532 29,28300
6	51,79647 51,94367	51,28638 45,07053	41,78029 46,94206	53,72589 49,33313	43,47211 42,10767
7	44,43592 38,01634	32,65578 30,75518	52,19363 31,58295	43,30753 23,81431	28,25552 27,19438
15	59,29243 51,63250	48,53584 51,58367	43,48148 35,31504	47,89327 40,73387	39,76617 33,20838
16	42,60472 42,08048	32,07105 28,34826	27,06925 28,10812	27,06248 24,74845	22,15357 22,90061
17	52,20486 68,81134	43,34422 38,53150	47,25050 47,07569	40,53256 43,84868	41,60185 39,76028
19	53,46829 56,88713	45,14476 53,17082	36,00646 34,95630	29,83439 42,72366	27,46152 30,69313

Tabla 4.5: Tiempos totales obtenidos en cada sesión por los usuarios intervenidos entrenados con OmniP-hantom

Suje- to	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
3	38,04740 29,56562	34,98721 32,61493	31,64206 37,10907	30,87324 31,76354	32,55288 30,32026
8	55,91142 39,81312	39,67286 31,04119	35,23654 28,61189	41,47356 24,50383	24,22589 23,51108
9	38,47227 35,27631	45,14619 37,06454	38,11028 32,33321	38,76641 26,26167	28,46608 24,72525
10	34,18845 24,81215	27,98985 31,67206	40,85528 29,44046	35,78416 23,98996	22,25339 17,87132
11	34,19176 35,00780	44,18325 36,69127	37,35619 30,31194	39,50975 31,85360	25,52915 37,44896
12	43,71101 26,67403	36,29038 32,41331	35,58178 36,60487	34,17059 26,28963	28,73034 24,37069
13	31,98339 27,16136	44,57100 33,73415	29,87243 41,86975	31,29240 33,06219	26,06203 27,77605
14	40,27011 25,46120	29,89028 24,73118	29,25277 22,93640	27,86468 23,00969	22,58488 23,57572
18	42,54645 23,76725	27,29431 21,07533	29,24982 27,37197	37,27506 26,44988	36,83401 29,96782

Tabla 4.6: Tiempos totales obtenidos en cada sesión por los usuarios intervenidos entrenados con Leap-Motion

Dispositivo	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4
LeapMotion	105,5462 71,37339	71,71381 64,41223	41,49355 40,45605	56,4289 59,69331
OmniPhantom	71,37339 119,4303	68,66056 65,01098	48,57625 53,48999	65,20632 50,93452

Tabla 4.7: Tiempos obtenidos en las 4 sesiones por el sujeto 1 con antecedentes médicos

Dispositivo	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4
LeapMotion	100,4924	98,42256	66,3682	73,73212
	106,5726	110,271	116,7849	109,1505
OmniPhantom	120,7905	57,22535	61,92054	88,35413
	225,1077	138,1546	102,6461	102,0472

Tabla 4.8: Tiempos obtenidos en las 4 sesiones por el sujeto 2 con antecedentes médicos

4.4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis estadístico.

4.4.1. Nine-hole peg test

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el NHPT al inicio y al final del experimento con OmniPhantom y LeapMotion se tiene la Tabla 4.9 donde se observan las diferencias en cuanto a media y desviación estándar de los resultados obtenidos.

Al comparar los resultados obtenidos en la prueba NHPT antes y después del entrenamiento con OmniPhantom, se encontró que el desempeño de los participantes había aumentado significativamente ($p = 0,044487$) en el caso de la mano dominante, por parte de la mano no dominante no hubo diferencia significativa. El tiempo promedio del grupo antes de iniciar el entrenamiento fue de $22,2750 \pm 2,8236$ segundos para mano dominante y $23,802 \pm 2,9115$ segundos para mano no dominante y al finalizar la prueba fue de $20,1890 \pm 2,016$ segundos para mano dominante y $22,3460 \pm 2,1512$ segundos para mano no dominante. En la Figura 4.5 se presentan los gráficos de cajas y alambres de los tiempos obtenidos por los participantes en NHPT antes y después del entrenamiento, con mano dominante (1 y 2 en el eje x respectivamente) y no dominante (3 y 4 en el eje x respectivamente). De la gráfica se observa un descenso en la mediana y una disminución del rango intercuartílico. Con respecto al número de datos atípicos no se observa.

Al comparar los resultados obtenidos en la prueba NHPT antes y después del entrenamiento con LeapMotion, se encontró que el desempeño de los participantes había aumentado significativamente ($p = 0,038503$ y $p = 0,023694$) para la mano dominante y no dominante respectivamente. El tiempo promedio del grupo antes de iniciar el entrenamiento fue de $22,07 \pm 1,6585$ segundos para mano dominante y $24,1988 \pm 2,4094$ segundos para mano no dominante y al finalizar la prueba fue de $20,8011 \pm 1,1261$ segundos para mano dominante y $22,2944 \pm 1,8701$ segundos para mano no dominante. En la Figura 4.5 se presentan los gráficos de cajas y alambres de los tiempos obteni-

	Media inicial	Desviación estándar inicial	Media final	Desviación estándar final
OmniPhantom mano dominante	22.275	± 2.8236	20.189	± 2.0416
OmniPhantom mano no dominante	23.802	± 2.9115	22.346	± 2.1512
OmniPhantom Total	46.077	± 5.7351	45.535	± 4.1928
LeapMotion mano dominante	22.07	± 1.6585	20.8011	± 1.1261
LeapMotion mano no dominante	24.1988	± 2.4094	22.2944	± 1.8701
LeapMotion Total	46.2688	± 4.0679	43.0955	± 2.9962

Tabla 4.9: Resumen estadístico de NHPT en el experimento

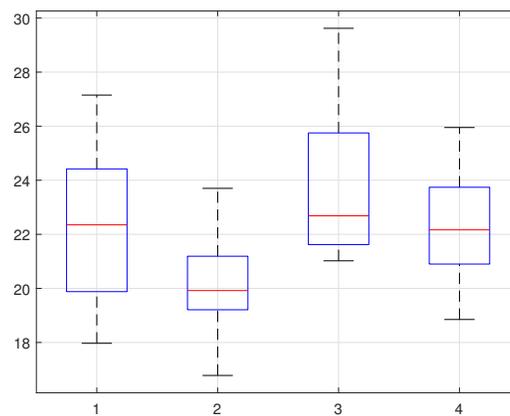


Figura 4.5: Diagrama de cajas y bigotes OmniPhantom para NHPT en el grupo intervenido

dos por los participantes en NHPT antes y después del entrenamiento, con mano dominante (1 y 2 en el eje x respectivamente) y no dominante (3 y 4 en el eje x respectivamente). De la gráfica se observa un descenso en la mediana. Con respecto al número de datos atípicos se piensa que se debe a la diferencia de adaptación que requiere el cerebro para la ubicación espacial en una pantalla renderizada, lo cual puede representar distintos grados de dificultad.

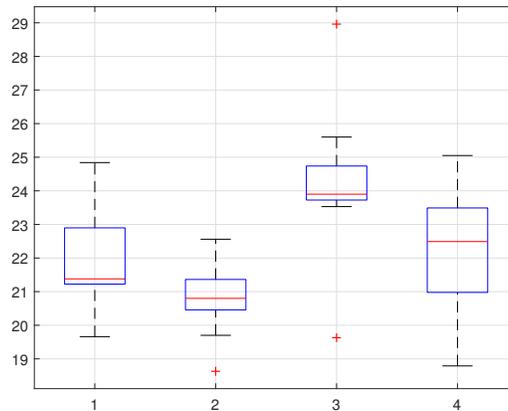


Figura 4.6: Diagrama de cajas y bigotes LeapMotion para NHPT en el grupo intervenido

4.4.2. Pendiente normalizada

El desempeño se obtuvo como se presenta en [53] realizando una regresión lineal de los datos obtenidos con los vectores normalizados, los resultados se muestran en las Tablas 4.10 y 4.11, donde los números en rojo representan a los participantes con menor evolución a lo largo de las sesiones, los azules por su parte, son los usuarios con mejor evolución en la prueba.

Mano Dominante	Mano No Dominante
-0.0965	-0.0601
-0.0713	-0.1274
-0.0357	-0.0265
-0.0082	-0.0719
-0.0264	-0.0297
-0.0416	-0.0752
-0.0669	-0.0924
-0.1078	-0.0997
-0.0460	-0.0767
-0.1259	-0.1105

Tabla 4.10: Pendientes obtenidas con los datos normalizados para mano dominante y no dominante utilizando OmniPhantom

Mano Dominante	Mano No Dominante
-0.0397	0.0018
-0.1101	-0.0983
-0.0585	-0.0861
-0.0393	-0.0681
-0.0498	0.0001
-0.0734	-0.0293
-0.0564	0.0013
-0.0929	-0.0216
-0.0034	0.0593

Tabla 4.11: Pendientes obtenidas con los datos normalizados para mano dominante y no dominante utilizando LeapMotion

En la Tabla 4.12 se puede observar las diferencias de la media y la desviación estándar de los valores obtenidos utilizando la pendiente.

	Media	Desviación estándar
OmniPhantom mano dominante	-0.062630	$\pm 0,038011$
OmniPhantom mano no dominante	-0.077010	$\pm 0,032519$
LeapMotion mano dominante	-0.058167	$\pm 0,031435$
LeapMotion mano no dominante	-0.026767	$\pm 0,050140$

Tabla 4.12: Resumen estadístico de las pendientes obtenidas en el experimento

Al comparar los resultados obtenidos en las pendientes obtenidas durante el entrenamiento con LeapMotion y OmniPhantom, se encontró que la diferencia no es significativa, pues la pendiente promedio del grupo con LeapMotion es $-0,058167 \pm 0,031435$ para mano dominante y $-0,026767 \pm 0,050140$ para mano no dominante, por otro lado el grupo con OmniPhantom la pendiente promedio fue de $-0,062630 \pm 0,038011$ para mano dominante y $-0,077010 \pm -0,077010$ para mano no dominante. Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran el diagrama de cajas y alambres, donde se observa que el rango intercuartilico cambia para mano dominante y no dominante en ambos casos.

La Figura 4.9 y la Figura 4.10 presenta los gráficos de la evolución alcanzada por los usuarios.

Cabe resaltar que a diferencia del grupo de usuarios sin antecedentes médicos, los sujetos con antecedentes médicos entrenaron con ambos dispositivos en cada sesión y con 5 minutos de descanso entre prueba y prueba; posteriormente se rotaba el dispositivo con el que iniciaban el entrenamiento en cada sesión.

La Figura 4.11 evidencia la evolución del sujeto 1 a los largo de 4 sesiones y se puede identificar la mejora en los tiempos de ejecución del test.

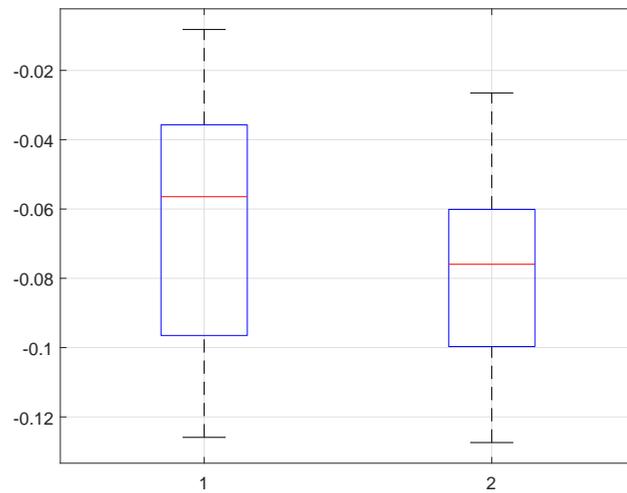


Figura 4.7: Diagrama de caja y bigotes para las pendientes obtenidas OmniPhantom con la mano dominante (diagrama de la izquierda) y mano no dominante (diagrama de la derecha)

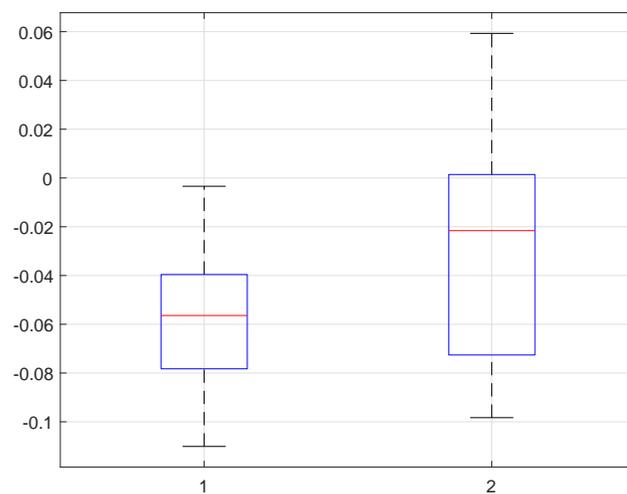
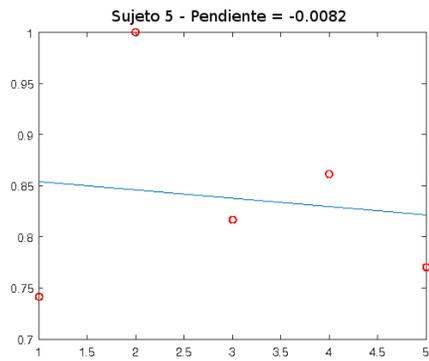
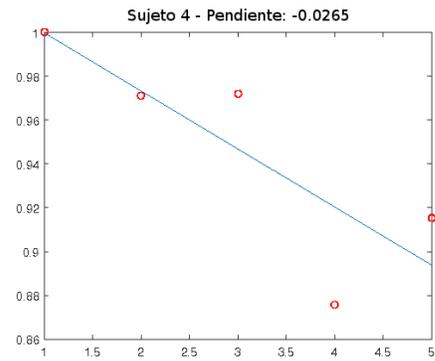


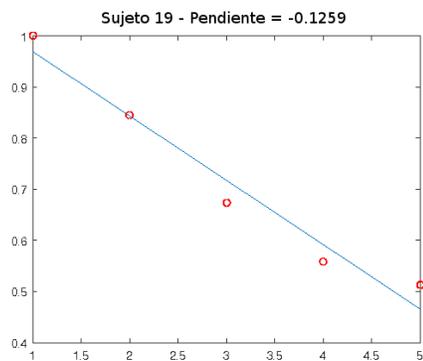
Figura 4.8: Diagrama de caja y bigotes para las pendientes obtenidas LeapMotion con la mano dominante (diagrama de la izquierda) y mano no dominante (diagrama de la derecha)



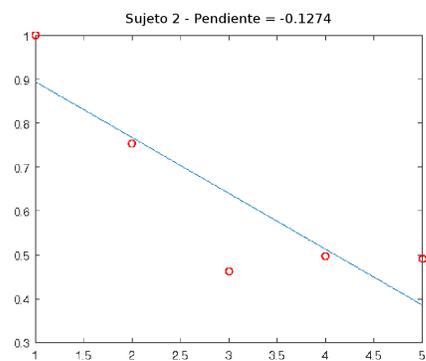
(a) Peor desempeño con mano dominante



(b) Peor desempeño con mano no dominante

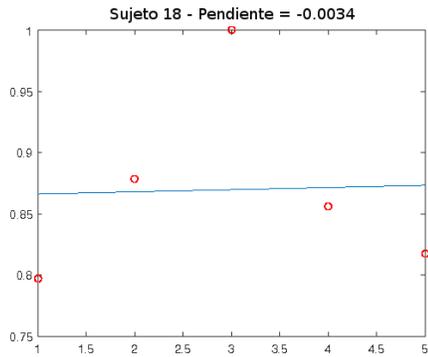


(c) Mejor desempeño con mano dominante

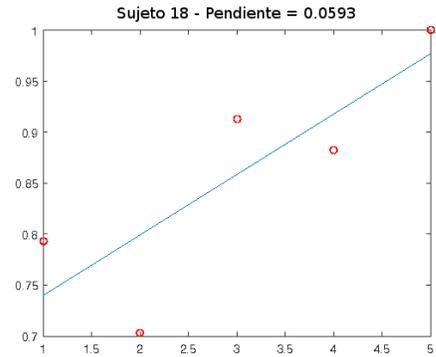


(d) Mejor desempeño con mano no dominante

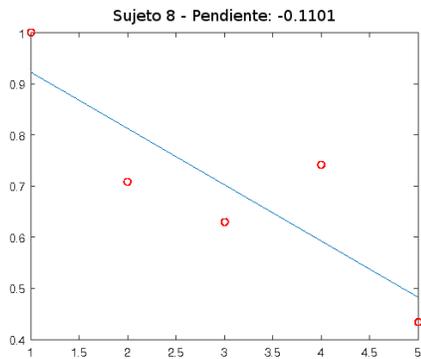
Figura 4.9: Desempeño con OmniPhantom



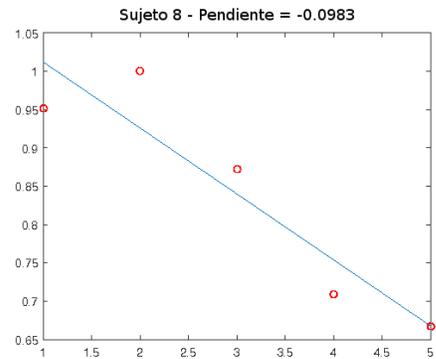
(a) Peor desempeño con mano dominante



(b) Peor desempeño con mano no dominante

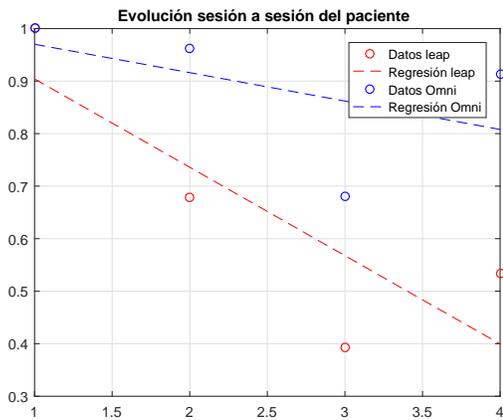


(c) Mejor desempeño con mano dominante

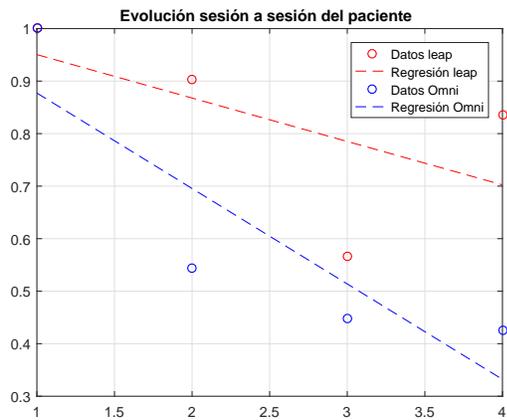


(d) Mejor desempeño con mano no dominante

Figura 4.10: Desempeño con LeapMotion



(a) Evolución del sujeto 1 con mano dominante



(b) Evolución del sujeto 1 con mano no dominante

Figura 4.11: Evolución del sujeto 1 con ambos dispositivos

La Figura 4.12 presenta la evolución del sujeto 2 a lo largo de 4 sesiones, cabe resaltar que este usuario no consiguió culminar satisfactoriamente las pruebas de entrenamiento.

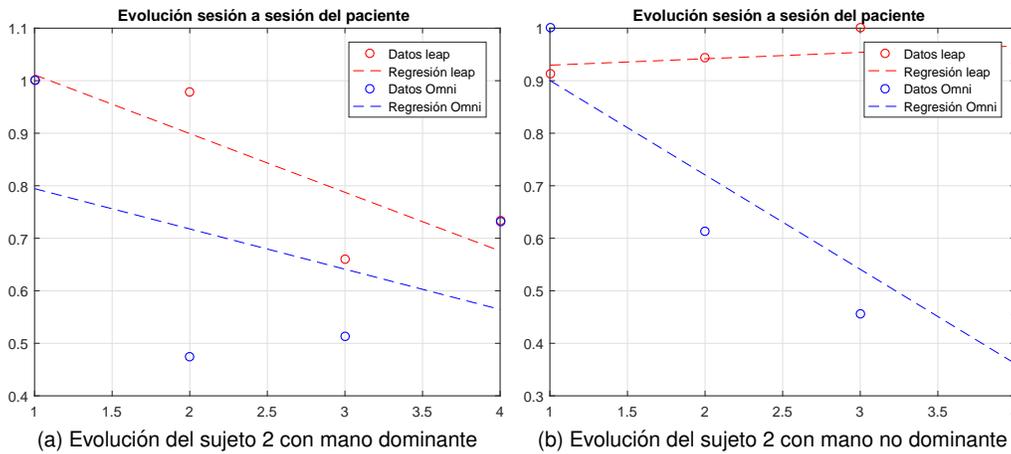


Figura 4.12: Evolución del sujeto 2 con ambos dispositivos

4.5. Discusión

En general el uso de tecnología en el proceso de rehabilitación da la posibilidad de registrar y recopilar datos como la posición y ángulos de las articulaciones de los brazos, facilitando un análisis posterior de los datos sobre distintas variables de interés en el proceso de rehabilitación.

En el caso de las interfaces hápticas hay de diferentes tipos: (i) guantes [54, 55], (ii) exoesqueleto de mano [56, 57, 58] y (iii) exoesqueleto de brazo [58, 59, 60] que resultan especialmente útiles en casos donde hay un alto grado de compromiso y es necesario estimular la neuroplasticidad y el aprendizaje motor, permitiendo realizar las actividades con alta intensidad, repetitivo y orientado a tareas [61]. Sin embargo, esto evidencia la necesidad de disponer de distintos tipos de interfaces hápticas desarrollados para abordar variados tipos de situación, por ejemplo en [62] se propone un sistema de entrenamiento basado en realidad virtual el cual funciona específicamente para agarre pinza. Dado los costos que implican los dispositivos hápticos [63] resulta complicado encontrarlos en un espacio de rehabilitación tradicional.

Complementando la situación anterior expuesta [64] las interfaces hápticas permiten realizar ejercicios como los establecidos por la Prueba de Rehabilitación de manos de Jebsen (JTHR), sin embargo en el caso de este proyecto, donde la interfaz háptica es de tipo efector final, mejorar habilidades como: movimientos de la mano, movimiento de los dedos, realizar esfuerzo con los dedos y con la mano va a tener un efecto limitado.

Los dispositivos de visión, como el LeapMotion, el Kinect o el Wii Remote (de Nintendo), son más versátiles y su costo menor [65], por lo que pueden resultar como un buen complemento durante

el proceso de rehabilitación asistida o en el caso de una terapia de seguimiento [66, 67, 68, 69].

En concordancia con lo presentado en [70] se obtuvo que el tiempo promedio en el NHPT para la mano dominante fue menor frente a la no dominante, tanto antes como después del entrenamiento, aunque en [70] no se estableció la significancia de dichas diferencias, en este proyecto se encontró que la diferencia no era considerable. El tiempo en realizar el ejercicio mejoró significativamente con LeapMotion ($p = 0,038503$) y con OmniPhantom ($p = 0,044487$) esto concuerda con [65] donde se reportan mejoras semejantes ($p = 0,028$) aunque en ese caso se utilizó únicamente LeapMotion.

Las diferencias del grupo intervenido sin condiciones médicas no fueron estadísticamente significativas, ello puede atribuirse al nivel motivacional, cognitivo, motor y habilidades sensoriales requeridas por el ejercicio con LeapMotion u OmniPhantom. En el caso del sujeto 2 con condiciones médicas, es precisamente la dificultad en su hemisferio izquierdo lo que afecta su desempeño en el caso de LeapMotion, dado que el compromiso afecta sus habilidades sensoriales y el lápiz háptico se convierte entonces en un punto de referencia para facilitar el desarrollo de la tarea.

Finalmente quedan las interrogantes por responder: ¿incrementar el número de realimentaciones (visuales ó sonoras) pueden remplazar la sensación táctil?, ¿la realidad virtual inmersiva resulta más efectiva que una pantalla 3D renderizada? y ¿la gamificación del proceso de rehabilitación tendrá mayor incidencia?.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

- Los resultados obtenidos con el NHPT y la normalización de los tiempos obtenidos, son consistentes, pues en ambos casos se evidencia que no hay diferencias significativas entre los usuarios entrenados con OmniPhantom y LeapMotion, como consecuencia no se puede descartar que su incidencia sea semejante en el entrenamiento y requiere mayores estudios.
- En el caso de los sujetos con condiciones medicas, se evidencia un progreso mayor en el uso del LeapMotion en el caso de la mano dominante y caso contrario ocurre en la mano no dominante donde tiene un mayor progreso con el dispositivo OmniPhantom, dado el tamaño de la muestra los resultados no son concluyentes.
- El LeapMotion requiere un proceso de aprendizaje nuevo para el participante, dado que el cerebro está previamente entrenado para realizar las tareas a través del contacto físico, razón por lo cual en dicho proceso de aprendizaje se observa que la desviación estándar de los tiempos obtenidos son menores que en el caso de OmniPhantom.

5.2. Trabajos futuros

En está sección se proponen otros trabajos para llevar a cabo:

- Realizar estudios con más usuarios sobre la incidencia de la realimentación visual y háptica en los procesos de rehabilitación motriz.
- Utilizar un control basado en reglas para la adaptación del nivel de juego al usuario.

- Desarrollar una plataforma software que entregue información relacionada con las variables de interés del experto en rehabilitación para su posterior análisis.
- Establecer la incidencia de los ejercicios realizados en realidad virtual no inmersiva frente a la inmersiva.

Bibliografía

- [1] M. A. L. Villeda, F. J. R. Sánchez, and O. A. D. Ramírez, “Diseno robótico de un exoesqueleto pediátrico de miembro superior basado en criterios clinicos y antropomórficos para análisis de movimiento y rehabilitación,” *CINVESTAV, Unidad Saltillo*, pp. 51–138, 2013.
- [2] R. A. Mio Zaldívar, “Diseño de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior accionado por una interfaz cerebro-máquina,” Master’s thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.
- [3] J. Sobotta, *Sobotta atlas de anatomía humana*. Ed. Médica Panamericana, 2006, vol. 1.
- [4] P. Omni. (2017, Octubre) User guide. SensAble Technologies, Inc.
- [5] M. P. Salamanca, “Análisis e implementación de una interfaz háptica en entornos virtuales,” *Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*, 2009.
- [6] L. A. Connell and S. F. Tyson, “Clinical reality of measuring upper-limb ability in neurologic conditions: a systematic review,” *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 93, no. 2, pp. 221–228, 2012.
- [7] I. S. Blanco, *Manual SERMEF de rehabilitación y medicina física*. Ed. Médica Panamericana, 2006.
- [8] P. Sánchez de Muniain y Sabater, *Rehabilitación de la parálisis cerebral mediante la locomoción refleja: efecto sobre la función de prensión manual*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2002.
- [9] M. G. Gorgatti and M. T. S. Böhme, “Autenticidade científica de um teste de agilidade para indivíduos em cadeira de rodas,” *Revista Paulista de Educação Física*, vol. 17, no. 1, pp. 41–50, 2003.
- [10] G. Burdea *et al.*, “Virtual rehabilitation-benefits and challenges,” *Methods of Information in Medicine-Methodik der Information in der Medizin*, vol. 42, no. 5, pp. 519–523, 2003.
- [11] M. K. Holden, “Virtual environments for motor rehabilitation: review,” *Cyberpsychology & behavior*, vol. 8, no. 3, pp. 187–211, 2005.

- [12] H. Sveistrup, "Motor rehabilitation using virtual reality," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2004.
- [13] L. Mundy and J. Hiller, "Rehabilitation of stroke patients using virtual reality games," *Adelaide: Adelaide Health Technology Assessment (AHTA). Horizon Scanning Prioritising Summary*, vol. 27, 2010.
- [14] K. Laver, S. George, S. Thomas, J. Deutsch, and M. Crotty, "Realidad virtual para la rehabilitación del accidente cerebrovascular [revisión cochrane traducida]," *Cochrane Database of Systematic reviews*, vol. 9, 2011.
- [15] G. Saposnik and M. Levin, "Virtual reality in stroke rehabilitation a meta-analysis and implications for clinicians," *Stroke*, vol. 42, no. 5, pp. 1380–1386, 2011.
- [16] S. Viñas-Diz and M. Sobrido-Prieto, "Realidad virtual con fines terapéuticos en pacientes con ictus: revisión sistemática," *Neurología*, vol. 31, no. 4, pp. 255–277, 2016.
- [17] M. J. Fu, J. Knutson, and J. Chae, "Stroke rehabilitation using virtual environments," *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, vol. 26, no. 4, p. 747, 2015.
- [18] M. A. Delph, S. A. Fischer, P. W. Gauthier, C. H. M. Luna, E. A. Clancy, and G. S. Fischer, "A soft robotic exomusculature glove with integrated semg sensing for hand rehabilitation," in *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 1–7.
- [19] M. Rudinskiy, M. Bula, T. Stahl, N. Davies, M. Fitzgerald, S. D'Andrea, and K. Gielo-Perczak, "Dual actuated gait rehabilitation treadmill implementing virtual reality and visual postural feedback," in *Bioengineering Conference (NEBEC), 2014 40th Annual Northeast*. IEEE, 2014, pp. 1–2.
- [20] Y. Ganesan, S. Gobebe, and V. Durairajah, "Development of an upper limb exoskeleton for rehabilitation with feedback from emg and imu sensor," *Procedia Computer Science*, vol. 76, pp. 53–59, 2015.
- [21] L. Dipietro, A. M. Sabatini, and P. Dario, "Evaluation of an instrumented glove for hand-movement acquisition," *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 40, no. 2, p. 179, 2003.
- [22] C. Crean, C. Mcgeough, and R. O'Kennedy, "Wearable biosensors for medical applications," *Biosensors for Medical Applications, Woodhead Publishing, Philadelphia*, pp. 301–330, 2012.
- [23] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects," in *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, vol. 55, no. 1. Chicago, IL, 1994, pp. 295–300.

- [24] C. G. Burgar, P. S. Lum, P. C. Shor, and H. M. Van der Loos, "Development of robots for rehabilitation therapy: the palo alto va/stanford experience," *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 37, no. 6, pp. 663–674, 2000.
- [25] L. E. Kahn, P. S. Lum, W. Z. Rymer, and D. J. Reinkensmeyer, "Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does?" *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 43, no. 5, p. 619, 2006.
- [26] Y.-J. Chang, S.-F. Chen, and J.-D. Huang, "A kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities," *Research in developmental disabilities*, vol. 32, no. 6, pp. 2566–2570, 2011.
- [27] Y.-J. Chang, W.-Y. Han, and Y.-C. Tsai, "A kinect-based upper limb rehabilitation system to assist people with cerebral palsy," *Research in developmental disabilities*, vol. 34, no. 11, pp. 3654–3659, 2013.
- [28] A. H. Smeragliuolo, N. J. Hill, L. Disla, and D. Putrino, "Validation of the leap motion controller using marked motion capture technology," *Journal of biomechanics*, vol. 49, no. 9, pp. 1742–1750, 2016.
- [29] T. Nef, M. Guidali, V. Klamroth-Marganska, and R. Riener, "Armin-exoskeleton robot for stroke rehabilitation," in *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7-12, 2009, Munich, Germany*. Springer, 2009, pp. 127–130.
- [30] A. Jackson, P. Culmer, S. Makower, M. Levesley, R. Richardson, A. Cozens, M. M. Williams, and B. Bhakta, "Initial patient testing of ipam—a robotic system for stroke rehabilitation," in *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*. IEEE, 2007, pp. 250–256.
- [31] S. Kemna, P. R. Culmer, A. E. Jackson, S. Makower, J. F. Gallagher, R. Holt, F. Clossen, J. A. Cozens, M. C. Levesley, and B. B. Bhakta, "Developing a user interface for the ipam stroke rehabilitation system," in *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. IEEE, 2009, pp. 879–884.
- [32] H. I. Krebs, M. Ferraro, S. P. Buerger, M. J. Newbery, A. Makiyama, M. Sandmann, D. Lynch, B. T. Volpe, and N. Hogan, "Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for mit-manus," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2004.
- [33] C. Colomer, A. Baldoví, S. Torromé, M. Navarro, B. Moliner, J. Ferri, and E. Noé, "Eficacia del sistema arneo® spring en la fase crónica del ictus. estudio en hemiparesias leves-moderadas," *Neurología*, vol. 28, no. 5, pp. 261–267, 2013.
- [34] S. Faran, O. Einav, D. Yoeli, M. Kerzhner, D. Geva, G. Magnazi, S. van Kaick, and K.-H. Mauritz, "Reo assessment to guide the reogo therapy: Reliability and validity of novel robotic scores," in *2009 Virtual Rehabilitation International Conference*. IEEE, 2009, pp. 209–209.
- [35] E. C. Lu, "Development of an upper limb robotic device for stroke rehabilitation," Ph.D. dissertation, University of Toronto, 2011.

- [36] J. A. Díez, F. J. Badesa, R. Morales, L. L. J. Sabater, and N. Garcia-Aracil, "Diseño de dispositivo auxiliar de rehabilitación de mano," *Neuroingeniería Biomédica*, 2014.
- [37] F. J. Badesa, R. Morales, N. Garcia-Aracil, J. M. Sabater, C. Perez-Vidal, and E. Fernandez, "Multimodal interfaces to improve therapeutic outcomes in robot-assisted rehabilitation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 42, no. 6, pp. 1152–1158, 2012.
- [38] F. Muri, C. Carbajal, E. Pérez, H. Fernández, A. M. Echenique, and N. López, "Diseño de un sistema de rehabilitación para miembro superior en entorno de realidad virtual," *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 7, no. 14, pp. 81–89, 2013.
- [39] M. Latarjet and A. R. Liard, *Anatomía humana*. Ed. Médica Panamericana, 2006, vol. 2.
- [40] J. D. Lucea, *La enseñanza y aprendizaje de las habilidades y destrezas motrices básicas*. Inde, 1999, vol. 133.
- [41] R. J. Schwarz, "The anatomy and mechanics of the human hand," *Artificial limbs*, vol. 22, 1955.
- [42] K. S. Berger, *Psicología del desarrollo: infancia y adolescencia*. Ed. Médica Panamericana, 2007.
- [43] J. Ashworth-Beaumont and A. Nowicky, "A new method for tracking of motor skill learning through practical application of fitts' law," *Journal of motor behavior*, vol. 45, no. 3, pp. 181–193, 2013.
- [44] G. Alankus, A. Lazar, M. May, and C. Kelleher, "Towards customizable games for stroke rehabilitation," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2010, pp. 2113–2122.
- [45] J. Burke, P. Morrow, M. McNeill, S. McDonough, and D. Charles, "Vision based games for upper-limb stroke rehabilitation," in *Machine Vision and Image Processing Conference, 2008. IMVIP'08. International*. IEEE, 2008, pp. 159–164.
- [46] J. Broeren, A. Bjorkdahl, L. Claesson, D. Goude, A. Lundgren-Nilsson, H. Samuelsson, C. Blomstrand, K. S. Sunnerhagen, and M. Rydmark, "Virtual rehabilitation after stroke." *Studies in health technology and informatics*, vol. 136, p. 77, 2008.
- [47] J. H. Crosbie, M. D. McNeill, J. Burke, and S. McDonough, "Utilising technology for rehabilitation of the upper limb following stroke: the ulster experience," *Physical Therapy Reviews*, vol. 14, no. 5, pp. 336–347, 2009.
- [48] T. Tong and M. Chignell, "Developing a serious game for cognitive assessment: choosing settings and measuring performance," in *Proceedings of the second international symposium of Chinese CHI*. ACM, 2014, pp. 70–79.

- [49] A. J. Silva, O. A. D. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009. CERMA'09*. IEEE, 2009, pp. 193–198.
- [50] A. C. Fyans and G. McAllister, "Creating games with feeling," in *Proc. Int. Conf. on Computer Games: Artificial Intelligence and Mobile Systems, Las Vegas, NV, 2008*, pp. 94–98.
- [51] K. Schwaber, *Agile project management with Scrum*. Microsoft press, 2004.
- [52] M. Poyade, M. Kargas, and V. Portela, "Haptic plug-in for unity, digital design studio, glasgow school of art."
- [53] M. H. Arango, A. Mejía, C. F. Rengifo, D. E. Guzmán, and J. Londoño, "Virtual haptic training compared with a conventional exercise for the improvement of upper limb gross motor skills," in *Virtual Rehabilitation (ICVR), 2017 International Conference on*. IEEE, 2017, pp. 1–7.
- [54] L. Connelly, Y. Jia, M. L. Toro, M. E. Stoykov, R. V. Kenyon, and D. G. Kamper, "A pneumatic glove and immersive virtual reality environment for hand rehabilitative training after stroke," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 551–559, 2010.
- [55] H. C. Fischer, K. Stubblefield, T. Kline, X. Luo, R. V. Kenyon, and D. G. Kamper, "Hand rehabilitation following stroke: a pilot study of assisted finger extension training in a virtual environment," *Topics in stroke rehabilitation*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, 2007.
- [56] S. V. Adamovich, G. G. Fluet, A. Mathai, Q. Qiu, J. Lewis, and A. S. Merians, "Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 6, no. 1, p. 28, 2009.
- [57] G. G. Fluet, A. S. Merians, Q. Qiu, I. Lafond, S. Saleh, V. Ruano, A. R. Delmonico, and S. V. Adamovich, "Robots integrated with virtual reality simulations for customized motor training in a person with upper extremity hemiparesis: a case report," *Journal of neurologic physical therapy: JNPT*, vol. 36, no. 2, p. 79, 2012.
- [58] A. Merians, E. Tunik, G. Fluet, Q. Qiu, and S. Adamovich, "Innovative approaches to the rehabilitation of upper extremity hemiparesis using virtual environments," *Eur J Phys Rehabil Med*, vol. 45, no. 1, pp. 123–133, 2009.
- [59] A. S. Merians, G. G. Fluet, Q. Qiu, S. Saleh, I. Lafond, A. Davidow, and S. V. Adamovich, "Robotically facilitated virtual rehabilitation of arm transport integrated with finger movement in persons with hemiparesis," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 8, no. 1, p. 27, 2011.
- [60] N. N. Byl, G. M. Abrams, E. Pitsch, I. Fedulow, H. Kim, M. Simkins, S. Nagarajan, and J. Rosen, "Chronic stroke survivors achieve comparable outcomes following virtual task specific

- repetitive training guided by a wearable robotic orthosis (ul-exo7) and actual task specific repetitive training guided by a physical therapist,” *Journal of Hand Therapy*, vol. 26, no. 4, pp. 343–352, 2013.
- [61] A. Lioulemes, “An intelligent multimodal upper-limb rehabilitation robotic system,” Ph.D. dissertation, University of Texas, 2017.
- [62] K. Abbruzzese, O. Owoeye, and R. Foulds, “Development of haptic virtual reality system for neurorehabilitation,” in *Northeast Bioengineering Conference*, 2017.
- [63] A. Mancisidor, A. Zubizarreta, I. Cabanes, P. Bengoa, and J. H. Jung, “Kinematical and dynamical modeling of a multipurpose upper limbs rehabilitation robot,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 49, no. Supplement C, pp. 374 – 387, 2018.
- [64] A. Barghout, A. Alamri, M. Eid, and A. El Saddik, “Haptic rehabilitation exercises performance evaluation using fuzzy inference systems,” in *Medical Measurements and Applications, 2008. MeMeA 2008. IEEE International Workshop on*. IEEE, 2008, pp. 13–18.
- [65] M. Iosa, G. Morone, A. Fusco, M. Castagnoli, F. R. Fusco, L. Pratesi, and S. Paolucci, “Leap motion controlled videogame-based therapy for rehabilitation of elderly patients with subacute stroke: a feasibility pilot study,” *Topics in stroke rehabilitation*, vol. 22, no. 4, pp. 306–316, 2015.
- [66] S. Lee, Y.-S. Lee, and J. Kim, “Automated evaluation of upper-limb motor function impairment using fugl-meyer assessment,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2017.
- [67] R. Alshiha and T. Saba, “Effective use of x-box kinect in rehabilitation centers of riyadh,” *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 4, no. 5, 2017.
- [68] M. MARINONI, “Biomechanical analysis measured by the microsoft kinect v2,” Master’s thesis, Politecnico di Milano, 2017.
- [69] M. Demers, D. C. C. Kong, and M. F. Levin, “Acceptability of using a kinect-based virtual reality intervention to remediate arm motor impairments in subacute stroke,” in *Virtual Rehabilitation (ICVR), 2017 International Conference on*. IEEE, 2017, pp. 1–2.
- [70] K. O. Grice, K. A. Vogel, V. Le, A. Mitchell, S. Muniz, and M. A. Vollmer, “Adult norms for a commercially available nine hole peg test for finger dexterity,” *American Journal of Occupational Therapy*, vol. 57, no. 5, pp. 570–573, 2003.