

SISTEMA PARA REHABILITACIÓN DE MOTRICIDAD FINA DE MIEMBRO
SUPERIOR UTILIZANDO JUEGOS SERIOS



Universidad
del Cauca®

Tesis de investigación de Maestría en Automática

ANA LORENA GUERRERO HERNÁNDEZ

Director
PhD Oscar Andrés Vivas Albán

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
MAESTRÍA EN AUTOMÁTICA
POPAYÁN, 2022

Ana Lorena Guerrero Hernández

SISTEMA PARA REHABILITACIÓN DE MOTRICIDAD FINA DE
MIEMBRO SUPERIOR UTILIZANDO JUEGOS SERIOS

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para obtener el título
de

Maestría en Automática

Popayán,
2022

Agradecimientos

A quienes me apoyaron y creyeron en mí: Cecilia, Eliana, Christian Camilo, Charlie, Cristian, Juan Fernando, Euler, Jairo, Santiago, Rubén, Silvia, Juan David.

A mi equipo de trabajo: PhD. Oscar Andrés, PhD. José María.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 INTRODUCCION AL PROYECTO	6
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3 OBJETIVOS.....	10
1.3.4 Objetivo General.....	10
1.3.5 Objetivos Específicos.....	10
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	12
CAPÍTULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA APLICACIÓN.....	23
3.1 DISEÑO DEL SISTEMA.....	25
3.2.1 Unidad de Hardware	25
3.2.2 Unidad de software	28
Capítulo 4. RESULTADOS	35
4.1 Descripción de las pruebas.....	35
4.2 Resultados	37
4.2.1 Resultados Usuarios.....	37
4.2.2 Resultados en Pacientes	40
4.2.3 Análisis de resultados.....	42
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

Tabla de Figuras

Figura 1. Diseño del sistema.....	25
Figura 2. Guante con sus sensores flexibles.....	26
Figura 3. Esquema de conexión de Arduino.	26
Figura 4. Esquema del amplificador operacional del sensor flexible. ..	27
Figura 5. Diagrama de flujo del juego desarrollado.....	29
Figura 6. (a) Menú del juego. (b) Menú selección de juego.	30
Figura 7. Los cuatro juegos de la aplicación.....	30
Figura 9. Usuario interactuando con el nivel de agarre cilíndrico.	32
Figura 10. Usuario interactuando con el nivel de agarre tipo pinza.	33
Figura 11. Usuario interactuando con un piano virtual.....	34
Figura 12. Pruebas del sistema con usuarios.	36
Figura 13. Prueba del sistema con pacientes.....	36
Figura 14. Resultados de tiempo en los juegos con ayuda visual.	37
Figura 15. Resultados de tiempo en los juegos sin ayuda visual.	38
Figura 16. Resultados de puntuación en el juego de piano.	38
Figura 17. Resultados encuesta inicial.	39
Figura 18. Resultados de la prueba de satisfacción.....	39
Figura 19. Encuesta respecto al favoritismo por cada juego.	40
Figura 20. Encuesta respecto a dificultad y frustración en los juegos.	40
Figura 21. Resultado de los juegos en pacientes.	41
Figura 22. Resultados encuesta inicial pacientes.	41
Figura 23. Encuesta favoritismo de cada juego en pacientes.	41
Figura 24. Encuesta dificultad y frustración de los juegos en pacientes.	42
Figura 25. Resultados de la prueba de satisfacción en pacientes.....	42

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCION AL PROYECTO

En este trabajo se diseñó un sistema para pacientes que necesitan rehabilitación de motricidad fina en miembro superior luego de sufrir un accidente cerebrovascular. Se construyó un guante dotado de sensores flexibles y que se comunica con la computadora mediante una tarjeta *Arduino uno* conectada por un puerto USB, permitiendo mover una mano virtual. Esto se lleva a cabo por medio de un juego de realidad virtual diseñado en el software Unity 3D, en este juego hay una interface de registro que puede ser usada por el terapeuta y que a su vez permitirá llevar un control de cada uno de los pacientes. También se desarrolló un entorno virtual en donde se diseñó una mano virtual que simula una mano humana, la cual se moverá en tiempo real siguiendo los movimientos de la mano del usuario.

El sistema contiene 4 juegos, en el primero de ellos el usuario debe intentar agarrar una esfera en 7 diferentes niveles, en el segundo debe agarrar un cilindro en 5 etapas, en el tercero el jugador debe usar su dedo pulgar con cada uno de los otros dedos de la mano con el fin de agarrar un pitillo, los juegos avanzan solo en el momento en el que haya logrado pasar cada etapa. Por último, se encuentra un juego de piano, el cual consiste en tocar la tecla que se solicite acumulando un puntaje dependiendo de los aciertos.

Se realizó una pasantía investigativa en la Universidad Miguel Hernández de Elche, España, donde se logró obtener pruebas con 12 usuarios sanos entre los 22 y 49 años de edad, escogidos al azar entre investigadores, trabajadores y estudiantes. Se obtuvieron datos de los tiempos empleados en cada juego y se realizó una encuesta de percepción de los juegos y de todo el sistema. También fue posible realizar

pruebas con dos pacientes del centro de rehabilitación Terapias de la ciudad de Bogotá y realizar las mismas encuestas.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema desarrollado puede ser utilizado como ayuda para el fisioterapeuta en procesos de rehabilitación de motricidad fina del miembro superior, proporcionando la motivación suficiente para que el paciente pueda contribuir con su actitud a su propio proceso de mejora.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se ha identificado que existen muchas posibles causas que pueden desencadenar una enfermedad cerebrovascular (ECV), tales como hipertensión, tabaquismo, diabetes, inactividad física, obesidad, entre otras. En el momento del accidente cerebrovascular se genera deficiencia de oxígeno en el cerebro, que en ocasiones produce la muerte y en un alto porcentaje de pacientes, una disminución de la fuerza motora o parálisis parcial que afecta el brazo y la pierna de uno de los hemicuerpos, lo cual es conocido como hemiparesia. La afectación del miembro superior incide negativamente en la calidad de vida del enfermo y de sus familiares [1][2][3]

Así como se llevan a cabo programas de prevención con el fin de evitar el crecimiento en el número de personas que padezcan una ECV, la rehabilitación es el método que se prioriza cuando esto ya ha sucedido [4]. Los tratamientos se efectúan para cada región del cuerpo que se encuentre afectada, pero en la que se enfocan más los terapeutas es en la rehabilitación del trastorno de motricidad fina del miembro superior, debido a que permite recuperar la movilidad de los músculos pequeños de las manos, las muñecas y los dedos, cuya pérdida limita el desarrollo de las actividades básicas de coordinación, como agarrar o manipular un objeto [5][6].

La tecnología ha realizado diversos aportes en mecanismos de rehabilitación de todas las partes del cuerpo. Nuevos métodos como la realidad virtual y los juegos serios están empezando a ser investigados con el objeto de hacer terapias menos dolorosas y más divertidas con el fin de motivar a los pacientes a cooperar con su propia recuperación. Estas prácticas adicionalmente pueden proporcionar al terapeuta herramientas para monitorear y realizar seguimiento a las actividades y evolución de los pacientes [7][8].

Dispositivos como robots, prótesis, guantes e interfaces se han adaptado con el fin de poder realizar una rehabilitación de miembro superior. La presente investigación pretende diseñar un juego serio con actividades enfocadas en la rehabilitación de la motricidad fina de la mano de un paciente que haya sufrido una ECV. Los movimientos de la mano serán captados mediante un guante, de esta forma cuando el paciente realice movimientos de su mano, estos serán percibidos por una mano en un entorno virtual, las actividades podrán ser programadas de manera fácil y efectiva por el terapeuta.

Las enfermedades cerebrovasculares (ECV) son las principales causas de muerte y las primeras de daño permanente y discapacidad en todo el mundo, los últimos estudios demuestran que los casos se están incrementando con el paso del tiempo. Las ECV ocurren con mayor frecuencia en ancianos, lo cual impone una pesada carga para la familia y la sociedad, además es la principal causa de necesidad de atención a largo plazo. Esto se debe a que, en un gran porcentaje, los pacientes sufren de pérdida de movilidad en uno de los hemicuerpos [1] [4] [9].

Entre estas pérdidas se resaltan las habilidades motoras finas, las cuales incluyen movimientos pequeños que se producen en las manos, pies, muñecas, dedos, labios y lengua. Si hay pérdida parcial o total de alguna de estas habilidades los pacientes se ven altamente afectados en la realización de actividades de su vida diaria. Sin embargo, la parálisis de la extremidad superior quizás sea la que más limitaciones

produce al no permitir acciones básicas como la escritura, alimentación y vestimenta, que se genera debido a la disminución del control y la coordinación en el agarre entre los dedos índice y pulgar, esto es conocido como pérdida de motricidad fina de mano [4][10].

Las terapias de rehabilitación son de alta prioridad para este tipo de pacientes, al igual que la asesoría permanente por parte de profesionales de fisioterapia y/o terapia ocupacional [11][12]. Para una recuperación satisfactoria, los tratamientos deben prolongarse por largos períodos de tiempo y con una intensidad de varios días a la semana, llevando al afectado a estados de depresión y ansiedad, haciendo que pierda el interés en las terapias hasta el punto de desistir de ellas [13]. Esto lleva a buscar mecanismos que permitan evaluar la evolución del afectado con una disminución en el tiempo de la asistencia presencial al consultorio [14].

Estudios recientes se han enfocado en realizar terapias alternativas, donde los usuarios pueden interactuar con ambientes virtuales mediante diferentes dispositivos. Estos tratamientos están basados en ejercicios con movimientos repetitivos, los cuales son reflejados en tiempo real en la computadora con el fin de lograr mayor efectividad en la rehabilitación y disminución de la reactividad al tratamiento [15].

Dispositivos como *Kinect* o *Leap Motion* son utilizados para realizar rehabilitación mediante juegos de realidad virtual, pero frecuentemente se ven limitados por temas como la precisión en los movimientos que se muestran en pantalla y el cansancio e incomodidad en la extremidad superior del paciente [16].

Algunas investigaciones han sido enfocadas en la utilización de sistemas complejos que utilizan guantes de inmersión en ambientes virtuales para algunos tipos de terapias [17], que generalmente se enfocan en trabajar la fuerza de la mano, pero

pocas lo usan para rehabilitación de motricidad fina en pacientes que han sufrido de un accidente cerebrovascular [15].

Un juego mediante un guante de inmersión virtual puede ser usado en un computador ubicado en la casa del paciente, evitando así su desplazamiento continuo hacia el centro de fisioterapia y disminuyendo la fatiga que esto pueda producir en la persona afectada. Los datos de monitoreo que puede generar el software hacen que el terapeuta pueda revisar el grado de evolución que el tratamiento ha generado, tomar decisiones al respecto y no requieren de la interacción continua con el paciente. Se esperaría que el sistema de rehabilitación basado en juegos motive fuertemente al paciente a continuar con sus terapias. De todo lo anterior surge la pregunta de investigación: ¿Qué características debe tener un sistema para rehabilitación de motricidad fina de mano cuyo proceso de rehabilitación se lleve a cabo mediante juegos serios y guante?

1.3 OBJETIVOS

1.3.4 Objetivo General

Proponer un sistema de rehabilitación de motricidad fina para miembro superior, mediante un guante y un entorno virtual basado en juegos serios para pacientes con enfermedad cerebrovascular.

1.3.5 Objetivos Específicos

- Diseñar una plataforma virtual con una aplicación basada en juegos serios que sirva para la rehabilitación de motricidad fina de la extremidad superior de una persona mediante un guante.

- Validar la capacidad del sistema desarrollado mediante pruebas realizadas en usuarios y en al menos un paciente con enfermedad cerebrovascular.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

El éxito de las terapias tradicionales de un paciente que sufre de una enfermedad cerebrovascular y que tiene afectada la motricidad fina de su mano, radica en la intensidad de las terapias, en su repetición y en un programa de entrenamiento orientado a objetivos, el cual generalmente requiere de mucho personal. Esto podría obstaculizar el logro de las condiciones óptimas de la terapia debido a que no siempre se cuenta con los recursos necesarios, tanto humanos como económicos, más aún en los casos en donde el proceso de rehabilitación dura toda la vida y donde el paciente requiere un lenguaje motivacional enfocado en su estado anímico [18][19][20].

El autor [21] afirma que se ha identificado que la fisioterapia o terapias ocupacionales convencionales en muchos casos no son suficientes para la recuperación de este tipo de pacientes. Quienes están vinculados a estos programas no reciben oportunamente información sobre su desempeño debido a que la recolección de datos de los equipos en los que reciben la terapia la realiza personal del sitio y el procesarlos requiere de tiempo, los pacientes no siempre reciben una motivación adecuada para afrontar cada una de las sesiones y la deserción impide el logro de los objetivos de recuperación.

Se han desarrollado nuevos dispositivos para mejorar el proceso de rehabilitación de mano de un paciente con enfermedad cerebrovascular en relación con su comodidad, participación interactiva, portabilidad, retroalimentación del terapeuta y efectividad. El investigador [15] menciona que al realizar movimientos con un dispositivo en forma de guante se pueden reforzar las condiciones neuronales que tienen que ver con la motricidad fina y que los pacientes prefieren realizar ejercicios de rehabilitación basados en juego desde su casa en lugar de asistir a una clínica de fisioterapia.

Los tres autores precedentes coinciden en que la tendencia para una rehabilitación de miembro superior mejorada debe basarse en nuevas tecnologías que permitan una terapia complementaria en casa y de esta manera bajar el nivel de estrés y mejorar la motivación que sienten los pacientes.

Aunque los guantes para adquisición de datos de la mano en principio fueron utilizados en diseño, manufactura, visualización de información, lenguaje de señas, manipulación industrial y entretenimiento, en los últimos tiempos su aplicación ha crecido considerablemente, ahora son muy usados en robótica y con propósitos médicos tales como, prótesis, inteligencia artificial y rehabilitación [22].

Los guantes de rehabilitación son dispositivos utilizados para mejorar la interacción entre el cuerpo y el medio ambiente, procurando mejorar limitaciones de movilidad en la mano que tienen pacientes de varios tipos de enfermedades. Por lo general contienen una matriz de sensores, un sistema electrónico para controlar la adquisición de datos y poder procesarlos, y una fuente de alimentación [23].

A continuación, se mencionan algunos prototipos, inicialmente guantes para actividades generales, y luego sistemas para propósitos de rehabilitación.

Los exoesqueletos son guantes con una estructura similar a la del esqueleto de la mano humana, los cuales se usan para sostener los músculos, dar estabilidad y retroalimentación al ser humano. El diseño de un exoesqueleto debe ser ligero, compacto y fácil de usar durante largos períodos de tiempo. En [24], el autor afirma que los actuadores neumáticos entregan una sensación de agarre más realista por medio de su propuesta de exoesqueleto, el cual es usado en telepresencia o en realidad virtual. A este modelo no se le implementó un entorno virtual.

Las limitaciones de estos tipos de dispositivos radican principalmente en su costo ya que dependiendo de los grados de libertad que presenten, este se incrementa [25]. Un ejemplo es el dispositivo háptico *Dextrous HandMaster*, el cual es un exoesqueleto destinado al control de precisión de manos robóticas y manos virtuales. Se ajusta a los dedos mediante unas cintas de velcro y tiene un sensor en cada articulación para medir el ángulo entre ellas. No usa señales ópticas ni eléctricas, las articulaciones mecánicas siguen el movimiento de la mano y el movimiento hacia los lados de cada dedo [26].

En [27] se observa un exoesqueleto de mano controlado por electromiografía (EMG), elaborado para pacientes con la mano afectada por accidentes o problemas cerebrovasculares, el sistema recibe, procesa y clasifica las señales electromiográficas del usuario adquiridas por un brazalete MYO, usando un algoritmo de selección de características. El exoesqueleto reproduce el movimiento detectado en la mano opuesta del usuario, es un prototipo de 8 grados de libertad, impreso en 3D, tiene movimiento independiente en los dedos, pero solo se puede usar para movimiento bilateral simétrico, no asimétrico.

Los exoesqueletos, como los que se acaban de mencionar, generalmente no son guantes portables para rehabilitación en casa debido a su complejidad y se enfocan en recuperación de fuerza, lo que difiere con la presente investigación donde se trabaja motricidad fina y su facilidad de terapia en casa.

La marca CyberGlobe System ofrece una variedad de guantes tal como el *CyberGrasp*, el cual agrega realimentación de fuerza resistiva en cada dedo, es liviano, permite al usuario sentir tamaño y forma de objetos en 3D en un entorno virtual simulado. Cada dedo tiene un actuador programable, su uso solamente se presta al unirse con un guante táctil (*CyberGlove*). El guante inalámbrico *CyberGlove II* tiene 22 sensores medidores de ángulos de las articulaciones, los cuales son de alta precisión, flexibles y delgados, casi indetectables, elaborados con

tejido elástico. Trabaja con dos baterías y adaptador USB, tiene la opción de adaptar otros sensores para medición de posición y orientación del antebrazo. La compañía también ofrece el *CyberGlove III* el cual adicionalmente permite comunicación Wifi y tarjeta SD, mayor velocidad de almacenamiento de datos, además sincronización con sistemas de video y dispositivos periféricos. Otro guante es el *CyberTouch II*, que tiene sensores vibrotáctiles en la palma y cada uno de los dedos del modelo *CyberGlove III* anteriormente mencionado, tiene un sistema de programación que permite variar la fuerza de la sensación táctil, el usuario puede sentir pulsos o vibraciones sostenidas o la combinación de estas dos sensaciones. No tiene la opción de usar un dispositivo inalámbrico para su uso, ni tampoco puerto USB para comunicación de datos, para comunicarse con el computador usa una interfaz RS-232 [28].

El *5DT Data Glove Ultra (5DT)* es un guante que busca satisfacer necesidades de profesionales que quieren capturar movimiento y animación, presenta un modo de conexión con cable USB y puerto RS-232, además conexión por bluetooth hasta 20 metros de distancia. Su batería tiene una duración de 8 horas, posee modelos para diestros y zurdos, su material de fabricación es licra elástica, tiene una alta tecnología en su sistema de sensores que podrían ser de 5 a 14, aparte de poseer un sensor para medir la flexión [29].

Power Claw es un guante cuya tecnología estimula la piel del usuario permitiéndole sentir sensaciones de frío, calor, vibración y aspereza en las aplicaciones de realidad virtual, posee tres actuadores en los dedos pulgar, índice y medio y un circuito electrónico generador de impulsos para generar las sensaciones. Es una creación de la empresa mejicana *Vivoxie*, tiene la posibilidad de trabajar con aplicaciones de la empresa y con las creadas por desarrolladores particulares. Sus limitaciones radican en el alto consumo de energía y su costo elevado [30].

El *Peregrin VR Glove* es un guante fácil de usar, hace que el usuario perciba la presencia natural ya que tiene 17 sensores de contacto de punto táctil, tiene un dispositivo desmontable que se ubica en la parte posterior de la mano, el guante se activa con un toque en el dedo. Aunque tiene un alto costo funciona con cualquier aplicación Steam Vr donde se debe configurar ya sea en Unity, Unreal u otro software compatible con OpenXR [31].

MoCap Pro Glove es un guante de la marca StretchSense que posee sensores de estiramiento con aprendizaje automático y seguimiento de dedos, es un sistema centrado en la detección de postura, con ajuste rápido de poses, usado cuando se necesita una captura de movimiento detallada, capturando la curva de los nudillos y el juego de los dedos por separado. El software del guante es *Hand Engine* y transmite datos de la mano a softwares como Unity y otros. El precio de los guantes es elevado al igual que el software el cual tiene licenciamiento anual [32].

Los cinco últimos trabajos mencionados se asemejan en que son guantes comerciales de alto costo, fueron creados para diversos usos, pero enfocados en videojuegos de realidad virtual y, aunque algunos mencionan su aplicación en el ámbito de la medicina, no se encuentran relacionados con un sistema de rehabilitación de mano.

En cuanto a los guantes para rehabilitación se tienen:

Un guante de rehabilitación neumático y blando propone [33], posee diferentes posturas de rehabilitación, sus modos de agarre son asistidas y se compone de cinco redes neumáticas, tiene cámaras de articulación trapezoidales para mejorar la capacidad de flexión y otra cámara triangular para evitar flexión hacia adelante. Permite rehabilitación en posturas de puño completo, recto y de gancho. La ventilación ayuda al estiramiento de los dedos de pacientes con perdida parcial de

la mano, también permite agarrar contornos planos grandes, objetos cilíndricos y a aumentar la fuerza de la punta del dedo.

En [34] se observa un guante protésico para rehabilitación de mano, el cual es operado por un servomotor de medio anillo que se ajusta fácilmente a los dedos. Está fabricado en material PLA mediante impresora 3D, trabaja flexión y extensión de los dedos mediante cuerdas unidas a los servomotores. Su limitación radica en que requiere calibración del motor a la medida de las necesidades de la mano de cada paciente para lo cual se deberían usar sensores resistivos en cada articulación de los dedos. El movimiento de los enlaces está controlado por Arduino y la transmisión de fuerza mediante cables. Se requiere capacitar al paciente para que pueda realizar los ejercicios de fisioterapia en casa.

El autor [35] evidencia un guante tipo exoesqueleto de material blando, el cual es operado mediante un control neumático. Este mecanismo permite capturar el movimiento del dedo robótico que se encuentra adherido al dedo índice, se utiliza para pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular. La interfaz permite ejecutar diversos protocolos de terapia. Los participantes en el estudio tuvieron la limitación de que no pudieron doblar el dedo completamente, pero se obtuvo buena concordancia en las trayectorias trazadas y en general aportes positivos en la rehabilitación de mano.

Un guante de rehabilitación con sensores flexibles para terapia domiciliaria con una interfaz para juegos es presentado por el autor [36], el cual registra los datos y entrega información al terapeuta. El investigador no diseña un juego, sino que utiliza uno de código abierto y realiza algunas modificaciones que requieren la flexión de uno o varios dedos, proporcionando datos de rendimiento y progreso del usuario. La terapia que utiliza es exclusiva para pacientes que requieren rehabilitación usando terapias de flexión y extensión de los dedos.

En [37] se observa un sistema de rehabilitación temprana de mano y un método de entrenamiento de rehabilitación de realidad virtual. Se trata de un guante, un sistema neumático, un protector de muñeca (con sensor de pulso, temperatura y tensión), una cuerda de tensión y un casco de realidad virtual. Es un sistema que no requiere de energía externa, posee un detector de movimiento desmontable, un sensor de aceleración, un sensor giroscópico y una línea de datos para conectar la unidad de control, la cual incluye un módulo de CPU de comunicación de voz, de almacenamiento, de fuente de alimentación y de visualización. El sistema está diseñado para personas con movimiento normal del brazo, pero con trastorno del movimiento de la mano. El trabajo que realiza el paciente es de agarre manual mediante actividades cotidianas, puede usarse con casco o gafas de realidad virtual en juegos. Diseñado para pacientes con lesión o cirugía de mano.

La investigación del autor [38] muestra un dispositivo de visualización de realidad virtual para usar en la cabeza del paciente, una empuñadura háptica para que el usuario tenga control de la realidad virtual, un guante háptico para transmitir diferentes niveles de vibración con respecto a varios movimientos y un bloque inteligente para que el usuario conozca cuanta potencia aplica con el guante. Posee además un programa de prevención de demencia con diferentes tipos de terapias. El sistema está diseñado para ancianos con demencia leve y realiza un tratamiento de rehabilitación cognitiva mediante un método de realidad virtual, el paciente puede conocer la precisión al realizar una operación y mejorar la tasa de rehabilitación cognitiva.

Un conjunto de dispositivos de guantes inteligentes es desarrollado por el autor [39], tienen la capacidad para producir presión y recolectar información de la posición del miembro superior. Los guantes poseen realimentación vibro táctil y realizan entrenamiento de la mano con la combinación de escenas virtuales para aportar en la rehabilitación de pacientes con ictus. El método utilizado es el agarre, la transmisión se realiza mediante cable de transmisión de datos y la conexión con

el PC mediante Bluetooth y cable USB. Posee un motor para realizar la vibración, un módulo de presión de aire mediante airbag y un casco de realidad virtual para realizar entrenamiento basado en tareas, aunque no en juegos.

Los 7 autores precedentes muestran sistemas de rehabilitación que incluyen un guante para diferentes trastornos de la mano, pero solo [37] y [39] aplican una de las terapias para recuperación de motricidad fina y ninguno de ellos diseña un juego para este fin.

Los juegos serios son una aplicación exitosa de la realidad aumentada, están destinados a educar, planear, ayudar en la toma de decisiones, y permitir la recuperación de enfermedades y discapacidades de personas enfermas y mayores, mediante actividades interactivas y divertidas [40].

En [41] se observa un juego desarrollado en Unity, el cual utilizando el dispositivo *Kinect*, busca ayudar a disminuir el uso de medicamentos y mejorar el estilo de vida y la funcionalidad de movimientos y del habla de pacientes con Párkinson, permitiendo controlar diversos parámetros por parte de personal médico. Aunque puede ser usado solo por el paciente, el autor recomienda el acompañamiento de un terapeuta.

La gamificación se define como el uso de elementos del diseño de videojuegos en contextos no lúdicos, se han empleado técnicas que brinda la gamificación en la motivación que se puede generar en los pacientes [42].

El autor [43] construye un sistema de rehabilitación inteligente, que consta de una plataforma con un jugador de *exergame* y una herramienta de diseño que analiza las interacciones del usuario y su historial, con el fin de seleccionarle nuevos ejercicios gamificados basados en gestos. Este es un sistema de recomendación que proporciona un juego personalizado con su historia y preferencias, utiliza el

dispositivo *Kinect* para reconocer gestos mediante el rastreo del rostro del usuario. La plataforma usada se llama *TANGO-H* y el investigador creó un módulo inteligente para ella donde es posible realizar un monitoreo del progreso del usuario. Tiene utilidad en pacientes con parálisis facial.

Un juego serio para la rehabilitación supervisada de la extremidad superior afectada por esclerosis múltiple es presentado en [44]. El autor utiliza el dispositivo *Kinect* y junto con los juegos virtuales *9 Hole Peg test* y *Box and Bloc test*, realiza un estudio de la eficiencia del uso de juegos y la recuperación de su extremidad superior, observándose mejoría en los pacientes en el brazo afectado, en el brazo no tratado y en su salud mental. El autor no desarrolla dispositivos ni juegos, se limita al estudio de los ya existentes.

De acuerdo con los estudios con el dispositivo infrarrojo *Kinect* mencionados en los párrafos anteriores, su uso ha realizado grandes aportes en rehabilitación de diferentes tipos de traumas. Uno de ellos es el diseño exclusivo para juegos de realidad virtual pero presenta limitaciones en el reconocimiento de movimientos, lo que no lo hace tan preciso [45].

Un sistema para rehabilitación de brazo, de bajo costo y de un grado de libertad muestra el autor [46], con componentes de software y hardware, contiene un juego con diferentes niveles de dificultad, se puede usar en terapias de rehabilitación en el hogar y tratamientos remotos. Está enfocado en la flexión y extensión del antebrazo, incluye movimientos de hombro, contiene un motor cc, extrae información de la fuerza del usuario, donde debe estar sujeto a un marco estable. El juego se puede adaptar a diferentes plataformas como Android y trae parámetros configurables de acuerdo a la necesidad del paciente.

El autor [47] propone usar la tecnología de computación en la nube con ejercicios en tiempo real enfocados en rehabilitación de pacientes que han sufrido un

accidente cerebrovascular. Está integrado con juegos serios basados en realidad aumentada y adiciona el desarrollo de guantes sensoriales para recoger los gestos de las manos, los cuales detectan el estado en tiempo real de un paciente al realizar ejercicios de rehabilitación. Permite que el paciente, el médico y el terapeuta puedan compartir datos en tiempo real. El estudio da como resultado mejoras significativas en la fuerza de los dedos después de seis semanas de uso de este mecanismo, pero el autor afirma que el sistema produce una enorme cantidad de datos multisensoriales los cuales necesitarían una técnica de *Deep Learning* para ser evaluados.

El autor [17] muestra un sistema de entrenamiento de rehabilitación manual basado en tecnología de realidad virtual que consta de un dispositivo de adquisición de datos con 5 sensores curvos conectados a cada dedo y un circuito integrado conectado a la parte posterior de la mano. Aquí se registran los datos de flexión de los dedos, la posición de la mano y el estado del movimiento, el dispositivo también tiene un sistema de procesamiento de datos que comprueban si el usuario está jugando o suspendiendo el juego, y un sistema de interacción humano ordenador de realidad virtual. El sistema tiene varios módulos entre los que se encuentra el juego y un módulo de comentarios para guía del usuario. Un piano virtual es utilizado como juego.

El *Leap Motion* es un dispositivo óptico que transfiere al ordenador la información en 3D de posición y movimiento de codo, muñeca y falanges de la mano, tiene un variado catálogo de juegos a su disposición. Basado en él, la investigación presentada en [48] implementa un juego para rehabilitación compuesto por tres melodías que el paciente debe tocar con el fin de evaluar su desempeño en la identificación de la flexión de los dedos en un ambiente con alta iluminación y en otro sin iluminación, mediante el cálculo de la sensibilidad, la especificidad y la precisión para comparar su efectividad en los dos entornos. Pero la velocidad no

está ajustada a la fuerza del usuario y ante la flexión de los dedos en un momento incorrecto, el juego reproduce un sonido que podría distraer al usuario.

Una modificación del juego *Fruit Ninja* realiza el autor [49], lo hace utilizando el *Leap Motion* para obtener los datos de seguimiento de la mano. El investigador toma 14 pacientes con derrame cerebral y debilidad del brazo, para probar la efectividad del impacto del juego en la recuperación de la motricidad fina. Los resultados fueron positivos comparados con una terapia convencional, sin embargo, se debe trabajar más en la precisión y la recepción.

En la Universidad del Cauca fue implementado un sistema de rehabilitación de motricidad fina usando un videojuego serio en el año 2018 [16]. La autora muestra dos sistemas, uno basado en movimientos repetitivos de la mano y otro utilizando juegos serios, donde los movimientos que realiza el paciente / usuario se captan a partir del dispositivo *Leap motion*. En la plataforma interactiva se pueden realizar diversas tareas de la vida diaria que incluyen ejercicios de agarre y lanzamiento de objetos. La autora concluye que el manejo del *Leap motion* es difícil para el 70% de las personas encuestadas, mostrando cansancio e incomodidad en la extremidad superior. Además, se observaron ciertos errores en cuanto a la precisión de los movimientos. Sin embargo, también es cierto que el juego donde estaba inmerso el usuario / paciente los motivó mucho a realizar las rutinas programadas.

Los estudios [48] [49] y [16] enfocados en *Leap Motion* coinciden en que presenta buenos resultados en la recuperación de los paciente, pero que existe una falta de precisión en los movimientos en el proceso del desarrollo del juego, a diferencia de [47] y [17], cuyos autores muestran dispositivos adaptados a la mano tipo guantes, donde se observa mayor precisión y comodidad para el usuario, aunque con cierta complejidad en su diseño.

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA APLICACIÓN

Rehabilitación de motricidad fina

El movimiento de los músculos pequeños de las extremidades superiores, tales como las manos y los dedos y su relación con los ojos, es a lo que llamamos motricidad fina. Esa destreza y precisión con la cual se sujeta, se manipula, se agarra, se alcanza, se carga o se suelta voluntariamente un objeto, la desarrolla el ser humano de una manera natural [50].

La rehabilitación de motricidad fina para pacientes afectados en la movilidad de una de sus extremidades superiores debido a un accidente cerebrovascular consiste en ejercicios de fisioterapia y terapia ocupacional. El paciente puede realizar terapias de rehabilitación durante años, aunque los ejercicios de motricidad fina se realizan desde el inicio del accidente, la complejidad del tratamiento cambia de acuerdo al grado de evolución del paciente [51].

De acuerdo con Brunnstrom [52], Las etapas por las cuales pasa un paciente después de un ICTUS son :

- Flacidez o parálisis flácida, donde el afectado no tiene control sobre su cuerpo.
- Aparición de la espasticidad, hay movimientos pero no están bajo control.
- Aumento de la espasticidad.
- Disminución de la espasticidad, aquí se disminuye la rigidez y mejora el control voluntario.
- Vuelven los movimientos complejos, aumenta el control muscular, disminuyen los movimientos espasmódicos.
- Desaparición de la espasticidad.
- Vuelven las funciones normales.

La frustración más grande que tienen los pacientes en cualquiera de estas etapas es la dificultad para agarrar objetos y no poder realizar las actividades de su rutina diaria. Son entonces prioritarias las terapias de rehabilitación de miembro superior junto a los ejercicios para agarrar diferentes objetos [52].

Iberall Cutkosky [53], estudia los agarres de la mano y realiza una clasificación de la siguiente manera:

1. Agarres de precisión que se enfatizan en la habilidad y sensibilidad de la mano, los cuales pueden ser:

- Agarre circular, el cual incluye agarre de disco, esfera y de bola con la yema de los dedos.
- Agarre prismático, el cual consiste en agarrar un cilindro muy delgado con el pulgar y uno o más dedos.

2. Agarres de potencia los cuales hacen énfasis en la seguridad y estabilidad de la mano y los cataloga como:

- No aprehensibles, en el cual no se requiere agarrar, solo sostener palma arriba.
- Aprehensibles, los cuales los cataloga a su vez como:
 - Prismáticos que pueden ser: Agarrar un cilindro con peso palma abajo ya sea cilindro grueso o delgado; y agarrar un cilindro vertical con la palma de la mano ya sea grueso o como un pitillo.
 - Circular, en los cuales la mano puede agarrar una esfera o un disco con la palma de la mano.

Con el fin desarrollar un sistema en el cual se pueda llevar a cabo este tipo de movimientos y ser aplicados en un tratamiento post espasticidad, se construyó el sistema propuesto en el presente documento, el cual se compone de una unidad de

hardware como lo es el guante de rehabilitación y una unidad de software como lo es un juego serio. Su construcción se describe a continuación.

3.1 DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema (ver Figura 1), se compone de un hardware que comprende un guante con sensores flexibles en cada dedo de la mano y gobernados por un procesador (*Arduino Uno*). La alimentación eléctrica de estos dos componentes es suministrada por el computador. De otra parte, el software está compuesto por un algoritmo de reconocimiento del hardware, un algoritmo de juego serio para rehabilitación y un software de animación.

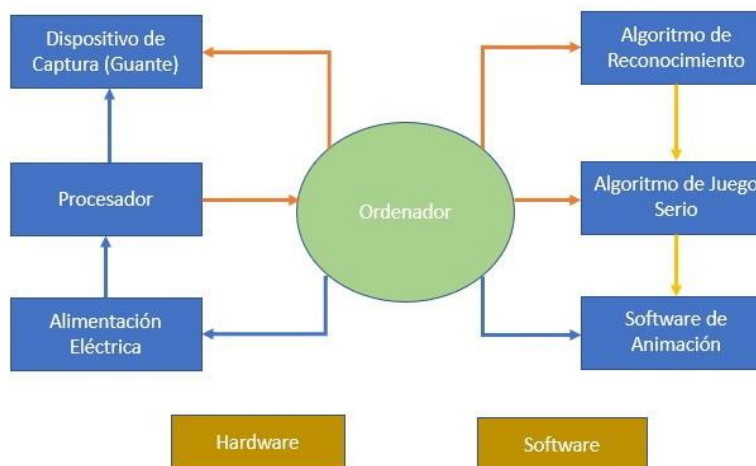


Figura 1. Diseño del sistema.

3.2.1 Unidad de Hardware

El guante de rehabilitación está fabricado en material de tela elástica y cuenta en la parte superior de cada dedo con un sensor flexible. Cada uno de estos sensores se conectan por medio de un cable de cobre a una tarjeta *Arduino Uno* previamente configurada, la cual mediante un puerto serial realiza la conexión al computador. La información se envía al motor gráfico Unity 3D en una matriz de datos. La alimentación del guante es de 5 voltios, proporcionados por el computador (Figura 2).

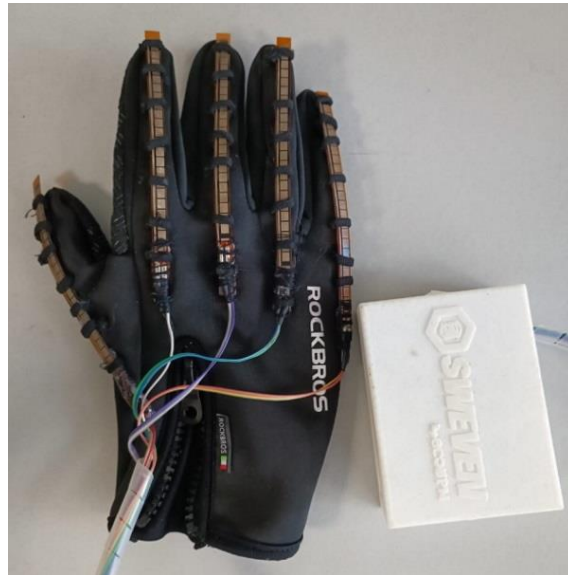


Figura 2. Guante con sus sensores flexibles.

El esquema de conexión de los sensores flexibles al Arduino es el que se muestra en la Figura 3.

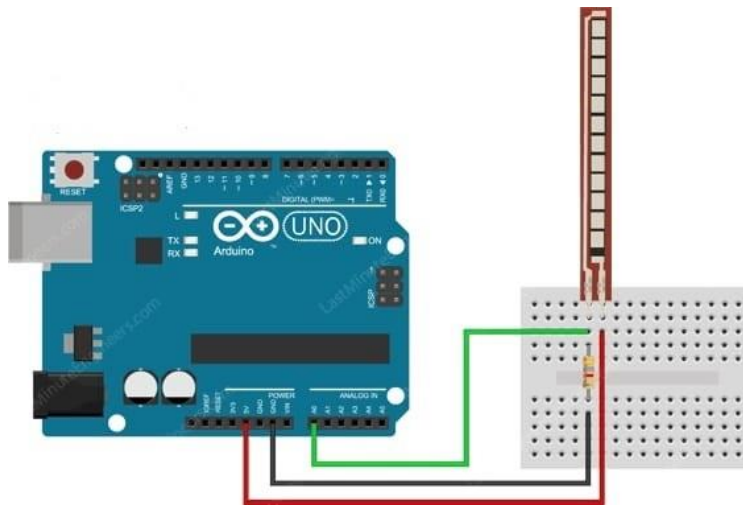


Figura 3. Esquema de conexión de Arduino.
Fuente: Tomado de [54].

Los sensores flexibles se doblan y flexionan junto con los movimientos de cada uno de los dedos. Tienen una resistencia de 25K Ohmios, el rango de resistencia a la flexión es de 45K a 125K Ohmios dependiendo del radio de curvatura, su potencia

nominal son 0,5 vatios y 1 vatio tope. Sus medidas son 6,35mm de ancho y 114 mm de largo. El circuito básico de un sensor flexible consta de un amplificador operacional, el cual es usado debido a su baja corriente de polarización. De esta forma se reduce el error gracias a la impedancia de la fuente del sensor flexible como un divisor de voltaje, tal como se muestra en la Figura 4 y la Ecuación (1).

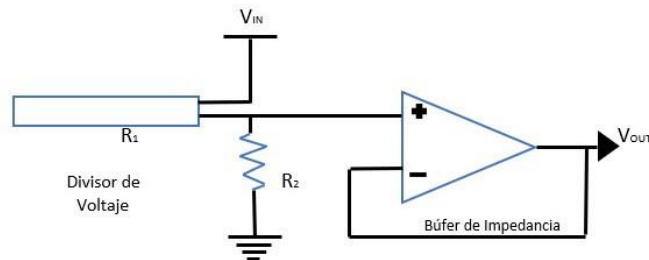


Figura 4. Esquema del amplificador operacional del sensor flexible.
Fuente: Tomado de [55].

Donde

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) . \text{ Ecuación (1)}$$

El presente trabajo utiliza una esfera y un cilindro para trabajar el agarre circular y palmar con el fin de trabajar tanto agarre de precisión como de potencia, deseando mejorar la habilidad, sensibilidad, seguridad y estabilidad de la mano. También se diseñó un pitillo para trabajar el agarre prismático de precisión y adicionalmente un juego en el cual se trabaja movimientos coordinados de dedos.

Juegos Serios

Existen diferentes tipos de juegos, el tipo en el cual se catalogue depende del enfoque que se le da al juego. Se llama serio a un juego cuyo objetivo sea realizar un

trabajo serio en lugar de entretenimiento, hoy en día hay múltiples aplicaciones tales como aprendizajes en educación, ingeniería, atención médica, en física e historia, incluso pueden remediar problemas de salud mental, más aún después de la pandemia del COVID 19 la cual desencadenó problemas de orden psicológico [56].

3.2.2 Unidad de software

El software Unity 3D es una plataforma utilizada para la creación de entornos virtuales avanzados, simplifica el desarrollo de procesos de juegos, es compatible con varios dispositivos y software de terceros mediante una serie de rutinas de programación que permiten el diseño, la creación y el funcionamiento de un entorno interactivo. Unity posee un motor gráfico para renderización de gráficos 2D y 3D, permite realizar animaciones, sonidos, simular leyes físicas, programar y soporta completamente la personalización de juegos serios diseñados como ejercicios de rehabilitación [57], [58].

La unidad de software se compone de tres elementos esenciales para su funcionamiento, tal como se puede observar en las secciones siguientes.

3.2.2.1 Algoritmo de reconocimiento

Se configuró un código en *Arduino* con el objetivo de poder enviar la información de los flexómetros al puerto *com* del computador. El puerto lee un código, el cual tiene una línea de texto con información de cada dedo, posteriormente Unity lee la información que llega por el puerto *com*, toma esos valores y los coloca en un vector, para de esta manera obtener el valor de cada flexómetro. Para combinar los datos recibidos por Arduino con la animación, se obtiene un promedio y con esta información se produce el movimiento de los dedos virtuales.

3.2.2.2 Algoritmo de juego serio

El diagrama de flujo del juego completo se encuentra representado en la Figura 5.

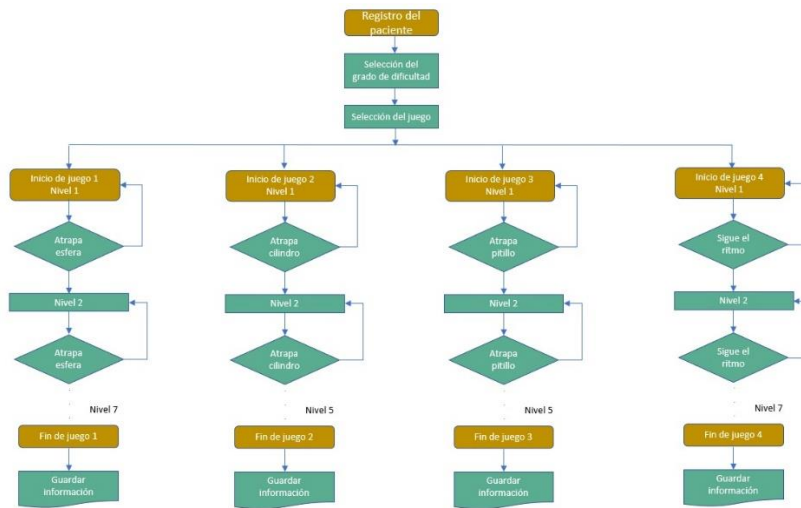


Figura 5. Diagrama de flujo del juego desarrollado.

3.2.2.3 Juego

Para dar inicio al juego desarrollado en Unity 3D, es necesario ingresar los datos del usuario, tales como nombre, edad, sexo, identificación y correo electrónico. Adicionalmente, se selecciona el puerto de conexión y el nivel en el que se encuentra el usuario, con las opciones de fácil, intermedio y difícil, esto se realiza en el menú inicial (ver Figura 6 (a)). Luego se pincha el botón comenzar, el cual lleva a una pantalla en la que se puede seleccionar uno de los 4 juegos, donde también es posible ingresar a la opción de registrar un nuevo usuario y guardar los puntajes obtenidos en un archivo de Excel.



Figura 6. (a) Menú del juego. (b) Menú selección de juego.

Los juegos desarrollados son: agarre de esfera, agarre de cilindro, pinzas a un dedo y piano. Un pantallazo de cada uno de ellos se muestra en la Figura 7.

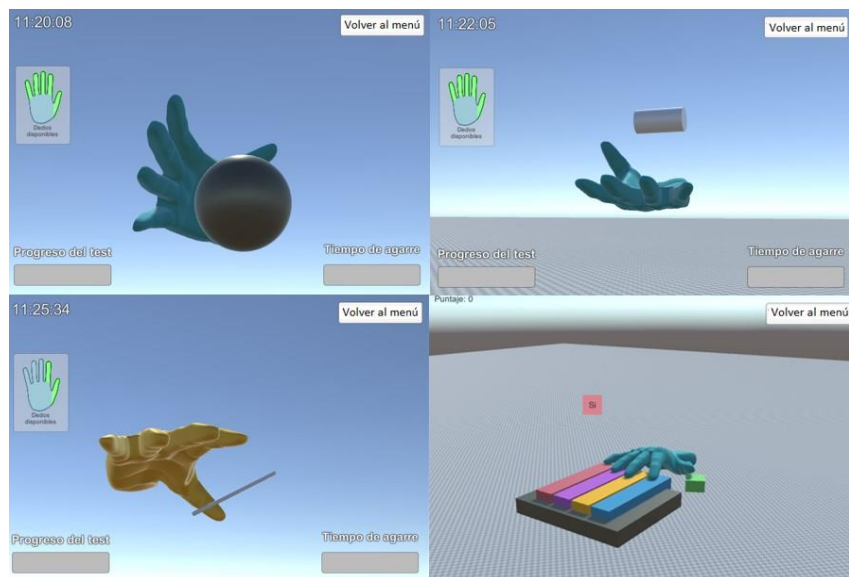


Figura 7. Los cuatro juegos de la aplicación.

Durante el desarrollo de cada juego se presentan íconos de ayuda visual al momento de tomar cada objeto, así como una indicación de los dedos que debe utilizar el usuario para cumplir con la prueba.

A continuación, se definen cada uno de los juegos, los cuales fueron probados con 12 participantes sanos:

Agarre de esfera: Al seleccionar este botón se presenta la opción de Iniciar Test. Este juego a su vez tiene 7 opciones, en cada una de ellas sale la pelota con un movimiento diferente para que el usuario la agarre, al soltarla pasa al siguiente juego hasta completar los 7 juegos. Si no se logra atrapar la bola, el movimiento se repetirá hasta que lo haga, guardando el tiempo que tardó el jugador en completar todos los niveles. En la Figura 8 se observa al usuario interactuando con este nivel.



Figura 8. Usuario interactuando con el nivel de agarre de esfera.

Agarre de cilindro: En este caso el usuario deberá agarrar un cilindro, el cual saldrá de 5 posiciones diferentes, cada una de las cuales representa un nivel diferente (Figura 9). El cilindro deberá ser sujetado oportunamente hasta completar los 5 niveles.

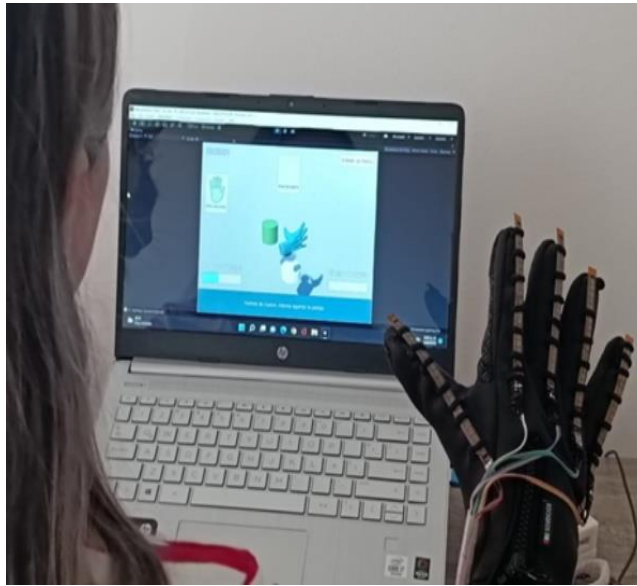


Figura 9. Usuario interactuando con el nivel de agarre cilíndrico.

El sistema de medición de los dos juegos precedentes es el tiempo empleado en terminar cada uno de ellos. La terapia consiste en que con las repeticiones realizadas el tiempo sea cada vez más corto, siendo este mecanismo el que usará el terapeuta para estimar los avances del paciente.

Pinza a un dedo: En este juego aparece un pitillo, el cual debe ser agarrado primero con los dedos pulgar e índice, luego con los dedos pulgar y medio, posteriormente con el pulgar y anular, y finaliza con el agarre del pitillo con los dedos pulgar y meñique. El juego finaliza cuando el usuario ha sido capaz de agarrar el pitillo con el pulgar y cada uno de los otros cuatro dedos. Al final se guarda el tiempo empleado en terminar completamente el ejercicio (Figura 10).

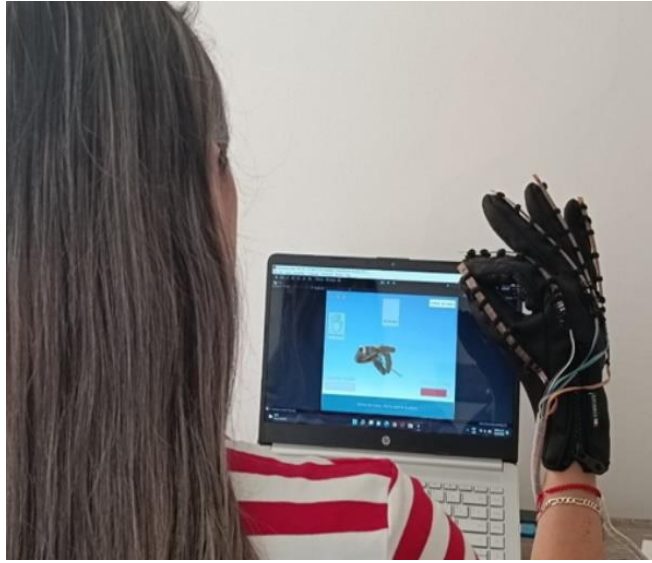


Figura 10. Usuario interactuando con el nivel de agarre tipo pinza.

En los tres juegos precedentes la barra llamada “Tiempo de agarre” indica que la mano se encuentra cerrada durante ese lapso; la imagen “Zona de agarre” muestra el momento en el cual el usuario debe agarrar el objeto en movimiento; la imagen “Dedos disponibles” señala cuáles dedos se deben usar para cumplir satisfactoriamente con el nivel; la barra “Progreso del test” indica cuánto falta para terminar el juego. Si el jugador no logra agarrar el objeto en movimiento acumulará mayor cantidad de segundos, la puntuación será mejor entre menor sea el tiempo de agarre, tratando de identificar cuánto tarda un paciente en abrir la mano y su agilidad de movimiento, ya que entre más intentos debe hacer más tiempo empleará. Con el transcurso de las sesiones de terapia se pretende que estos tiempos vayan disminuyendo.

Juego con piano: Se diseñó además un piano con las notas musicales do-re-mi-fa-sol, cada tecla está asignada a un dedo. El juego consiste en seguir la nota indicada aleatoriamente, obteniéndose un puntaje al lograrse repetir correctamente la melodía indicada, mientras que en caso de error disminuye la puntuación (Figura 11).

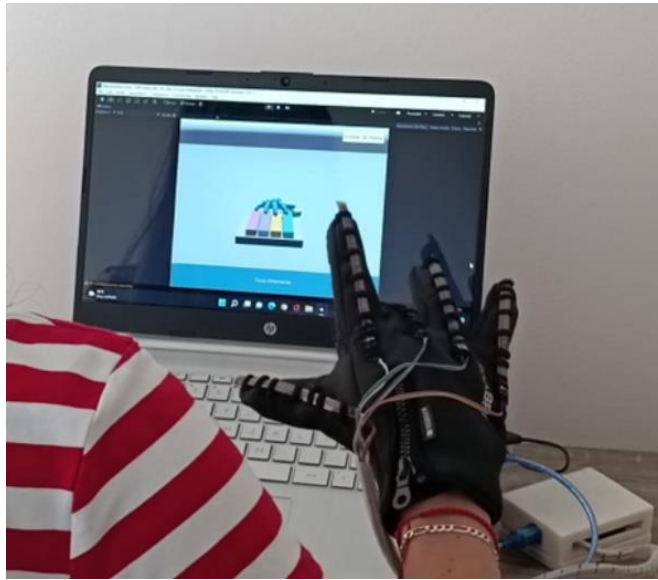


Figura 11. Usuario interactuando con un piano virtual.

La aplicación permite guardar parcial o totalmente la información registrada, tanto los datos del participante como los puntajes obtenidos. En los juegos de esfera, cilindro y pitillo, se obtiene la medición del tiempo empleado en terminar cada juego, de tal manera que se pueda llevar un control. Con este tiempo el terapeuta podrá evaluar el grado de avance que va teniendo el paciente en el transcurso de las terapias mediante la comparación de los resultados nuevos y anteriores; se pretende que cada vez los tiempos sean más reducidos.

En el juego del piano el terapeuta puede obtener el grado de avance en la rehabilitación del paciente mediante el incremento o disminución del puntaje obtenido, de acuerdo con los aciertos en tocar la nota musical solicitada por la aplicación; si el puntaje aumenta entre una terapia y otra se puede notar mayor recuperación.

Capítulo 4. RESULTADOS

4.1 Descripción de las pruebas

Se realizaron las pruebas del sistema de rehabilitación de motricidad fina con la ayuda de 12 usuarios sanos entre los 22 y los 49 años, de los cuales la mitad de sexo masculino y la otra mitad de sexo femenino. Estas pruebas se realizaron en el centro de investigación de bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández en la ciudad de Elche – España. La muestra incluyó investigadores y trabajadores del centro de investigación, el criterio para escoger los participantes fue el azar, se realizaron 2 sesiones con cada jugador con una duración aproximada de 15 minutos cada una.

Para la realización de la prueba los usuarios tuvieron que ingresar sus datos básicos en la plataforma. Posteriormente seleccionaron el juego, se colocaron el guante de rehabilitación e iniciaron el test, interactuando con cada uno de los juegos de principio a fin hasta completar los 4 juegos. Esta misma prueba se realizó inicialmente con el ícono visual de ayuda al momento de agarrar el objeto y posteriormente sin este ícono de ayuda (Figura 12).

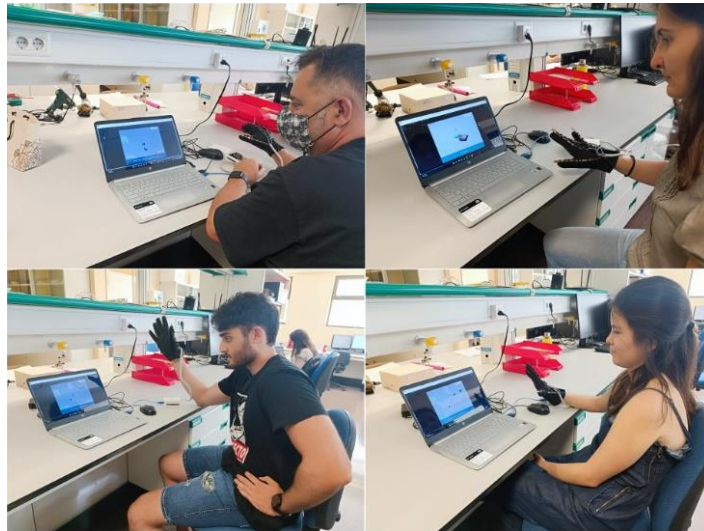


Figura 12. Pruebas del sistema con usuarios.

Adicionalmente se realizaron pruebas con dos pacientes en proceso de rehabilitación de mano, uno de ellos debido a una lesión de fractura y el otro a un accidente cerebrovascular, sus edades se encuentran entre los 49 y 58 años, los dos de sexo masculino. Las pruebas se realizaron en el centro de rehabilitación integral Terapias Bogotá, se realizó una sesión en cada uno de los pacientes con una duración aproximada de 20 minutos (Figura 13).

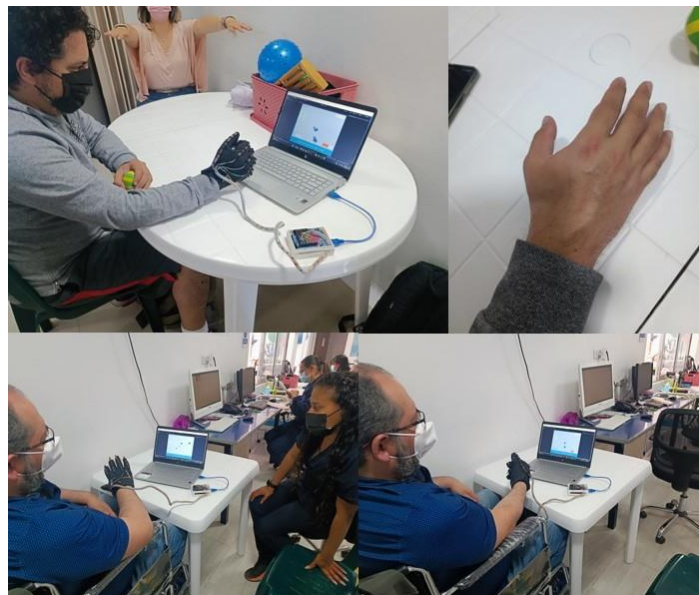


Figura 13. Prueba del sistema con pacientes.

El tiempo empleado en terminar cada uno de los juegos de agarre de esfera, agarre de cilindro y agarre de pinza a un dedo, así como el puntaje obtenido en la prueba del piano, fueron guardados al finalizar la prueba con cada participante.

4.2 Resultados

4.2.1 Resultados Usuarios

Los resultados en cuanto a los tiempos (en segundos) que tardaron los usuarios en realizar la prueba para los juegos de agarre de esfera, agarre de cilindro y agarre de pinza, con ayuda visual al momento de agarrar el objeto, se ven reflejados en la figura 14 y sin ayuda visual en la figura 15. Los resultados de la puntuación obtenida por los usuarios en la prueba de piano se pueden ver en la figura 16.



Figura 14. Resultados de tiempo en los juegos con ayuda visual.



Figura 15. Resultados de tiempo en los juegos sin ayuda visual.



Figura 16. Resultados de puntuación en el juego de piano.

Al finalizar la prueba cada usuario diligenció una encuesta, la cual consta de 3 secciones. La primera de ellas consta de preguntas de información personal y general (Figura 17); la segunda contiene 8 preguntas de satisfacción general sobre la aplicación (Figura 18), test diseñado utilizando el método de SAM [59]. La tercera sección contiene 8 preguntas donde se evalúa el favoritismo de los juegos en cuanto a comodidad, facilidad y motivación, entre otros (Figura 19).

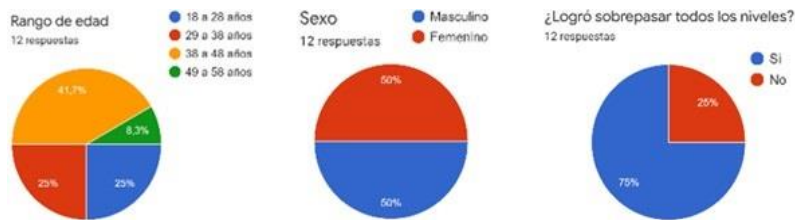


Figura 17. Resultados encuesta inicial.

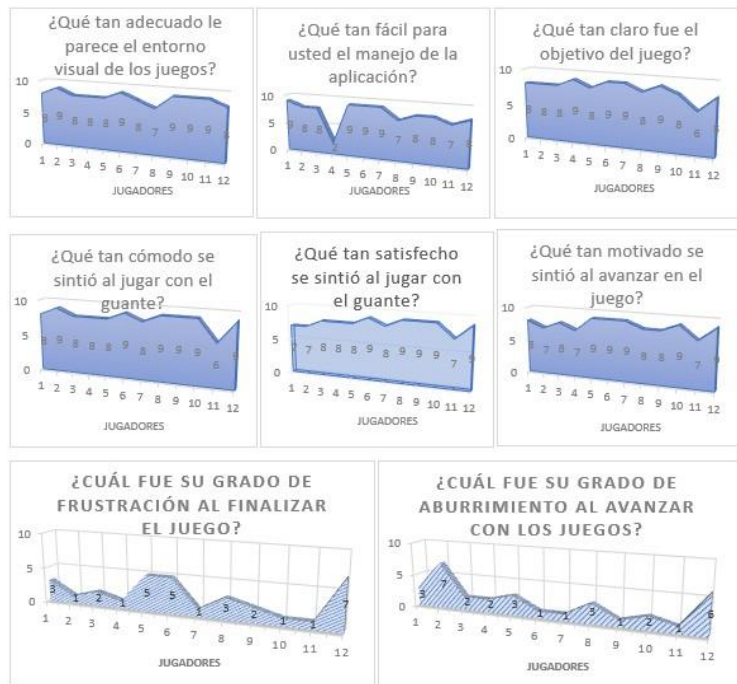


Figura 18. Resultados de la prueba de satisfacción (calificado de 0 a 9, de menor a mayor).



Figura 19. Encuesta respecto al favoritismo por cada juego.

De otra parte, la Figura 20 muestra la preferencia negativa de cada juego: dificultad y grado de frustración.



Figura 20. Encuesta respecto a dificultad y frustración en los juegos.

4.2.2 Resultados en Pacientes

Los resultados de los tiempos empleados por los pacientes en realizar los juegos de esfera, cilindro y pitillo se muestran en la Figura 21.

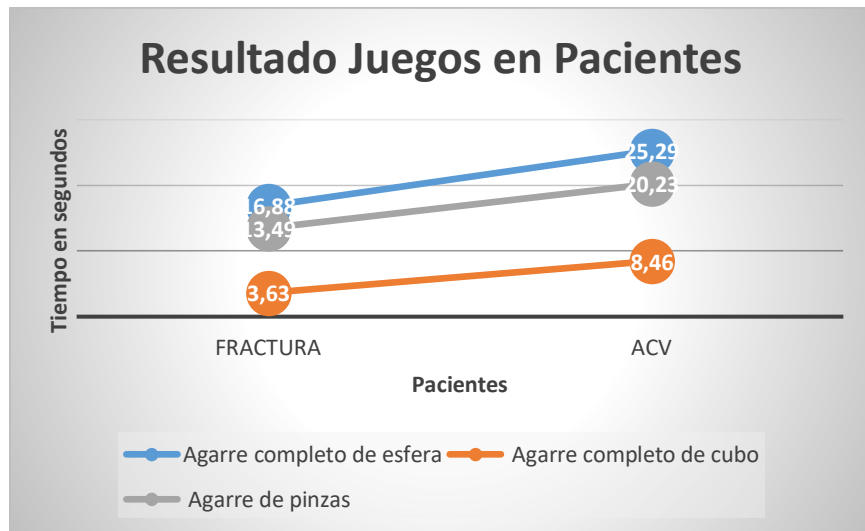


Figura 21. Resultado de los juegos en pacientes.

Se practica la misma encuesta realizada con usuarios y se obtiene la información que se ve en la Figura 22.

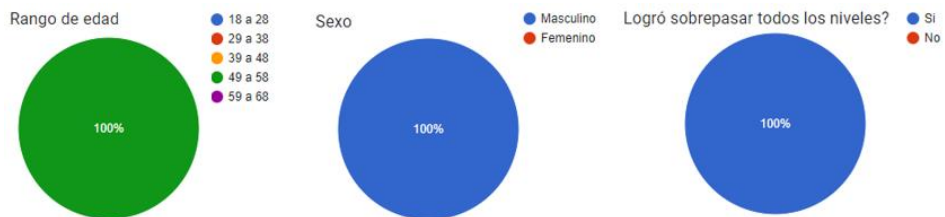


Figura 22. Resultados encuesta inicial pacientes.

Los juegos preferidos por los pacientes se pueden ver en las Figuras 23 y 24.



Figura 23. Encuesta favoritismo de cada juego en pacientes.



Figura 24. Encuesta dificultad y frustración de los juegos en pacientes.

Las respuestas promedio del grado de satisfacción que mostraron los pacientes con respecto a su percepción de la aplicación se pueden ver en la figura 25.



Figura 25. Resultados de la prueba de satisfacción en pacientes.

4.2.3 Análisis de resultados

Analizando los resultados obtenidos en usuarios y en pacientes, se infiere que el sistema de rehabilitación fue agradable visualmente, los usuarios y pacientes se sintieron cómodos al interactuar con él, les produjo satisfacción y motivación para continuar jugando, y la mayoría lo percibió como un sistema fácil de utilizar. Sin embargo, un pequeño porcentaje de usuarios sintió un grado medio de frustración y aunque el mayor porcentaje no sintió aburrimiento, si hubo participantes que lo percibieron en mediana escala. La encuesta denota predilección por el juego del

agarre esférico en cuanto a facilidad para jugarlo, entorno visual y motivación. Como segundo juego preferido fue catalogado el del piano, pero el de agarre de pinza a un dedo (juego del pitillo) y el de agarre de cilindro, resultaron más difíciles y con mayor grado de frustración para los jugadores. Se nota una diferencia en cuanto a la percepción que tuvieron los pacientes ya que para ellos el juego de pitillo es el único que catalogan con cierto grado de negatividad.

En conversación con los pacientes afirmaron tener dificultad para el trabajo de agarre de pinza, pero consideran que es derivado de la condición física de su mano. Sin embargo, tanto ellos como los terapeutas notaron muy útil el sistema ya que consideran que el paciente no se enfoca tanto en su dolor, como sucede cuando practican ejercicios de terapia habituales, sino que focalizan su atención en la evolución del juego y en pasar los diferentes niveles.

Se aprecia que el paciente con diagnóstico de accidente cerebrovascular presenta mayor tiempo en la finalización del juego, comparado con el paciente diagnosticado con fractura, pero se evidencia que es de utilidad para enfermos con diferentes dificultades en el movimiento de su mano que requieran terapia física. Los terapeutas del centro de rehabilitación consideran que tendría un enfoque positivo en pacientes que necesiten trabajar su atención, concentración, coordinación visomotora y desarrollo cognitivo en todas las edades, sobrepasando las expectativas iniciales del proyecto.

En la interacción con los juegos los usuarios y pacientes tuvieron que ejercitar su mano en agarre esférico, cilíndrico y de pinza y realizar un esfuerzo para mantenerla abierta. También tuvieron la oportunidad de mover cada uno de sus dedos una y otra vez con el juego del piano, cumpliendo con el objetivo principal del sistema, el cual es motivar al usuario a realizar movimientos en pro de una pronta recuperación en caso de lesión.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El presente documento mostró la implementación de una plataforma de ayuda en la rehabilitación de motricidad fina de miembro superior. Se construyó un guante provisto de sensores flexibles, lo cual permitió mover una mano virtual en respuesta a los movimientos de la mano real. La aplicación software fue realizada en Unity 3D, donde se diseñaron cuatro juegos, los cuales permiten desarrollar diversos agarres: esférico, cilíndrico, de pinza y de movimiento general de todos los dedos. La aplicación toma los datos del tiempo que toma el usuario en realizar cada juego, lo cual permitiría al terapeuta percibir la evolución del paciente en el transcurso de su proceso de rehabilitación.

La aplicación fue probada con 12 usuarios, entre los 22 y los 48 años y dos pacientes entre los 49 y 58 años. Se obtuvieron datos de los tiempos empleados en realizar cada uno de los juegos, y también se realizó una encuesta respecto a la percepción de los usuarios y los pacientes con relación a los juegos y al sistema de rehabilitación en general. Los resultados obtenidos muestran que el sistema desarrollado puede ser utilizado como ayuda para el fisioterapeuta y el terapeuta ocupacional en procesos de rehabilitación de motricidad fina del miembro superior, proporcionando la motivación suficiente para que el paciente pueda contribuir con su actitud a su propio proceso de mejora.

Trabajos futuros podrían probar el sistema en un grupo mayor de pacientes y durante un periodo de tiempo más largo, con el fin de observar su evolución en el tiempo y percibir con mayor precisión el potencial de la herramienta desarrollada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Omama *et al.*, “Ten-Year Cerebrovascular Disease Trend Occurrence by Population-based Stroke Registry in an Aging Japan Local Prefecture,” *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.*, vol. 29, no. 3, p. 104580, 2020, doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.104580.
- [2] E. V. Donoso Brown, B. J. Dudgeon, K. Gutman, C. T. Moritz, and S. W. McCoy, “Understanding upper extremity home programs and the use of gaming technology for persons after stroke,” *Disabil. Health J.*, vol. 8, no. 4, pp. 507–513, 2015, doi: 10.1016/j.dhjo.2015.03.007.
- [3] L. Merchán Van Hilten and R. P. Romero-Galisteo, “Terapia de movimiento inducido por restricción en hemiplejía infantil. Revisión sistemática de la literatura,” *Fisioterapia*, vol. 41, no. 1, pp. 28–36, 2019, doi: 10.1016/j.ft.2018.11.002.
- [4] D. Ugolini *et al.*, “Bibliometric analysis of literature in cerebrovascular and cardiovascular diseases rehabilitation: Growing numbers, reducing impact factor,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 94, no. 2, pp. 324–331.e1, 2013, doi: 10.1016/j.apmr.2012.08.205.
- [5] J. P. Piek, G. B. Baynam, and N. C. Barrett, “The relationship between fine and gross motor ability, self-perceptions and self-worth in children and adolescents,” *Hum. Mov. Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 65–75, 2006, doi: 10.1016/j.humov.2005.10.011.
- [6] J. Arunkumar, P. Hur, B. Motawar, and N. J. Seo, “Low-cost virtual reality game for upper limb rehabilitation using kinect and p5 glove,” *37th Annu. Meet. Am. Soc. Biomech.*, vol. 37, pp. 5–6, 2013.
- [7] M. J. López, “Teorías del control motor, principios de aprendizaje motor y concepto Bobath a propósito de un caso en Terapia ocupacional,” *Rev. electrónica Ter. Ocup. Galicia, TOG*, vol. 10, no. 18, p. 13, 2013, [Online]. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4509143&info=resumen&idioma=ENG>.
- [8] H. G. Hoffman *et al.*, “Virtual reality hand therapy: A new tool for nonopioid analgesia for acute procedural pain, hand rehabilitation, and VR embodiment therapy for phantom limb pain,” *J. Hand Ther.*, vol. 33, no. 2, pp. 254–262, 2020, doi: 10.1016/j.jht.2020.04.001.
- [9] N. Yanez, J. N. Useche, H. Bayona, A. Porras, and G. Carrasquilla, “Analyses of Mortality and Prevalence of Cerebrovascular Disease in Colombia, South America (2014-2016): A Cross-Sectional and Ecological Study,” *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.*, vol. 29, no. 5, p. 104699, 2020, doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.104699.
- [10] T. Sone *et al.*, “Prediction of upper limb recovery in the acute phase of cerebrovascular disease: study design and socio-demographic profiles, medical profiles, and acute symptoms of participants at baseline,” *Nihon*

- Eiseigaku Zasshi.*, vol. 70, no. 1, pp. 62–68, 2015, doi: 10.1265/jjh.70.62.
- [11] R. Cano-de-la-Cuerda *et al.*, “Teorías y modelos de control y aprendizaje motor. Aplicaciones clínicas en neurorrehabilitación,” *Neurología*, vol. 30, no. 1, pp. 32–41, 2015, doi: 10.1016/j.nrl.2011.12.010.
- [12] A. K. Rao and A. Einstein, *Cognition and Motor Skills*, Second Edi. Mosby, Inc., 2006.
- [13] M. I. Diez Alegre and R. Cano de la Cuerda, “Empleo de un video juego como herramienta terapéutica en adultos con parálisis cerebral tipo tetraparesia espástica. Estudio piloto,” *Fisioterapia*, vol. 34, no. 1, pp. 23–30, 2012, doi: 10.1016/j.ft.2011.09.001.
- [14] M. I. Diez-Alegre and E. Muñoz-Hellín, “Empleo de sistemas de realidad virtual sobre la extremidad superior en niños con parálisis cerebral. Revisión de la literatura,” *Fisioterapia*, vol. 35, no. 3, pp. 119–125, 2013, doi: 10.1016/j.ft.2012.10.002.
- [15] M. A. Montalbán and O. Arrogante, “Rehabilitation through virtual reality therapy after a stroke: A literature review,” *Rev. Cient. la Soc. Esp. Enferm. Neurol.*, vol. 52, no. xx, pp. 19–27, 2020, doi: 10.1016/j.sedene.2020.01.002.
- [16] A. N. Caicedo Rosero, “Sistema de rehabilitación de motricidad fina basado en juegos y en movimientos repetitivos, un caso de estudio,” Universidad del Cauca, 2018.
- [17] X. Chen, X. Wu, Y. Gong, C. Qu, and H. Wang, “Hand rehabilitation training system based on virtual reality technology,” CN107485826, 2017.
- [18] L. Johnson, J. Burridge, S. Ewings, E. Westcott, M. Gayton, and S. Demain, “Principles into Practice: An Observational Study of Physiotherapists use of Motor Learning Principles in Stroke Rehabilitation,” *Physiotherapy*, vol. 118, pp. 20–30, 2022, doi: 10.1016/j.physio.2022.06.002.
- [19] A. Meyer-Heim and H. J. A. van Hedel, “Robot-assisted and computer-enhanced therapies for children with cerebral palsy: Current state and clinical implementation,” *Semin. Pediatr. Neurol.*, vol. 20, no. 2, pp. 139–145, 2013, doi: 10.1016/j.spen.2013.06.006.
- [20] I. Lekander *et al.*, “Relationship between functional disability and costs one and two years post stroke,” *PLoS One*, vol. 12, no. 4, pp. 0–1, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0174861.
- [21] B. Sabino and J. Márquez, “Rehabilitación virtual mediante interfaces naturales de usuario,” *Rehabil. virtual Median. interfaces Nat. usuario*, vol. 1, no. 2, pp. 1–14, 2014, [Online]. Available: http://cenid.org.mx/ctes_2015/memorias/index.php/ctes/article/view/102.
- [22] L. Dipietro, A. M. Sabatini, and P. Dario, “A survey of glove-based systems and their applications,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 38, no. 4, pp. 461–482, 2008, doi: 10.1109/TSMCC.2008.923862.
- [23] C. Demolder, A. Molina, F. L. Hammond, and W. H. Yeo, “Recent advances in wearable biosensing gloves and sensory feedback biosystems for enhancing rehabilitation, prostheses, healthcare, and virtual reality,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 190, no. April, p. 113443, 2021, doi: 10.1016/j.bios.2021.113443.

- [24] L. Kopeeny, "Haptic glove with pneumatic muscle actuators," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 36, no. 17, pp. 359–362, 2003, doi: 10.1016/S1474-6670(17)33420-1.
- [25] D. Sosa Mendez, "Desarrollo de un exoesqueleto para rehabilitación del hombro," Universidad Tecnológica de Mixteca, 2017.
- [26] N. Patrick, "Design, Construction, and Testing of a Fingertip Tactile Display for Interaction with Virtual and Remote Environments," Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [27] B. A. De la Cruz-Sánchez, M. Arias-Montiel, and E. Lugo-González, "EMG-controlled hand exoskeleton for assisted bilateral rehabilitation," *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 42, no. 2, pp. 596–614, 2022, doi: 10.1016/j.bbe.2022.04.001.
- [28] CyberGloveSystems, "CyberGlove Systems," *Data Sheet*, 2015. http://www.cyberglovesystems.com/sites/default/files/CyberGloveIII_MoCap_Glove_System_Brochure.pdf.
- [29] "5DT Fifth Dimension Technologies," *Data Sheet*. <https://www.5dt.com/downloads/dataglove/ultra/5DTDataGloveUltraDataSheet.pdf>.
- [30] "Power Claw Gloves," 2015. <https://vivoxie.com/en/powerclaw/index>.
- [31] PeregrineGlove, "Peregrine Glove," 2021. <https://peregrineglove.com/>.
- [32] StretchSense, "MoCap pro SuperSplay gloves," 2021. <https://stretchsense.com/>.
- [33] F. Wang, Y. Chen, Y. Wang, Z. Liu, Y. Tian, and D. Zhang, "Sensors and Actuators: A Physical A soft pneumatic glove with multiple rehabilitation postures and assisted grasping modes," *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 347, no. November 2021, p. 113978, 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113978.
- [34] A. Sareen *et al.*, "Design and fabrication of prosthetic glove for hand rehabilitation," *Mater. Today Proc.*, vol. 28, pp. 1612–1615, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.849.
- [35] M. Haghshenas-Jaryani, R. M. Patterson, N. Bugnariu, and M. B. J. Wijesundara, "A pilot study on the design and validation of a hybrid exoskeleton robotic device for hand rehabilitation," *J. Hand Ther.*, vol. 33, no. 2, pp. 198–208, 2020, doi: 10.1016/j.jht.2020.03.024.
- [36] V. Janarthanan, M. Assad-Uz-Zaman, M. H. Rahman, E. McGonigle, and I. Wang, "Design and development of a sensed glove for home-based rehabilitation," *J. Hand Ther.*, vol. 33, no. 2, pp. 209–219, 2020, doi: 10.1016/j.jht.2020.03.023.
- [37] Anonymous, "Virtual reality rehabilitation training system and method," CN108524186, 2018.
- [38] Y. H. Lee, "Virtual content providing device for improving cognitive ability of elderly patient having mild cognitive impairment," KR1020170124978, 2017.
- [39] Y. Fan, X. Liu, M. Zhang, H. Huo, J. Peng, and Z. Li, "Virtual reality interactive training rehabilitation glove based on touch force drive," CN109771905, 2019.
- [40] L. Zhu, Q. Cao, and Y. Cai, "Development of augmented reality serious games

- with a vibrotactile feedback jacket,” *Virtual Real. Intell. Hardw.*, vol. 2, no. 5, pp. 454–470, 2020, doi: 10.1016/j.vrih.2020.05.005.
- [41] A. Catarina and M. Macedo, “Serious Game for Motion Disorders Rehabilitation of Parkinson ’ s Disease Patients Examination Committee :,” Técnico Lisboa, 2014.
- [42] S. Deterding, R. Khaled, L. E. Nacke, and D. Dixon, “Gamification: Toward a Definition. Gamification Workshop,” *CHI 2011 Gamification Work. Proc.*, no. March, 2011.
- [43] C. S. González-González, P. A. Toledo-Delgado, V. Muñoz-Cruz, and P. V. Torres-Carrion, “Serious games for rehabilitation: Gestural interaction in personalized gamified exercises through a recommender system,” *J. Biomed. Inform.*, vol. 97, no. August, p. 103266, 2019, doi: 10.1016/j.jbi.2019.103266.
- [44] J. Jonsdottir *et al.*, “Unilateral arm rehabilitation for persons with multiple sclerosis using serious games in a virtual reality approach: Bilateral treatment effect?,” *Mult. Scler. Relat. Disord.*, vol. 35, no. July, pp. 76–82, 2019, doi: 10.1016/j.msard.2019.07.010.
- [45] B. Arrivillage and T. Estuardo, “Propiedades y Limitaciones del Kinect.” Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala, p. 7, 2014.
- [46] M. Koçak and E. Gezgin, “PARS, low-cost portable rehabilitation system for upper arm,” *HardwareX*, vol. 11, 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00299.
- [47] M. S. Hossain, M. Hoda, G. Muhammad, A. Almogren, and A. Alamri, “Cloud-supported framework for patients in post-stroke disability rehabilitation,” *Telemat. Informatics*, vol. 35, no. 4, pp. 826–836, 2018, doi: 10.1016/j.tele.2017.12.001.
- [48] C. A. Aguilar-Lazcano and E. J. Rechy-Ramirez, “Performance analysis of Leap motion controller for finger rehabilitation using serious games in two lighting environments,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 157, p. 107677, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107677.
- [49] M. Khademi, H. M. Hondori, A. Mckenzie, L. Dodakian, C. V Lopes, and S. C. Cramer, “Free-Hand Interaction with Leap Motion Controller for Stroke Rehabilitation Work-in-Progress CHI 2014, One of a CHInd,” pp. 1663–1668, 2014, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/2559206.2581203>.
- [50] C. Jiménez Lira, E. V. Benavides Pando, M. Ornelas Contreras, J. M. Rodríguez-Villalobos, S. O. Lira Guerra, and A. Laguna Celia, “Habilidades motrices y su relación con las actividades y creencias parentales en preescolares; comparaciones por nivel socio-económico,” *Sport. Sci. J. Sch. Sport. Phys. Educ. Psychomot.*, vol. 6, no. 1, pp. 122–144, 2019, doi: 10.17979/sportis.2020.6.1.5388.
- [51] P. Reyes, M. A. Gamero, F. Moniche, A. Ramírez, C. Palacios, and P. Pino, *Manual de fisioterapia para pacientes con ICTUS*. Sevilla: Asociación Sevillana de ICTUS, 2020.
- [52] J. Armenta Peinado, “Contribución del método Brunnstrom al tratamiento fisioterápico del paciente hemipléjico adulto,” *Fisioterapia*, pp. 40–48, 2003.
- [53] M. R. Cutkosky, “On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands

- for Manufacturing Tasks,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, no. 3, pp. 269–279, 1989, doi: 10.1109/70.34763.
- [54] “Arduino Projects,” 2022. <https://lastminuteengineers.com/>.
- [55] S. E. Length, “Dimensional Diagram - Stock Flex Sensor How to Order - Stock Flex Sensor How It Works Rev A2 - Page 1 Schematics,” vol. 1, no. 888, pp. 1–2.
- [56] S. Ahmad, S. Umirzakova, F. Jamil, and T. K. Whangbo, “Internet-of-things-enabled serious games: A comprehensive survey,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 136, pp. 67–83, 2022, doi: 10.1016/j.future.2022.05.026.
- [57] J. Liu, “Unity 3D animation modeling based on machine vision and embedded system,” *Microprocess. Microsyst.*, vol. 82, no. December 2020, p. 103934, 2021, doi: 10.1016/j.micpro.2021.103934.
- [58] D. Avola, L. Cinque, G. L. Foresti, and M. R. Marini, “An interactive and low-cost full body rehabilitation framework based on 3D immersive serious games,” *J. Biomed. Inform.*, vol. 89, no. January 2018, pp. 81–100, 2019, doi: 10.1016/j.jbi.2018.11.012.
- [59] M. M. Bradley and P. J. Lang, “Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential,” *J. Behav. Ther. Exp. Psychiatry*, vol. 25, no. 1, pp. 49–59, 1994, doi: 10.1016/0005-7916(94)90063-9.