



Universidad del
Rosario

ESTUDIO DE PERCEPCIÓN DE UN
ENTRENAMIENTO
PARA USO DE PRÓTESIS DE MANO
A TRAVÉS DE UN JUEGO SERIO

por

JUAN MANUEL DÁVILA RIVERA

Director: Prof. Mario Fernando Jiménez Hernández PhD.

Agosto, 2024

RESUMEN

Ya sea en el aprendizaje de una materia tediosa en el aula de clases, el entrenamiento de seguridad de una empresa o la simulación de vehículos, los juegos serios se han presentado como una manera en la que se puede mejorar la interacción de las personas con una tarea en específico. Con su expansión y la facilidad de desarrollo, estos se han transferido al área de la asistencia y rehabilitación, tanto para mejorar el proceso y reducir el dolor del paciente, o para estudiar el progreso de una manera más directa y objetiva. Uno de los métodos para lograr esto último es el uso de la electromiografía (EMG), un estudio que recolecta los impulsos eléctricos que causan que un músculo se contraiga. Éste método es el más utilizado para la fabricación de prótesis ortopédicas, pues no es invasivo y hace uso de los músculos que permanecen aún funcionales después de una amputación.

Éste estudio, aprovechando el método de EMG, busca el desarrollo de un videojuego serio enfocado a un entrenamiento para el uso de prótesis unilateral de mano, para entender la progresión de una persona a través de un procedimiento didáctico que involucra también la tecnología de la realidad virtual para lograr una inmersión que asocie los esfuerzos musculares con una acción real. En este videojuego se presentaron diferentes retos de la vida cotidiana que serían completados de manera exitosa haciendo uso de los impulsos musculares de una manera organizada.

Los datos obtenidos a partir de catorce participantes revelaron una aceptación a un proceso de entrenamiento virtual, con un puntaje de 80 sobre 100 en una escala de usabilidad para sistemas, además de una mejora en los tiempos de ejecución en un 91 % de los participantes, siendo favorable para el uso de juegos serios en estos procedimientos.

ABSTRACT

Whether it's learning a tedious subject in the classroom, safety training in an office or vehicle simulation, serious games have been presented as a way to improve the interaction between a person and a specific task. With its expansion and its development becoming easier, these serious games have been used in the area of assistance and rehabilitation with the objective being improving the process, reducing the patient's pain or studying the progress in more direct and objective way. One of the methods used for this last objective is the electromyography (EMG), a study that recollects those electric impulses causing the contraction of the muscles. This method is broadly used in the fabrication and usage of orthopedic prostheses, since it is non-invasive and is able to use the muscles that are still functional after an amputation.

This study, taking advantage of the EMG method, aims to develop a serious video game focused towards the training for the use of a unilateral hand prosthesis, with the purpose of understanding a person's perception and progression given a didactic procedure that also uses virtual reality technology to achieve an immersion, facilitating the association between the muscular efforts and real actions. In this videogame there are real-life challenges that are completed successfully through the use of muscular impulses in an organized way.

The data obtained from fourteen volunteers revealed an acceptance of a virtual training, with a score of 80 points out of 100 in a system usability scale, while also showing an improvement in execution times in a 91 % of the participants, favoring the use of serious games in training procedures.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, que con la confianza que tuvieron en mí desde el primer momento, me demostraron que podría dedicarme a lo que quisiera.

A mi hermana, que como compañera eterna, quiero compartirle esta victoria en la que tanto me apoyó.

A Orenji y Ámira, quienes me esperaron incontables noches para ir a dormir cuando yo seguía intentando hacer sentido de gráficas y números.

Y finalmente a todas las personas que se fijaron en mi proyecto, haciéndome entender que lo que hago es interesante y que podría cambiar la manera de ver el mundo de alguien, así como me la cambiaron a mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inicialmente y con mayor fuerza a mi papá, mi mamá y mi hermana. Fueron ellos los que me impulsaron a seguir mis sueños y proveyeron todos los recursos necesarios. Pido disculpas por no compartir lo suficiente de este proyecto mientras lo desarrollaba, pues me demostró de primera mano a lo que me quiero dedicar.

Agradezco a Mario, que con su experiencia me colaboró a aterrizar una idea que me estaba levantando los pies de la tierra.

A Rafael, quien sin su ayuda no habría podido completar este proyecto.

A mis amigos, Nico, Juli, Cali, Gaby, Poik, Nato, Oxo y muchos más que así fuera mareándose en el laboratorio con las gafas, permitiendo que les adhiriera electrodos o escuchándome hablar con emoción de mi proyecto, fueron cruciales para que yo entendiera qué hacía mal.

A mis maestros, especialmente aquellos que demostraron pasión en lo que hacían y posteriormente en lo que yo quería hacer.

A Ámira y Orenji, los dos gatos que en el momento de escribir esto me acompañan, dándome incontables alegrías y paz con su presencia.

Y finalmente, a todas las personas que han pasado por mi vida y creyeron en mí desde el inicio, pues por más pequeña que fuera su intervención, representaron algún cambio que luego se convertiría en el desarrollo de mi primer videojuego serio.

El primero de muchos.

Índice general

	Pag
1 Introducción	1
1.1 Justificación	2
1.2 Estado del Arte	5
1.3 Objetivos	8
2 Marco Referencial	10
2.1 Electromiografía (EMG)	10
2.1.1 Músculos antagonistas y agonistas	12
2.2 Juegos serios	13
2.2.1 Tipos de juegos serios	14
2.2.2 Uso en asistencia y rehabilitación de los juegos serios	16
2.2.3 Unity	17
2.2.4 Niveles de inmersión de los juegos serios	17
2.2.5 Realidad Virtual	18
2.3 Interacción Humano-Máquina	19
2.3.1 Interacción Humano-Máquina en Juegos Serios	20
3 Materiales y Métodos	22
3.1 Sistema de adquisición	22
3.1.1 Materiales	22

3.1.2	Recolección de datos EMG	25
3.2	Juego desarrollado	26
3.2.1	Componentes del Juego	27
3.2.2	Actividades del juego y motivación	33
3.3	Diseño del experimento	38
3.3.1	Metodología con los participantes	39
3.3.2	Cuestionarios de experiencia del usuario	40
4	Resultados y Discusión	43
4.1	Ejecución del experimento	43
4.2	Resultados del experimento	45
4.2.1	Calibración de los sensores	45
4.2.2	Tiempo de ejecución	46
4.2.3	Percepción	50
4.2.4	Cuestionario de preguntas abiertas	54
4.2.5	Ruido en las señales de EMG	60
5	Conclusiones	63
5.1	Trabajos futuros	64
	Referencias	65

Índice de figuras

2.1	Visualización del potencial eléctrico al momento de la despolarización y repolarización	11
2.2	Ejemplo gráfico del sistema de recolección de señales EMG (Imagen obtenida en [44]).	12
2.3	(a) Extensor cubital del carpo; (b) Flexor cubital del carpo	13
3.1	Electrodo adhesivo de la marca 3M con el clip que lo comunica con el sistema.	23
3.2	Sistema embebido de recolección y limpieza de las señales EMG de la marca Myoware [44].	23
3.3	Máscara de realidad virtual con sus mandos de control.	24
3.4	(a) Circuito impreso en cobre; (b) Sistema embebido de recolección de los datos desde el sensor; (c) Impresión 3D para soportar la placa de cobre; (d) Impresión 3D para soportar el mando de control	25
3.5	Prótesis manufacturada por la empresa Prótesis Avanzadas.	26
3.6	(a) Menú principal; (b) Pantalla de calibración de uno de los sensores; (c) Pantalla de tutorial siendo el mando izquierdo aquel que se sujeta	27
3.7	Isla del videojuego.	28
3.8	Cementerio.	29
3.9	(a) Agarre de una flor con la pinza; (b) Agarre de una manzana con el puño	30
3.10	Cambio del gesto de la mano izquierda utilizando los sensores, siendo palma abierta (a), pinza (b), apuntar con el dedo índice (c) y puño cerrado (d) . . .	31

3.11 (a) Ataque usando el gesto de apuntar con el dedo índice en la mano derecha, con el elemento correspondiente al gesto de la mano abierta. Proyectil señalado por una flecha; (b) Ataque usando el gesto de pinza en la mano derecha, con el elemento correspondiente al gesto de apuntar con el dedo	32
3.12 (a) Pantalla del inventario con un cristal recolectado; (b) Mano junto al cristal que dejan los fantasmas	33
3.13 (a) Isla principal del videojuego; (b) Cementerio	34
3.14 Escenario principal de la primera actividad resuelta con la puerta abierta. . .	35
3.15 Jugador sujetando un cuadro con ambas manos.	35
3.16 Vista del jugador en medio de la actividad, sujetando los ingredientes frente a la caldera encendida, indicado por el fuego y los botones a la izquierda. . .	36
3.17 Vista del jugador en medio de la tercera actividad, frente a los fantasmas que aún no advierten su presencia.	37
3.18 Participante del experimento.	38
4.1 (a) Vista frontal del sistema de recolección completo; (b) Vista lateral del sistema de recolección completo. En rojo se resalta el sensor y los electrodos, en verde el sistema embebido que comunica los sensores con el computador, y en azul el mando de control que simularía la prótesis	44
4.2 Jugador realizando una de las actividades. En el monitor se aprecia lo que el participante está observando en tiempo real.	45
4.3 Gráficas correspondientes a la actividad de extensión (a) y flexión (b) de la muñeca, con los valores de activación y umbral de calibración.	47
4.4 Distribución del umbral de activación de la (a) flexión (b) y extensión de la muñeca por cada una de las actividades, así como de la media en cada una. .	47

4.5	Tiempos de ejecución por actividad de cada uno de los participantes, discriminados de forma de que cada uno corresponde a un color diferente. Actividad 1: abrir la puerta secreta colocando un cuadro y dos flores en su lugar. Actividad 2: encender el fuego de una caldera y preparar dos pociones. Actividad 3: derrotar fantasmas y recoger los cristales que dan como recompensa. General: repetición de las 3 actividades anteriores	48
4.6	Distribución de los tiempos de ejecución por actividad.	49
4.7	Cantidad de respuestas por cada una de los atributos mencionados en la tabla 3.1 por cada actividad. (a) Actividad 1; (b) Actividad 2; (c) Actividad 3; Recuento o Actividad general.)	50
4.8	(a) Datos crudos del nivel de agotamiento por actividad; (b) Distribución del nivel de agotamiento por actividad	54
4.9	Frecuencia de las respuestas por cada una de las preguntas en 3.2.	55
4.10	Nube de palabras de todas las respuestas juntas, por cada una de las preguntas del cuestionario 3.2. (a) ¿Cuál actividad le pareció la más sencilla a nivel conceptual? (b) ¿Cuál actividad le pareció la más complicada a nivel conceptual? (c) ¿Cuál actividad le pareció la menos demandante físicamente? (d) ¿Cuál actividad le pareció la más demandante físicamente?	57
4.11	Mapa de calor de la similitud del coseno para las respuestas de cada participante para cada atributo de 3.2. (a) Facilidad conceptual; (b) Dificultad conceptual; (c) Facilidad física; (d) Dificultad física	58
4.12	Nube de palabras de las respuestas seleccionadas, por cada una de las preguntas del cuestionario 3.2. (a) Facilidad conceptual; (b) Dificultad conceptual; (c) Facilidad física; (d) Dificultad física	59
4.13	Gráfica de la señal EMG con ruido.	60
4.14	Porcentaje de datos que el ruido se hizo presente por cada actividad.	61

Índice de tablas

3.1	Atributos de la escala de usabilidad del sistema	41
3.2	Preguntas de percepción	42
4.1	Media (M) y Desviación Estándar (D) de las respuestas por cada uno de los atributos en la Tabla 3.1 y actividad	52
4.2	Puntaje de la escala de usabilidad del sistema	53

Capítulo 1

Introducción

En la rehabilitación física, el proceso de recuperación consiste en su mayor parte en la repetición de ejercicios para así fomentar la recuperación y fortalecimiento de los músculos directamente implicados [3]. En este proceso, se fomenta la conexión neuromuscular que pudo haber perdido la persona por un accidente o complicación de salud, con el objetivo de facilitar uno o varios movimientos que permiten mejorar la calidad de vida de las personas [23]. Sin embargo, hay situaciones o condiciones médicas en las que las extremidades necesitan ser amputadas por consecuencia del daño irreparable en los tejidos [33].

En el caso en que las terminaciones nerviosas no hayan sido reconectadas correctamente y no se haya realizado una rehabilitación oportuna, la conexión neuronal con los músculos se va debilitando. Esto puede llegar a un punto en el cual el proceso de fisioterapia para su recuperación se ve alterado por la atrofia muscular, generando la incapacidad parcial o total de realizar los ejercicios dispuestos por los especialistas, que incluyen mas no se limitan a la extensión y flexión de las extremidades [16]. Aproximadamente en Colombia, trescientas de cada cien mil personas, que con eventualidades que van desde accidentes en el trabajo, minas antipersonales o complicaciones de salud, han tenido que ser sometidas a un proceso de amputación de manos, perdiendo la independencia en la realización de actividades de la vida diaria tales como comer o vestirse [15][30].

Teniendo en cuenta las ventajas de los juegos serios, su uso en la VR y la EMG, se pretende el desarrollo de un videojuego serio que aproveche estas tecnologías para extender

el estudio de estos tipos de herramientas en el proceso de entrenamiento para el uso de las prótesis de la mano. Dicho videojuego tendrá una comunicación directa con el esfuerzo físico que haga el participante a través de las señales musculares que reciban los sensores de electromiografía ubicados en el antebrazo del usuario, para luego determinar la duración de los ejercicios y la propia percepción del usuario. Para evaluar dicha experiencia de uso del sistema desarrollado, se utilizará la Escala de Usabilidad de Sistema (SUS, por sus siglas en inglés), que evalúan la efectividad, eficiencia y satisfacción a la hora de utilizar una herramienta. El SUS se considera pertinente ya que esta escala reduce los sesgos en las respuestas de los usuarios y es adaptable a las nuevas tecnologías como lo es la RV [5].

1.1. Justificación

Existen varias empresas que se dedican a la manufactura de prótesis biomecánicas, dispositivos que reemplazan partes del cuerpo faltantes ya sea de manera congénita o por los accidentes mencionados anteriormente. Estos dispositivos de asistencia, dependiendo de su complejidad pueden contar con las capacidades de únicamente ser soporte (como es el caso de las prótesis de pierna) o contar con movimientos más detallados como abrir y cerrar la mano que, haciendo uso del impulso eléctrico generado por los músculos sanos restantes en la extremidad, cumplen con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los pacientes al permitir realizar tales movimientos por su cuenta de manera más independiente [45].

Para la realización de prótesis avanzadas, la interfaz más extendida que comunica los pacientes con las herramientas es aquella llamada Electromiografía (EMG), una técnica que permite analizar los impulsos eléctricos de una persona a través de únicamente la piel que recubre el músculo [9]. Sin embargo, al ser dispositivos tan sofisticados se necesitan de varias sesiones en las que se tienen que tomar las medidas físicas de la extremidad amputada, así

como del estado actual de los músculos sanos restantes para definir satisfactoriamente la localización de los sensores, y que después la prótesis manufacturada se ajuste de manera precisa a la persona, para que cuando se utilicen sea lo más natural posible [34].

Para un correcto acoplamiento entre la persona y la prótesis, se requiere de un entrenamiento que podría tomar varias sesiones, y en consecuencia aumentar el tiempo de acople entre la persona y la prótesis. Desafortunadamente este entrenamiento, si es realizado con baja intensidad, puede resultar en el rechazo total del uso de la prótesis, generando que se pierda definitivamente la independencia que se buscaría recuperar [37].

Este entrenamiento, que consiste de la familiarización con los sensores y las acciones necesarias para la activación de los mismos, hace parte de un proceso extenso en el que se toman las medidas del usuario para el desarrollo del acople de la prótesis. Esto representa un periodo de tiempo en el que el usuario se encuentra esperando a la manufactura de dicho acople, deteniendo el proceso de adaptación.

Si bien la falta de la prótesis en este periodo de entrenamiento no es un punto especialmente negativo por la propia naturaleza de la situación, el tiempo de adaptación a la prótesis se puede disminuir –y así reducir la tasa de deserción– a través de una tecnología que ha presentado cada vez más relevancia en este campo, que se denomina realidad virtual (VR en inglés) [40].

La VR es un sistema de entorno virtual en el que el usuario se encuentra presente a través de pantallas y controladores. Estos que proveen a dicho usuario con una retroalimentación visual a cualquier acción que realice [49]. Con la VR, en el marco de las prótesis de manos, se puede aprovechar la posibilidad para el usuario de visualizar tanto su mano funcional como la simulación de la prótesis de una manera precisa, siguiendo los movimientos y gestos posibles, ayudando a entender tanto su funcionamiento como sus capacidades sin la necesidad de esperar al final de la manufactura de la prótesis. Sumado a esto, dentro del entorno virtual el cerebro es capaz de tomar lo que ve y escucha para simular la situación

en la que se encuentra al punto en que puede estimular de manera involuntaria los músculos necesarios, como lo sería caer de un lugar elevado para tener la postura adecuada [18]. Esto se puede aprovechar en un entrenamiento, ya que es mediante la repetición y la práctica que, ya sea con un trazo de dibujo, golpear una pelota con una raqueta, o ejecutar una acción a través de un control, se alcanza la naturalidad para realizar acciones similar a un movimiento reflejo del cuerpo en el mundo físico.

Teniendo en cuenta que la realidad virtual se relaciona de una manera tan estrecha con los videojuegos al punto de volverlos más disfrutables [36], se propone el desarrollo de un juego serio con la finalidad principal de entender la viabilidad del uso de la realidad virtual en el entrenamiento de para el uso de prótesis de mano. Será desarrollado con el objetivo de conectarse a una prótesis avanzada, con el potencial de uso en el entrenamiento de usuarios de la prótesis desarrollada por la empresa Prótesis Avanzadas de la ciudad de Medellín, Colombia.

Se utilizará la electromiografía en el antebrazo para comunicar al usuario con el juego serio, así como los mandos de control que facilitarán el seguimiento de los movimientos y la posición de la mano en el ambiente virtual. Dentro de este videojuego, la persona se enfrentaría a diferentes desafíos que simulen situaciones de la vida real, los cuales incluyen recoger objetos delicados, agarrar elementos más compactos que requieran una o dos manos, y el uso de botones. Sumado a estos desafíos, se incluiría un reto ajeno a la vida cotidiana en el que la persona es protagonista de una infestación de fantasmas y usando los diferentes gestos de las manos se enfrenta a dichos seres. De esta forma se propone una herramienta didáctica, con potencial de uso en procesos de rehabilitación física y acondicionamientos tradicionales para entorno reales de usuarios de prótesis de mano.

1.2. Estado del Arte

La definición de “juego serio” más extendida y mayormente aceptada es aquella acuñada en el año de 1970 por Clark Abt en su publicación *Serious Games* (por su traducción en inglés), otorgada a partir de su “propósito educacional explícito y meticulosamente pensado y no tienen la intención únicamente por entretenimiento” [12]. Estos no son ajenos a la realidad de muchas personas, ya que se pueden presentar en la cotidianidad en la forma de un simple juego de sumas aritméticas, que facilitaría para los niños el aprendizaje de esta materia [17]. Este tipo de procesos educativos tampoco se alejaron de los avances tecnológicos, que a mitad del siglo XX revelaron los videojuegos, con la posibilidad de que dos personas interactuaran en tiempo real en una situación específica. Fue en medio de la incertidumbre de la Guerra Fría que estos progresos fueron puestos en práctica para la educación, sin embargo esta no fue dirigida a niños sino a soldados, quienes mediante el software T.E.M.P.E.R., desarrollado por el mismo Clark en 1966 para la empresa militar Raytheon Corporation, simulaban la situación del mundo en aquel momento a partir de decisiones de una computadora, para así poderse anticipar a algún movimiento por parte de alguna nación [12]. Como estos, más adelante surgieron juegos serios que como T.E.M.P.E.R., los cuales cumplen con el objetivo de preparar a sus usuarios con escenarios posibles en diferentes disciplinas, como lo es en la aviación Prepar3D [28] o también en deportes de motor con simuladores en la Fórmula 1 [6].

Similar al entrenamiento de una disciplina, los juegos serios son utilizados para facilitar el proceso de rehabilitación física de múltiples grupos musculares, particularmente y para relevancia de este estudio, aquellos responsables del movimiento y gestos de la mano. Estas soluciones son diseñadas a partir de la situación de la población objetivo, dado a que existen múltiples causas y tratamientos relacionados con dicha situación, como rehabilitación neuromuscular [48], acondicionamiento a dispositivos de asistencia [45], rehabilitación y terapias físicas.

En [47], desarrollaron un juego serio para tratar personas que sufrieron de un derrame cerebral, las cuales pierden parcialmente la movilidad de su brazo y también la libertad en la gesticulación de la mano. En este, haciendo uso de un tablero con un laberinto dibujado y de dos pequeños robots, se propone que el paciente intente resolver el desafío y recolectar unas manzanas presentes en el laberinto agarrando y desplazando una de los dos robots mientras evita que la restante le alcance. Es a partir de este juego serio que, mediante los desafíos y penalizaciones como lo es perder puntaje por tocar los “muros” del laberinto, se pueden realizar modelos de inteligencia artificial que predicen la evolución de los pacientes para así poder diseñar de una manera más precisa y también personalizada los entrenamientos a través de elementos como los robots mencionados [47].

El uso de estos elementos como pruebas escritas o maquetas puede representar un aumento de los costos de los experimentos en tanto que requieren la producción y mantenimiento de los mismos. En este contexto surge como solución el uso de la VR, una tecnología que si bien puede resultar en un costo inicial bastante mayor en la realización de pruebas y experimentos, el no necesitar de recrear un escenario físico por cada iteración de los mismos representa una disminución progresiva en el valor por cada persona que utilice sistemas de VR [13]. Esto es posible ya que esta tecnología es capaz de simular un entorno tridimensional mediante el uso de una máscara equipada con una pantalla en frente a cada ojo y altavoces, con el fin de otorgar una simulación de la realidad más fiel al usuario través de una vista estereoscópica y audio estereofónico [29]. Además, para que la ilusión sea cada vez más atractiva se utilizan dos mandos de control –uno en cada mano– los cuales, junto a la máscara, siguen los movimientos del usuario de una manera precisa. Estos dos elementos se combinan para permitirle a las personas interactuar con los objetos dentro de la simulación y explorar un entorno de manera segura en el mundo real.

Más allá de los costos de inversión reducidos a largo plazo que representa el uso de la realidad virtual, la manera en la que interactúan los usuarios permiten mejorar las mediciones

que se realizan en ellos al tener una simulación más fiel en las situaciones que se disponen en los experimentos. Tal es el caso de [18], un estudio realizado en quince jóvenes adultos monitoreados mediante sensores de electromiografía (EMG), que se enfrentaron a un mismo evento con condiciones diferentes, encontrarse en el techo de un edificio y posteriormente caer, con una mochila a propulsión (Jetpack) o en caída libre, y también tener los ojos cerrados o abiertos. El experimento concluyó que gracias al estímulo visual (que se ausenta con los ojos cerrados), los músculos encargados de estabilizar la postura corporal presentaba un esfuerzo reflejo al inicio de la caída y en el momento anterior al contacto con el suelo, dando una idea de cómo el cerebro es engañado más allá de la propia percepción y alcanzando el sistema nervioso central [18].

Los juegos serios también se han utilizado para el tratamiento y rehabilitación de los miembros superiores en pacientes con Parkinson. En [14] se les presentaba el entorno virtual en un monitor, en el que se controlan los brazos de un agente virtual haciendo uso de los propios sin necesidad de utilizar un periférico como lo sería el teclado o el mouse. Esto se logró a partir de una cámara especializada para el seguimiento de los movimientos de las manos llamada Leap Motion. Con los resultados obtenidos, se concluyó que el videojuego serio cumple con ser una herramienta de rehabilitación que podría beneficiar a las personas con Parkinson [14]. Si bien Leap Motion es un dispositivo versátil que ofrece bastantes alternativas a la hora de desarrollar un videojuego serio dada su compatibilidad con la realidad virtual [14][1], no ofrece una medida precisa de los estímulos musculares necesarios para estudiar el progreso de las personas que puedan utilizar un juego serio enfocado a las conexiones con dichos músculos como se puede ver en [18].

Similar a [18], reuniendo los procedimientos de EMG, las ventajas de la realidad virtual y también las posibilidades de los videojuegos serios. En [19] diez participantes tanto sanos como amputados de una mano con un brazalete especializado para recibir las señales de electromiografía, se les indicó que dentro del entorno virtual simularan agarrar tantos

bloques como fuera posible y transportarlos de un contenedor a otro en un periodo de un minuto. Los resultados de este experimento demostraron que con el pasar de las sesiones, ambas poblaciones mostraron una mejoría en la realización del ejercicio y en la fuerza muscular, concluyendo que un videojuego serio de ésta índole puede ser utilizado como una herramienta complementaria para la rehabilitación de personas con manos amputadas, además de interesar en mayor medida a los usuarios y por consecuencia fomentar la permanencia en los procesos de rehabilitación [19].

1.3. Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar un juego serio que permita emular los movimientos de la mano típicos en procesos de familiarización del usuario con una prótesis de mano.

Objetivos específicos

- Desarrollar el ambiente de realidad virtual del juego serio de manera que estimule el uso de 4 movimientos típicos de la prótesis de mano como lo son:
 - Abrir la mano.
 - Cerrar el puño.
 - Agarre de pinza.
 - Apuntar con el dedo índice.

- Identificar a partir de la señal de EMG los comandos que relacionen el mundo físico con el ambiente virtual del juego serio.
- Entender la dificultad del juego serio a partir del rendimiento y percepción del usuario.
- Evaluar el juego serio por medio de pruebas de funcionalidad con personas sanas.

Capítulo 2

Marco Referencial

En este capítulo se darán a entender los procedimientos y herramientas utilizadas en este proyecto, así como definir qué parte de los mismos resultan relevantes.

2.1. Electromiografía (EMG)

La electromiografía (EMG) es la representación del potencial eléctrico generado por la despolarización de la membrana externa de las fibras musculares, también conocida como el sarcolema.

Esta despolarización se refiere al proceso mediante el cual dicha membrana reduce su negatividad (ver Figura 2.1) al permitir el intercambio de iones de sodio y de potasio a partir de un estímulo causado por una neurona motora en la unión neuromuscular, generando una región de despolarización. Dicha región de despolarización se propaga a lo largo de las fibras musculares desde su generación en la unión neuromuscular hasta las terminaciones de los tendones.

Las señales generadas por este proceso pueden ser detectadas por electrodos dispuestos en pareja en un método que se conoce como “bipolar”. Siendo situados en una zona cercana a la unión neuromuscular y alineados con la dirección de la fibra muscular. Se realiza una combinación lineal de la señal adquirida por cada uno de los electrodos para así reducir la

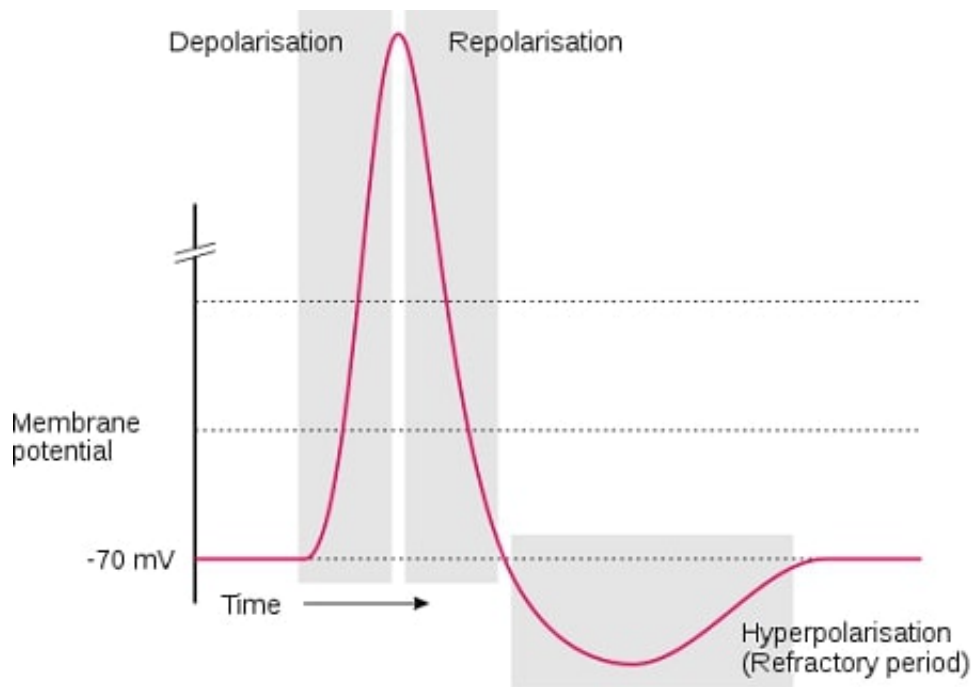


Figura 2.1: Visualización del potencial eléctrico al momento de la despolarización y repolarización

posibilidad de ruido que surge por el tejido que separa el emisor y el remitente de la señal. En este método también se adhiere un tercer electrodo denominado de referencia, que como su nombre indica lo que hace es establecer cuál es el potencial eléctrico de las células antes de la despolarización (situado en el rango de -70 y -90 mV respecto al exterior). Es entonces que la diferencia de señales es amplificada y transmitida por el sensor al cual están conectados los electrodos. La posición de los electrodos y la identificación correcta del músculo posee un peso mayor en la ejecución de la electromiografía superficial (sEMG) por la posibilidad de diafonía, que consiste en la contaminación de la señal por la presencia de un agente externo que transmita una señal con igual o mayor fuerza que aquel que se desea estudiar, lo cual en este caso sería que la señal eléctrica de un músculo superficial adyacente sea también recibida por los electrodos [32].

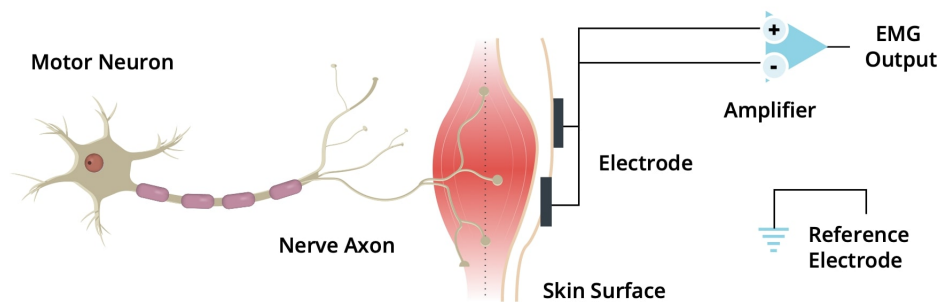


Figura 2.2: Ejemplo gráfico del sistema de recolección de señales EMG (Imagen obtenida en [44]).

2.1.1. Músculos antagonistas y agonistas

Para poder realizar los movimientos del cuerpo, este se compone de varios grupos musculares de tipo esquelético, que mediante la conexión a los huesos a través de tendones se puede flexionar o extender las articulaciones correspondientes. Para realizar un movimiento específico, los músculos pueden ser separados en tres categorías dependiendo de su función: agonistas, los que tienen efecto directo en el movimiento; antagonistas, los que hacen el efecto contrario; y los sinergistas, que están ahí para estabilizar y facilitar el esfuerzo. Por relación a este proyecto solo se considerarán los dos primeros para los movimientos de extensión y flexión de la muñeca.

Para la flexión de la muñeca, los músculos agonistas son el Flexor cubital del carpo y el Flexor radial del carpo, mientras que los antagonistas son el Extensor cubital del carpo, el Extensor radial largo del carpo y el Extensor radial corto del carpo. Como el movimiento contrario es la extensión de la muñeca, los músculos mencionados se invertirían de categoría.

Por conveniencia en su localización, se usaron los músculos cubitales para la realización de este proyecto.

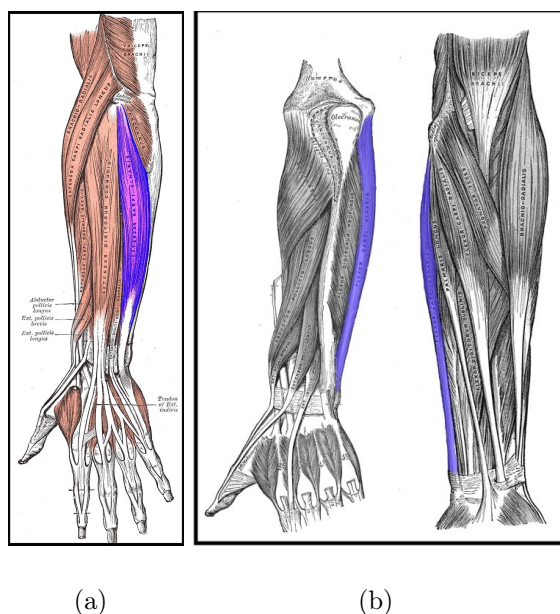


Figura 2.3: (a) Extensor cubital del carpo; (b) Flexor cubital del carpo

2.2. Juegos serios

El concepto de los juegos serios en la historia se puede remontar a la época de Platón, quien tenía el pensamiento de que los comportamientos reforzados en los niños en el juego serían posteriormente reforzados en la vida adulta.

"Por ejemplo, si un niño va a ser un buen granjero o un buen constructor, debe de jugar a construir casas de juguete o a la labranza y debe de ser proveído por su tutor con herramientas en miniatura modeladas a partir de las reales... Uno debe de ver los juegos como medios de dirección para los gustos de los jóvenes y sus inclinaciones al rol que cumplirán de adultos"[10]

A nivel práctico se tienen registros de que en el séptimo siglo en la India se desarrolló un juego de mesa llamado Chaturgana, que es considerado por historiadores como el primero que tuvo un contexto de guerra, siendo incluso precursor del extendido ajedrez [46]. Sin embargo la estrategia militar no ha sido el único campo representado de una manera didáctica,

pues en el año 1902 se crearía el juego de mesa “Landlord’s game” (“Juego del casero”), que como precursor del ahora llamado Monopoly, presenta los peligros de una visión capitalista de los impuestos al terreno y el arrendamiento de propiedades, siguiendo con los cambios sociales de la época.

Estos no son ajenos a los avances tecnológicos, pues con la introducción de los computadores se abrieron las posibilidades de crear nuevos juegos utilizados de manera educativa, empezando por una colaboración entre la desarrolladora Atari y la milicia de los Estados Unidos para el lanzamiento de un programa que simula el periscopio de un tanque y le da al jugador el objetivo de dispararle a otros vehículos acorazados, modelados para parecerse lo más posible a los reales [46].

Tampoco se limitaron a una visión meramente enfocada en el progreso de las personas a través de los videojuegos, pues se aprovechó el atractivo de esta industria emergente únicamente para generar ganancias y promocionar un producto, como lo fue Pepsi Invaders [38] [46].

2.2.1. Tipos de juegos serios

Los juegos serios se han aprovechado dentro de diversos campos, de manera tanto física a través de tableros como de manera digital en los videojuegos.

Simulación

Son aquellos juegos serios que se enfocan en el mejoramiento de las habilidades de los usuarios, a través de la inmersión en una situación en la que las características del entorno virtual se asemejan lo más posible a las reales. Tal es el caso de los simuladores de carreras utilizados por los equipos de Fórmula 1 [6] o de aviación que otorgan información de las

cabinas de los aviones de una manera realista [28].

Aunque no solo se limitan a las habilidades motrices, pues estas simulaciones también pueden requerir de estrategias para la ejecución exitosa por parte del jugador. Un ejemplo de esto es la saga de videojuegos The Oregon Trail, que presenta diferentes desafíos para mantener con vida un pequeño grupo de pioneros en su viaje por Estados Unidos [46].

Educación

Mediante el uso de recursos lúdicos, se enseña a los jugadores sobre los temas que el observador considere pertinente. Dada la posibilidad de visualizar conceptos abstractos y la interacción que los estudiantes tienen con el videojuego. Esto se observa en [8], en la que las operaciones matemáticas se evidencian con la altitud del personaje principal, en su travesía para rescatar a su perro. Y más allá de el salón de clase, la gamificación de los entrenamientos corporativos si bien no representó un aumento significativo en el aprendizaje de las habilidades deseadas, sí implicó un aumento en la motivación de participar de estas actividades, así como el aumento en las tasas de retentiva y en los puntajes si estos poseían un componente social.

La gamificación de las actividades también fomenta la participación de las personas en actividades repetitivas, atreviéndose a fallar y a realizar varios intentos a pesar de los riesgos [27].

Mercadeo

Como se presentó anteriormente, se pueden agrupar los videojuegos desarrollados enteramente para la promoción de productos. Si bien existen videojuegos como Pepsi-Man o el ya mencionado Pepsi Invaders que hacen alusión al refresco, también se incluyen aquellos

que derivan de largometrajes como Star Wars.

2.2.2. Uso en asistencia y rehabilitación de los juegos serios

Con el pasar de los años los videojuegos serios han tenido una mayor presencia en las investigaciones que tratan tratamientos para diferentes condiciones médicas, siendo las más comunes aquellas referentes al mantenimiento de la calidad de vida durante la tercera edad, control de peso, rehabilitación después de un derrame cerebral, parálisis cerebral y personas con Párkinson. La propia naturaleza entretenida y cautivadora de los videojuegos representa una ventaja para estos estudios, pues sin importar la edad se da un alto nivel de participación, aún si las personas no son familiares con los videojuegos [4].

En [31] se condujo un estudio en el que se buscó determinar las ventajas preliminares que tendría el uso de un videojuego para el entrenamiento que tendrían las personas que requirieran de una prótesis de la mano. Este concluyó que el uso del juego serio no representó una mejoría o entorpecimiento en el posible entrenamiento.

Por otro lado, en [26] se condujo un experimento con el mismo objetivo de determinar la viabilidad del uso de un videojuego serio en un proceso de rehabilitación y entrenamiento. Sin embargo este en lugar de el teclado y mouse, utilizaría EMG para comparar un método convencional de acondicionamiento con aquel ligado al videojuego, concluyendo que por la consistencia en las señales musculares de los participantes, el uso de los videojuegos serios se puede contemplar como una alternativa útil a los métodos convencionales.

2.2.3. Unity

Motor de desarrollo de aplicaciones con especialización en videojuego que ofrece al usuario diversidad de herramientas programadas por defecto que puede incluir en su entorno virtual por medio de escenas. Tiene la ventaja de permitir el uso de las interfaces del dispositivo objetivo sin la necesidad de programación de alto nivel, sin restringir a usuarios experimentados el cambio de las reglas propias del motor. También cuenta con soporte para una gran variedad de sistemas operativos que incluyen mas no se limitan a aquellos de realidad virtual, utilizado en este proyecto.

2.2.4. Niveles de inmersión de los juegos serios

En [24] se divide los niveles de inmersión dependiendo de los componentes tecnológicos del programa, siendo estas categorías Baja Inmersión y Alta Inmersión. La primera se refiere a los sistemas que utilicen una imagen bidimensional, como lo sería el uso de una pantalla y periféricos como mouse y teclado. Se da el ejemplo del videojuego social “Second Life” La segunda, siendo de mayor orden, se distingue por incluir un entorno virtual de 360 grados, ofreciendo al usuario una perspectiva espacial realista, permitida por un periférico (como las gafas de realidad virtual) montado en su cabeza.

Siendo estos los extremos en el contexto de los niveles de inmersión, cualquier punto intermedio dependerá de la oclusión visual e interactividad con el propio programa separado del mundo real. Un ejemplo de esto hace presencia en [35], un estudio que buscaba diferenciar la mejoría en diferentes situaciones dependiendo de el nivel de inmersión al que se presentaran los participantes. En este experimento se incluyeron los dos niveles anteriormente mencionados, adicionando un tercero en el que se utilizaba un visor montado en la cabeza, que a diferencia de aquellos de realidad virtual muestra las imágenes computarizadas

sobreponiéndolas al entorno real. El estudio concluye que en el proceso de reconocimiento de objetos en un entorno virtual, la realidad virtual y la Alta Inmersión posee una ventaja respecto a los demás niveles.

2.2.5. Realidad Virtual

Definido como una interfaz humano-máquina avanzada capaz de simular un entorno realista, la realidad virtual tiene como objetivo central el posicionar al participante en dicho entorno y otorgarle la posibilidad de interactuar de alguna manera con los objetos simulados como si de sus contrapartes reales se tratase [49]. Esto se logra en un principio por un dispositivo montado en la cabeza (HMD por sus siglas en inglés) que mediante sensores es capaz de detectar la posición y orientación del usuario para así mostrar en sus dos pantallas la imagen de una manera estereoscópica. Debido a que este periférico aísla de manera total la visión de la persona y le provee también una retroalimentación auditiva, se puede incluir en la categoría de alta inmersión discutida previamente.

Esta tecnología ha estado presente en varios campos de estudio y han sido tema de conversación desde antes del inicio del siglo XX, como se evidencia en [49] siendo publicado en 1998. Sin embargo, gracias al lanzamiento de periféricos fácilmente configurables, un precio más accesible y también la expansión de sistemas como Unity que ofrecen a las personas del común una manera de programar sus propias simulaciones, han aumentado los estudios en los campos del estudio y de la rehabilitación desde mediados de la década de 2010.

2.3. Interacción Humano-Máquina

La interacción humano-máquina es definida como aquella interacción y comunicación entre usuarios humanos y sistemas técnicos dinámicos a través de una interfaz [22], algo que se ha convertido de vital importancia con el pasar de los años y que con el aumento de los computadores surge la necesidad de investigar estas interfaces.

Puntualmente la interacción humano-máquina busca mejorar la interacción entre los usuarios y las computadoras al volverla más receptiva a las necesidades de dicho usuario. Los factores que se consideran son las metodologías de diseño de las interfaces, su implementación y evaluación. El fin último de todos estos estudios es minimizar la barrera de lo que quiere realizar el usuario y la máquina entendiendo la tarea que esto representa [41].

Con la introducción de tecnologías cada vez más sofisticadas, la presencia de esta interacción humano-máquina se ha hecho más relevante en el afán de automatizar actividades básicas y de ofrecer una solución al alto costo del talento humano o directamente la falta de este mismo [11]. Uno de los puntos más fuertes se encuentra en la industria, de manera concreta en una línea de producción en la que la máquina realiza una serie de acciones limitadas pero de manera eficiente, siendo controlada por un operador humano que vigila los resultados [39]. Una simbiosis en la cual la máquina ofrece asistencia física técnicamente ilimitada, reduciendo la fatiga del usuario sin comprometer la experiencia y capacidad de resolución de problemas de este al ser quien opera el sistema [11]. Es esta asistencia física a los humanos la que más adelante se convertiría en una extensión de los usuarios, ya sea a nivel industrial o doméstico, fomentado por una expansión de la tecnología que acercó los entornos médicos a las personas del común [11]. Dependiendo de la interfaz y el propósito de la comunicación con la máquina, se extiende el horizonte de aquellos campos con capacidad de mejora, ya sea por la eficiencia o la calidad de vida de los usuarios.

2.3.1. Interacción Humano-Máquina en Juegos Serios

Con el avance de las tecnologías y el aumento de la accesibilidad de los videojuegos, se ha fomentado la expansión de los juegos serios en estas plataformas. Esto a su vez ha generado que la interacción humano-máquina encuentre nuevos horizontes, evolucionando la manera en que los videojuegos serios eran presentados a través de nuevas interfaces que fueran más allá que los convencionales mouse y teclado.

A pesar de eso, no se puede ignorar que esta interfaz "básica" ha representado una base muy robusta en los juegos serios, siendo que desde la concepción de los videojuegos han sido utilizados con este propósito como se discutió anteriormente. Juegos serios con el propósito de educar como se explica en [8], [27] y [46].

Apartándose poco a poco de las tecnologías convencionales, los juegos serios se han visto en el campo de la simulación de deportes automotores. Funcionando como el entrenamiento de los conductores sin la necesidad de salir a la pista [6], este tipo de programas hacen uso de periféricos especializados para asemejarse a aquellos componentes de control en un automóvil tales como el volante y los pedales. Es a través de estos que es posible hacer mediciones de las acciones que los deportistas realizan en forma de la telemetría, gráficos que corresponden a la aceleración y frenada, que en [20] se utilizan para estimar las maneras en que los competidores pueden mejorar.

Más allá de simular entornos adicionales a través de periféricos, los juegos serios han hecho su aparición mediante el uso propio de las manos, sin la necesidad de hacer contacto con ningún componente. En [14] se demuestra la posibilidad de utilizar sensores infrarrojos como lo es Leap Motion para la identificación de los movimientos que un usuario puede hacer, siendo en este caso en un tratamiento de Párkinson. Un periférico que utiliza una tecnología similar de infrarrojos es aquel llamado Kinect, desarrollado por Microsoft y lanzado en 2010.

Este sacrifica los gestos finos de la mano por la capacidad de detectar las posiciones del cuerpo completo, que se aprovecha en [38] para que, a través de retos tanto motores como cognitivos, los investigadores puedan cuantificar el progreso realizado por jóvenes con autismo.

También, con el fin de tener datos un poco más precisos que se relacionen al progreso físico de los participantes se puede hacer uso de sensores en procedimientos generalmente médicos para lograr este seguimiento. Uno de estos procesos es llamado electroencefalografía (EEG) y tiene influencia directa del cerebro de la persona a estudiar, recibiendo a través de electrodos situados en puntos específicos de la cabeza los impulsos neuronales. Esta información es utilizada en [42] para medir la viabilidad de un juego serio como terapia para el tratamiento de personas que sufren de dolor crónico con resultados positivos; y también se hace presente para determinar si en el uso de videojuegos serios se presenta un tipo específico de señal, como lo evidencia [21].

Finalmente y con mayor relevancia para este estudio, se encuentra la electromiografía (EMG), que con las señales de los músculos se puede ofrecer una visión más precisa del funcionamiento del cuerpo en diversas actividades. Esto lo utiliza [43] en el contexto de la medicina, que a través del uso de la realidad virtual se recolectan datos que se usarían para entrenar un robot capaz de realizar con precisión diferentes procedimientos como la sutura de un tejido.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

En esta sección, se discutirán los elementos y metodología utilizados en el desarrollo y ejecución de este proyecto

3.1. Sistema de adquisición

3.1.1. Materiales

Electrodos Médicos

Son dispositivos con la capacidad de conducir la corriente eléctrica del cuerpo humano hacia algún dispositivo de medición. El tipo de electrodo a tratar en esta investigación es aquel adhesivo desechable que se coloca sobre la piel del paciente de manera no invasiva (ver figura 3.1).

Myoware Sensors

Estas piezas de electrónica, manufacturados por Advancer Technologies (ver figura 3.2), están diseñadas para recibir las señales eléctricas de los músculos a través de la electromiografía. Cuenta con tres puertos para encajar los electrodos necesarios para realizar la



Figura 3.1: Electrodo adhesivo de la marca 3M con el clip que lo comunica con el sistema.

medición, así como de conexiones específicas para poder adherirlos a distancia de la placa principal y también conectarlo con algún microcontrolador compatible.

Estos sensores fueron alimentados por 3.3 voltios, manteniéndose dentro del rango normal para su uso. Posee dos filtros para la limpieza de la señal recibida directamente por los electrodos: un filtro paso-bajo parametrizado a 498.2 Hz y otro paso-alto a 20.8 Hz. Finalmente, un amplificador que cumple con la ecuación $G = 200 * R/1$, en donde G es la ganancia y R la resistencia dada por un potenciómetro. Desafortunadamente los valores no son especificados para este potenciómetro [44].

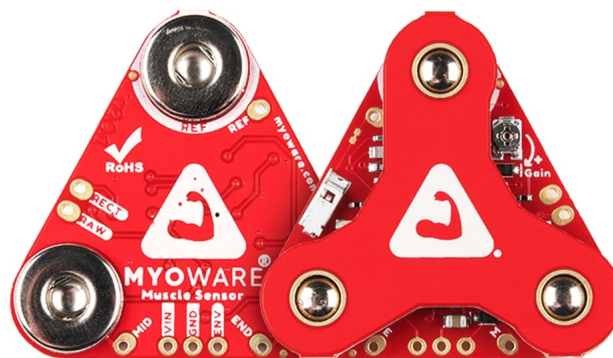


Figura 3.2: Sistema embebido de recolección y limpieza de las señales EMG de la marca Myoware [44].

Oculus Rift S

Producto desarrollado por Facebook Technologies y Lenovo, consistiendo en una máscara de realidad virtual y sus dos controladores (ver Figura 3.3). Estos, en conjunto con las dos pantallas dentro de la máscara, permiten a un usuario interactuar dentro de un mundo virtual gracias al seguimiento de la posición y los movimientos de su cabeza y de sus manos.



Figura 3.3: Máscara de realidad virtual con sus mandos de control.

Componentes misceláneos

Para la realización exitosa de esta investigación se utilizó el sistema embebido Arduino Nano (33 IOT) por su reducido tamaño, sin perder la velocidad de transferencia al computador principal. Adicional a eso se manufacturaron dos piezas en impresión 3D (ver Figura 3.4). La primera con el fin de sostener una placa de cobre diseñada para poder conectar los sensores al Arduino Nano sin la necesidad de cables adicionales, manteniendo también el microcontrolador en una posición estable y segura. La segunda pieza tuvo como objetivo proveer soporte al control del dispositivo de realidad virtual (Oculus Rift S) en el brazo a estudiar del usuario, para poder así proveer de una experiencia más realista simulando el caso de no poseer una mano con la cual sujetar dicho control.

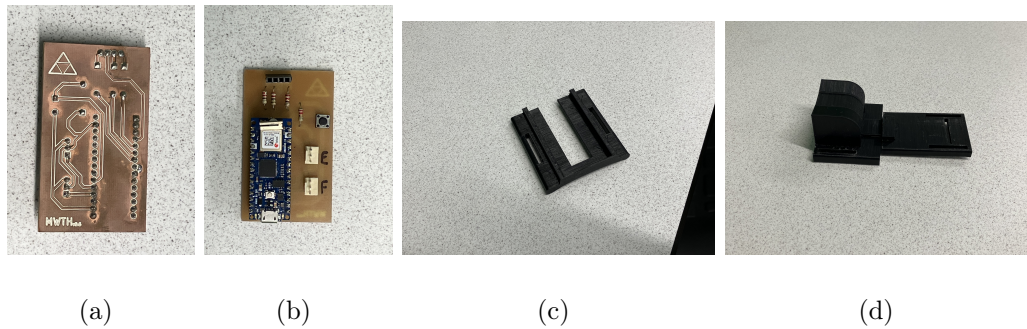


Figura 3.4: (a) Circuito impreso en cobre; (b) Sistema embebido de recolección de los datos desde el sensor; (c) Impresión 3D para soportar la placa de cobre; (d) Impresión 3D para soportar el mando de control

3.1.2. Recolección de datos EMG

La recolección de los datos comienza a través de los electrodos adheridos sobre la piel del usuario, localizados sobre los músculos ulnares en el antebrazo. Estos electrodos se encuentran conectados de manera directa a los sensores mioeléctricos para que estos realicen un preprocesamiento y limpieza de las señales, para luego transmitirlos al sistema embebido Arduino Nano localizado en el brazo de la persona, soportado por una de las piezas realizadas mediante impresión 3D. La señal, discriminada por la programación del Arduino entre la flexión y la extensión de la muñeca es convertida en un valor numérico más fácil de analizar, para luego ser enviada a través de un puerto de comunicación del computador donde el videojuego determina a partir de dicho valor qué acción desea realizar el usuario.

Prótesis Avanzadas

Teniendo al EMG como proceso seleccionado para la realización del experimento, se tomó como referencia para su aplicación el diseño de las prótesis de manos desarrolladas por Prótesis Avanzadas en la ciudad de Medellín, Colombia (ver Figura 3.5).

Estas herramientas hechas mediante manufactura aditiva, utilizan sensores de electromiografía y que a través de un sistema embebido captan las señales eléctricas provenientes del usuario y las transforman en comandos para manifestarse en la prótesis en uno de los seis gestos posibles: palma abierta, puño cerrado, puño cerrado con el pulgar sobre el lateral, puño cerrado con el pulgar levantado, puño cerrado con el dedo índice levantado y agarre tripodal (usando los dedos pulgar, índice y medio) [2]. De estos se seleccionaron por limitaciones del mando de control y para mantener la simetría el de la palma abierta, un agarre pinza similar al tripodal, puño cerrado y puño cerrado con el dedo índice levantado.



Figura 3.5: Prótesis manufacturada por la empresa Prótesis Avanzadas.

3.2. Juego desarrollado

En esta sección se hablará acerca de los componentes del videojuego serio, titulado Elemental Magic: Ghost and Life Training , que de ahora en adelante , será denominado por las siglas EM:G nLT.

3.2.1. Componentes del Juego

Este videojuego fue realizado en el motor de desarrollo Unity en su versión 2022.3.18f1 debido a su estabilidad y al mantenimiento constante que la compañía le da.

Dicho motor se instaló en un computador Z1 Enty Tower G6 de la marca Hewlett Packard, que cuenta con un procesador Intel Core i7 de 2.9 GHz, una RAM de 8 GB y tarjeta gráfica integrada Intel UHD Graphics 630. Para el uso de la realidad virtual se recomienda el uso de una tarjeta gráfica dedicada, por lo que se adicionó una Radeon RX550.

El videojuego sigue la manera en la que el motor Unity construye los programas y se divide en cuatro escenas. La primera consiste de un menú principal con una opción para calibrar los sensores de EMG y otra para iniciar el juego (ver Figura 3.6 (a)). La calibración se logra haciendo que el usuario haga un esfuerzo en el músculo objetivo a un nivel en el que se encuentre cómodo y que entonces este se seleccione como el umbral de aceptación de la señal en el videojuego (ver Figura 3.6 (b)).

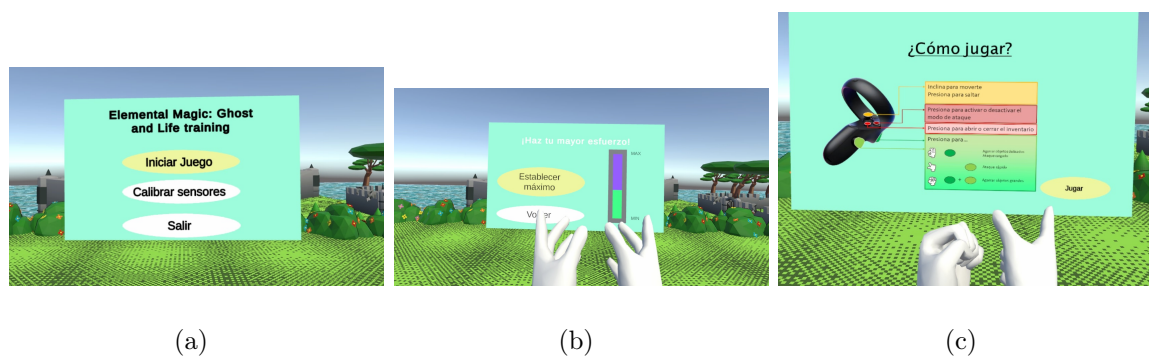


Figura 3.6: (a) Menú principal; (b) Pantalla de calibración de uno de los sensores; (c) Pantalla de tutorial siendo el mando izquierdo aquel que se sujeta

Cuando se selecciona la opción de iniciar el juego, se le ofrece al participante seleccionar entre modo zurdo y diestra, que depende de la mano que sujeta el mando de control y

luego le enseña una pantalla que describe qué hace cada botón de dicho mando (ver Figura 3.6 (c)).

Tras esta selección, el usuario es enviado a la primera escena propia del juego que corresponde a la vivienda del personaje que encarna. En esta se presenta la oportunidad de experimentar por primera vez con los controles, ofreciendo la posibilidad de salir del cuarto principal, agarrar objetos de diferentes maneras dependiendo de si es compacto o delicado para posteriormente poder lanzarlos a voluntad, presionar botones que activarían una caldera, y finalmente agarrar un cerrojo que abre el portón principal. Después de abrir esta puerta se redirige al usuario a la tercera escena, la isla en la que se encuentra el personaje. En esta se puede ver el exterior de la casa de la anterior escena y, de desearlo así, el participante puede volver a entrar a esta (ver Figura 3.7).

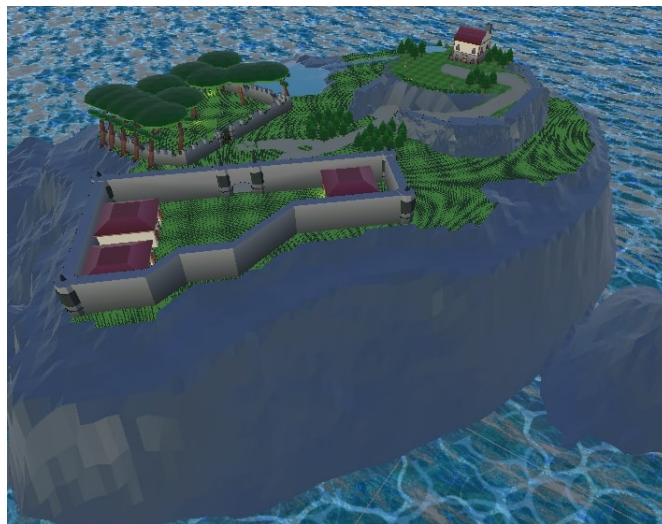


Figura 3.7: Isla del videojuego.

También se puede explorar el resto de la isla, en la cual se encontrará con dos amistosos espantapájaros que funcionan como sujetos de prueba para la utilización de los encantamien-

tos que se pueden realizar con las manos. Estos son proyectiles que surgen de la mano del jugador, y que al impacto pueden realizar daño a las entidades que encuentren (ver Figura 3.11). En el caso de los espantapájaros estos únicamente tendrán una animación de impacto para indicar que han recibido daño, sin embargo esto es visual pues estos son inmunes a cualquier ataque del jugador para que este pueda entrenar el combate de manera ilimitada.

Alejándose entonces de la residencia inicial, se encuentran dos edificaciones imponentes que corresponden a la aldea y el cementerio, siendo la primera de ambientación y el segundo accesible abriendo el portón, donde finalmente se encuentra el cementerio. En esta edificación oscura se pueden ver espíritus volviendo desde el más allá desde sus lápidas. En este escenario se aprovechará el entrenamiento con los espantapájaros y el objetivo ahora será utilizar estos encantamientos para devolver a los fantasmas a donde corresponden en el inframundo (ver Figura 3.8).

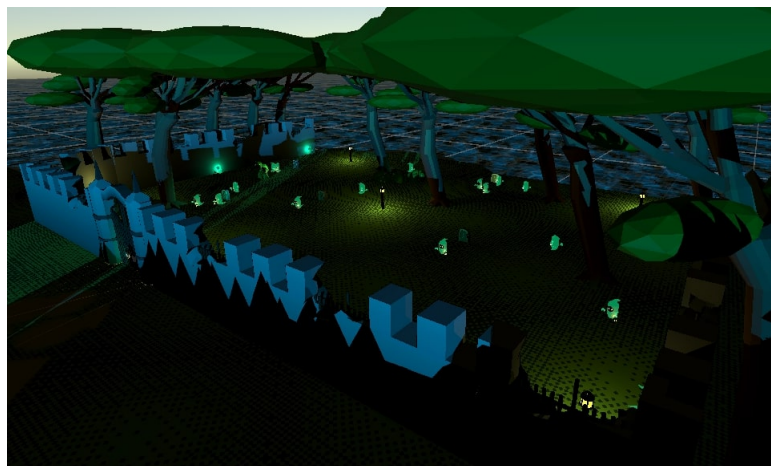


Figura 3.8: Cementerio.

Como recompensa, cada uno de los entes que sea derrotado dejará tras de sí un cristal coleccionable cuyo diseño corresponderá al último elemento mágico que el usuario

haya utilizado, fomentando entonces el uso de cada una de las opciones de ataque que se tiene (ver Figura 3.12).

El jugador explora todo este mundo encarnando un personaje con el cual puede desplazarse y saltar libremente utilizando la palanca análoga del mando de control que sujeta completamente con la mano. De este personaje únicamente son visibles sus manos y un punto de referencia en el suelo, que el usuario puede utilizar para posicionarse en el mundo real y así, no presentar discrepancias en los movimientos dentro del mundo virtual.

Por otro lado, las manos pueden realizar cuatro gestos que cumplen cada una con un objetivo: la palma abierta habilita el agarrar los objetos, la pinza (también llamado “OK”) se realiza para agarrar objetos delicados como flores o botellas pequeñas (ver Figura 3.9), el dedo índice apuntando para presionar botones y el puño cerrado para sujetar objetos más grandes o abrir cerraduras (ver Figura 3.9).

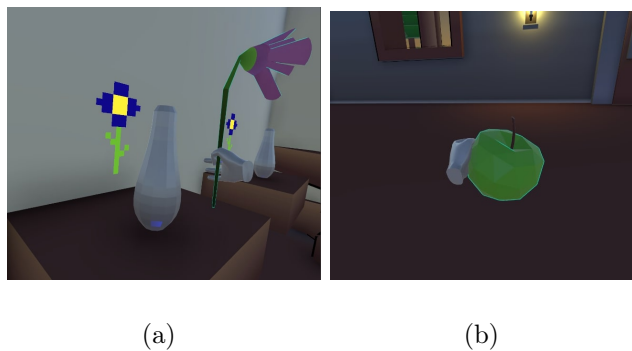


Figura 3.9: (a) Agarre de una flor con la pinza; (b) Agarre de una manzana con el puño

Dichos gestos son realizados por cada una de las cuatro combinaciones posibles que se dan por presionar los dos gatillos del mando. En el caso de la mano que se simula a través de los sensores de EMG, tras flexionar la muñeca una vez y activar el sensor sobre el músculo flexor, se envía una señal digital que simula uno de los botones del mando de control y se le presenta al usuario un menú en forma de ruleta con representaciones de los cuatro gestos

posibles, resaltando aquel que está seleccionado. Para cambiar la selección el usuario debe de extender la muñeca y simular a través de la señal digital que presiona un botón diferente en el mando, repitiendo la acción cuantas veces sean necesarias para alcanzar la opción deseada, que posteriormente se confirmará flexionando la muñeca otra vez y cerrando el menú. En ese momento se verá efectuado el gesto en el modelo de la mano y se realizará la acción asociada como se aprecia en la figura 3.10.

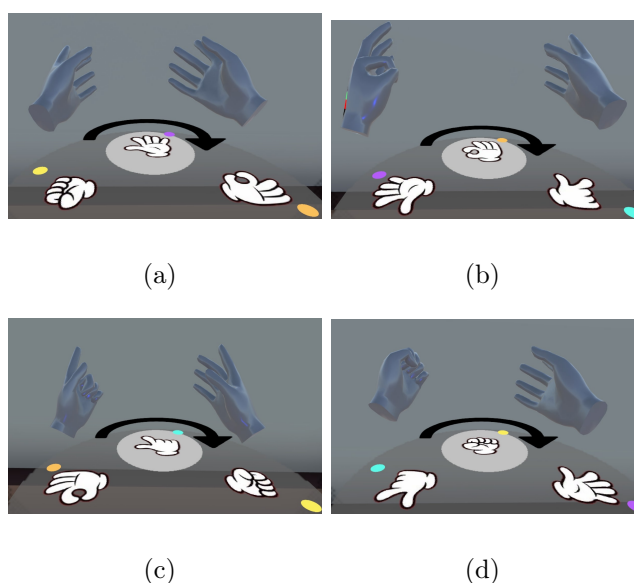


Figura 3.10: Cambio del gesto de la mano izquierda utilizando los sensores, siendo palma abierta (a), pinza (b), apuntar con el dedo índice (c) y puño cerrado (d)

Tras presionar uno de los dos botones principales en el mando, se activará el “modo de ataque”, que cambia ligeramente las acciones que puede realizar el jugador. Si bien el cambio de los gestos se mantiene tanto para la mano real (aquella que sujeta el mando) como para la mano virtual (aquella que se controla por medio de sensores), ahora se diferencian las acciones asociadas a estas dependiendo de con cuál se realice el cambio.

Para la mano real, que simula la mano saludable, la palma abierta habilita el agarrar objetos; el pellizco invoca un ataque que el jugador puede cargar para luego dispararlo a varios objetivos a la vez; el apuntar con el índice invoca pequeños proyectiles que viajan

en línea recta siguiendo la orientación del dedo (ver Figura 3.11). En el modo de ataque el cerrar el puño pierde utilidad para fomentar el uso de la mano virtual. Por parte de la mano virtual, cada uno de los gestos cambia el elemento mágico al ser seleccionado, pasando por uno neutral de color morado con la palma abierta, fuego de color naranja con el pellizco, hielo de color azul apuntando con el dedo y relámpago de color amarillo con el puño cerrado (Ver Figura 3.11).

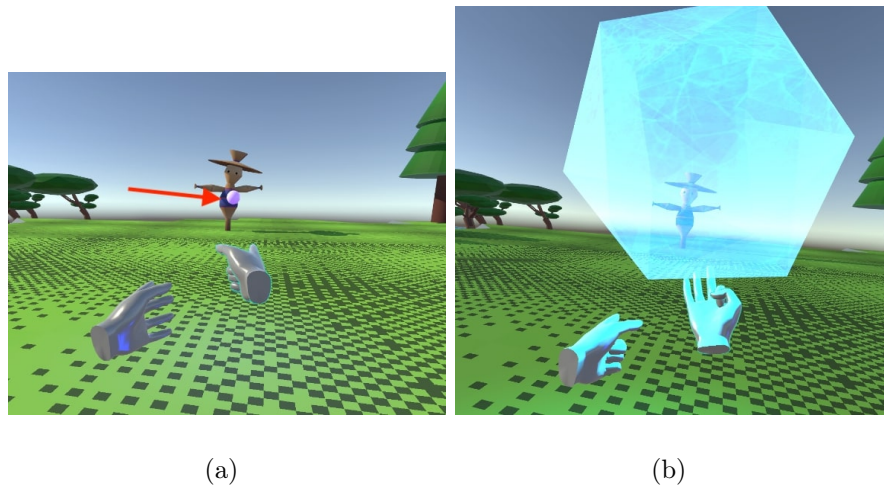


Figura 3.11: (a) Ataque usando el gesto de apuntar con el dedo índice en la mano derecha, con el elemento correspondiente al gesto de la mano abierta. Proyectil señalado por una flecha; (b) Ataque usando el gesto de pinza en la mano derecha, con el elemento correspondiente al gesto de apuntar con el dedo

Este último gesto también cumple con la acción de que, mientras el modo de ataque esté activo, cualquier objeto que se agarre se guarde en un inventario mágico (ver Figura 3.12). Dicho inventario mágico habilita la posibilidad de mantener un objeto entre escenas, con un límite de seis objetos (sin incluir los cristales) .

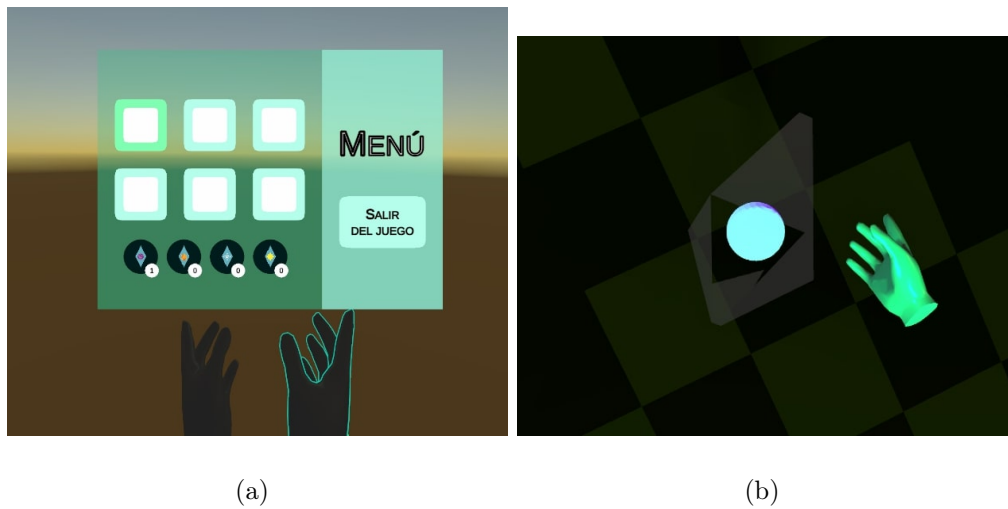


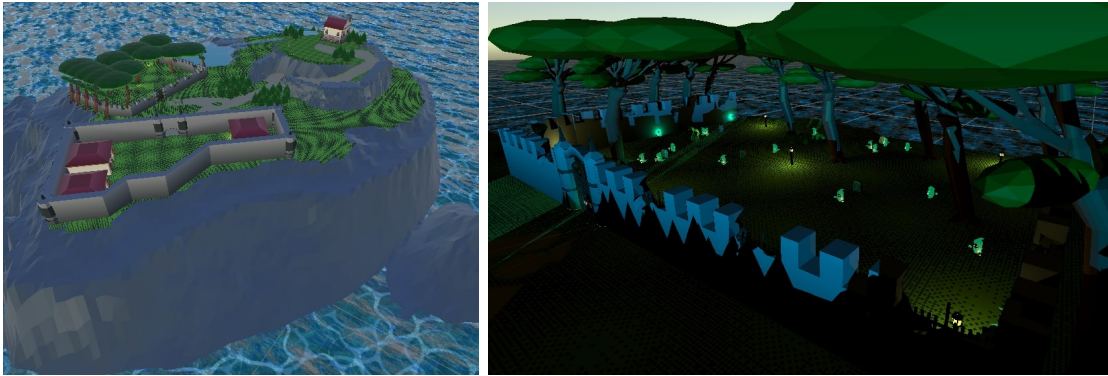
Figura 3.12: (a) Pantalla del inventario con un cristal recolectado; (b) Mano junto al cristal que dejan los fantasmas

3.2.2. Actividades del juego y motivación

El videojuego se propuso con una historia simple que explicara la motivación que tendría el personaje controlado por el usuario. Este encarnaría el líder de una aldea situada en una isla en medio del océano, con una residencia apartada al resto de la población en la que contaría con un cuarto propio para decorar y una cocina (Ver figura 3.13(a)).

Dicho personaje contaría con la capacidad de realizar encantamientos mágicos los cuales ejecuta con una mano (aquella que el usuario controla completamente utilizando el mando), mientras que la restante (a través de los sensores electromiográficos) se encargaría de intercambiar el elemento del encantamiento. Armado con estas habilidades arcanas, el líder de la aldea se convierte en el único capaz de confrontar los espíritus malditos de aquellos que pasaron al más allá, que si bien confinados en un espacio cerrado, merman la tranquilidad de los pueblerinos (Ver figura 3.13 (b)).

Conociendo el contexto del videojuego y del personaje que representan, a los participantes se les indicó completar tres objetivos dentro de la simulación.



(a)

(b)

Figura 3.13: (a) Isla principal del videojuego; (b) Cementerio

La puerta cerrada

Dentro de la casa del líder existe una puerta que no posee ningún cerrojo, sin embargo a ambos lados de dicho portón se encuentran tres grabados muy claros: dos flores y un cuadro. Se le indicó al participante que el objetivo de esta primera actividad consistía en acceder a la habitación secreta, colocando flores dentro de jarrones y colgando un cuadro en un gancho en la pared, junto a los grabados correspondientes en el orden presentado en la figura 3.14. Fuera de la ambientación del videojuego, el objetivo de esta actividad era la ejecución de la acción de agarre de un objeto grande, utilizando al mismo tiempo la mano que sujeta el mando de control y aquella que se estudia mediante los sensores electromiográficos (Ver figura 3.15).

Alquimia en la cocina

Aún dentro de la casa principal, se presenta la existencia de una caldera apagada y varios ingredientes dispersos sobre un mesón en el centro de la pequeña cocina. Se le indicó al participante que el objetivo de esta segunda actividad consistía en encender el fogón bajo la caldera, agarrar dos ingredientes que fueran una combinación entre manzanas y flores, y que



Figura 3.14: Escenario principal de la primera actividad resuelta con la puerta abierta.



Figura 3.15: Jugador sujetando un cuadro con ambas manos.

cuando los dejara dentro del contenedor, presionar un botón para cocinar dichos ingredientes y preparar una poción. Esta última debía agarrarse y dejarse sobre el mesón, antes de volver

a apagar el fogón utilizando el mismo método con el que se encendió (ver Figura 3.16).

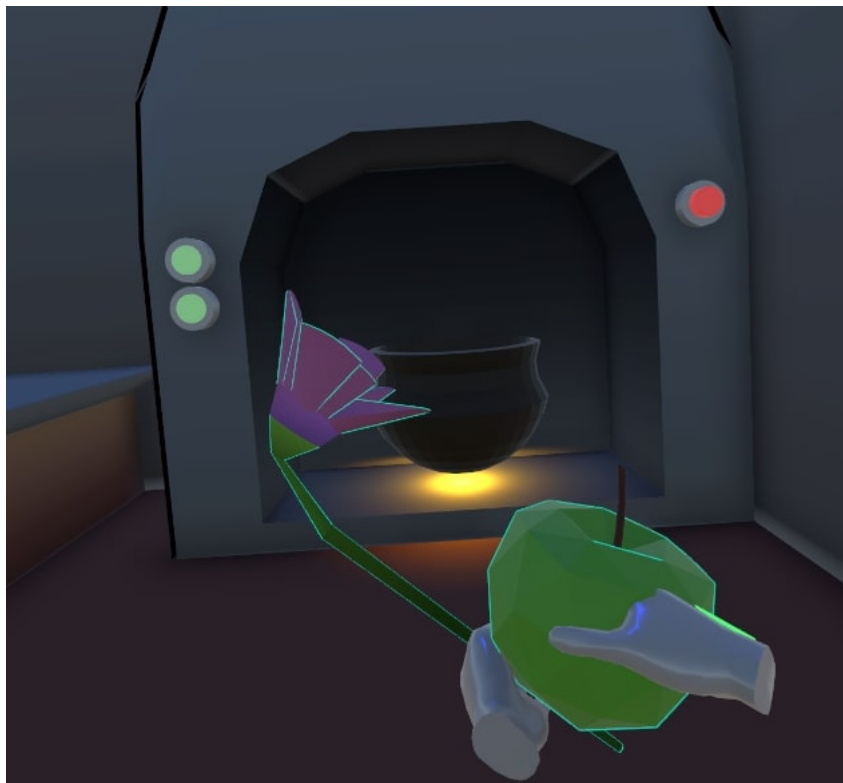


Figura 3.16: Vista del jugador en medio de la actividad, sujetando los ingredientes frente a la caldera encendida, indicado por el fuego y los botones a la izquierda.

Fuera de la ambientación del videojuego, el objetivo de esta actividad era fomentar el posicionamiento de ambas manos de una manera coordinada, así como el cambio de gestos utilizando los sensores de EMG con el fin de presionar los botones para encender y apagar el fogón.

Devolver los fantasmas al más allá

Saliendo de la casa principal y atravesando la isla se encuentra el cementerio, el cual en su interior varios fantasmas andan rondando y alterando la paz de la aldea (ver Figura 3.17). Se le indicó al participante que el objetivo de esta tercera actividad consistía en disparar

a los espíritus errantes hasta que su barra de energía llegase a cero para luego guardar los cristales que estos dejaban en el suelo al desaparecer en el inventario mágico, hasta completar un total de cinco.

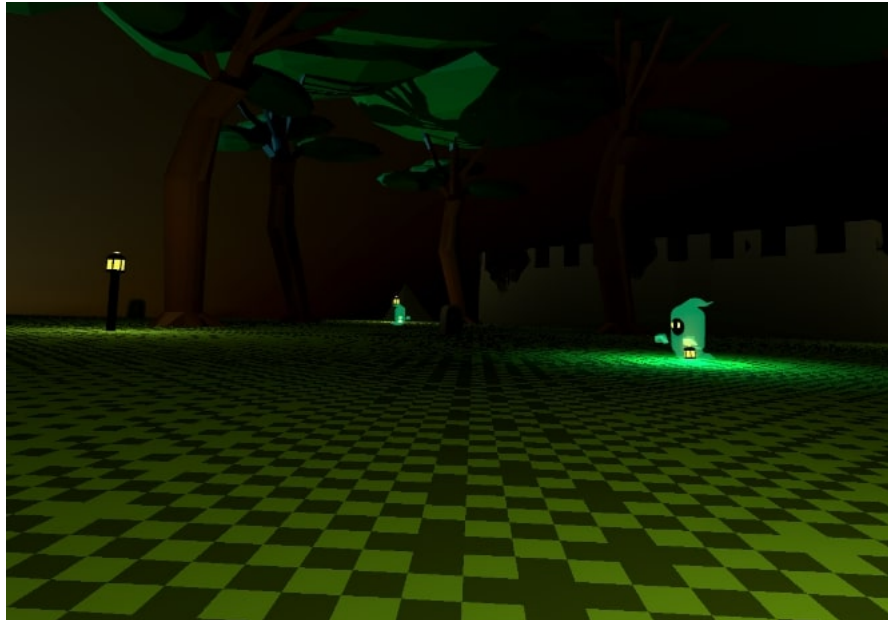


Figura 3.17: Vista del jugador en medio de la tercera actividad, frente a los fantasmas que aún no advierten su presencia.

Fuera de la ambientación del videojuego, el objetivo de esta actividad es evaluar la repetición de la acción de abrir y cerrar la mano virtual, todo esto en una situación medianamente estresante en la que la agilidad representa una virtud.

Recuento o Actividad general

Finalmente, a los participantes se les indicó volver a realizar todas las actividades en un único intento con el fin de estudiar la eficiencia del usuario después de haberse familiarizado con el videojuego y sus controles en tres escenarios distintos

3.3. Diseño del experimento

En esta sección se discutirá el procedimiento al cual serían sometidos los participantes en el experimento, tanto para la ejecución del videojuego como la posterior recolección de la percepción sobre el programa.

En la figura 3.18 se aprecia a uno de los participantes del experimento en la escena del tutorial de uso de los mandos de control.

En su mano derecha cuenta con el soporte para el sistema de recolección de datos y con el control que simula la prótesis de mano, y con la mano izquierda sujeta el otro mando con el que controla al personaje dentro de EM:G nLT.



Figura 3.18: Participante del experimento.

3.3.1. Metodología con los participantes

Se le solicitó a los participantes que dispusieran de un tiempo de noventa minutos, divididos en tres secciones que dependerían de la facilidad de localización de los músculos a estudiar y la agilidad propia de los participantes.

Inicialmente, se les presentó un consentimiento informado en el que se les comunicó el procedimiento del experimento, así como las implicaciones del mismo y aclarar que no se enfrentarían a ningún riesgo.

Tras confirmar la participación de los usuarios, se inicia el proceso de localización de los músculos Flexor ulnar del carpo y Extensor ulnar del carpo, para luego limpiar la región de la piel que los recubre y adherir los electrodos directamente conectados a los sensores mioeléctricos. Para verificar que dichos electrodos se encuentran en la posición óptima para la recolección de las señales, se visualizan los datos crudos en la interfaz del Arduino Nano. Esto se aprovecha también para enseñar a grandes rasgos cómo los esfuerzos del participante son recibidos por el sistema.

Apenas se tenga la verificación de la recolección correcta de los datos de EMG, se colocó en el antebrazo elegido por el usuario una carcasa impresa en 3D (ver Figura 3.4 (d)) encargada de sujetar uno de los mandos de control (ver Figura 3.3) para el seguimiento de los movimientos, simulando así el uso de una prótesis de la mano.

Teniendo ya el entorno físico dispuesto adecuadamente para la realización del experimento, se le explicó al participante de manera superficial la manera de controlar su personaje dentro del videojuego, las acciones que puede hacer con el mando de control que puede sujetar con la mano que corresponde al antebrazo que no tiene los sensores de EMG y aquellas que puede realizar a través de los sensores de EMG ubicados en el antebrazo. Finalmente, antes de entrar a la realidad virtual se le enseñó a la persona la manera de calibrar los

sensores para que su experiencia se ajustara a sus capacidades (ver Figura 3.6 (b)), antes de dar las indicaciones sobre cuál de las cuatro actividades realizaría.

Además se desarrollaron dos cuestionarios, en los cuales el usuario calificaría su experiencia después de cada una de las actividades, y el desafío físico y conceptual que representó el videojuego en su totalidad.

3.3.2. Cuestionarios de experiencia del usuario

Cada uno de los participantes del experimento completó dos cuestionarios escritos. El primero se realizó en medio de la sesión, específicamente al finalizar cada uno de los ejercicios para dar una retroalimentación de los mismos de una manera más precisa. Este consistió en doce preguntas que, con respuestas en una escala de uno (“totalmente en desacuerdo”) a cinco (“totalmente de acuerdo”), se basa en la encuesta de usabilidad SUS [5] para cuantificar la condición física del participante, así como su percepción del videojuego serio y entender cuáles son los puntos débiles y fuertes del mismo (ver Tabla 3.1).

El segundo y último cuestionario consistió de cuatro preguntas abiertas, que buscaban como respuesta los ejercicios que parecieron más demandantes de manera tanto física como cognitiva, para así entender si existe alguna relación entre la progresión del experimento y el entendimiento del mismo con el éxito y satisfacción del participante (ver Tabla 3.2).

	Atributo
1	Utilizaría este entrenamiento virtual frecuentemente
2	Encuentro el entrenamiento virtual innecesariamente complejo
3	Pensé que el entrenamiento virtual fue sencillo de usar
4	Creo que podría necesitar el apoyo de un experto para el uso de este entrenamiento virtual
5	Encontré que las funciones en este entrenamiento virtual estuvieron bien integradas
6	Me pareció que hubo mucha inconsistencia en este entrenamiento virtual.
7	Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a usar este entrenamiento virtual rápidamente
8	Encontré este entrenamiento virtual bastante incómodo de usar
9	Me sentí bastante confiado utilizando este entrenamiento virtual
10	Necesité aprender muchas cosas antes de poder utilizar correctamente este sistema
11	Nivel de agotamiento
12	Nivel de mareo

Tabla 3.1: Atributos de la escala de usabilidad del sistema

Grupo de Estudio

En la realización del experimento, todos los participantes realizaron tres escenarios completamente idénticos, teniendo los mismos parámetros iniciales y la experiencia dependió exclusivamente de cada participante.

En todo momento, estos participantes fueron supervisados por el investigador principal para garantizar su seguridad dentro del entorno virtual, dada la pérdida de percepción del exterior o mundo físico.

	Pregunta
1	¿Cuál actividad le pareció la más sencilla a nivel conceptual? ¿Por qué?
2	¿Cuál actividad le pareció la más complicada a nivel conceptual? ¿Por qué?
3	¿Cuál actividad le pareció la menos demandante físicamente? ¿Por qué?
4	¿Cuál actividad le pareció la más demandante físicamente? ¿Por qué?

Tabla 3.2: Preguntas de percepción

Procesamiento de Datos

Los datos fueron recolectados de dos maneras distintas, correspondientes tanto a *EM:G nLT* como a la percepción de los participantes. Dentro del videojuego serio, se recolectaron las lecturas de electromiografía de manera discriminada para los dos sensores diferentes, así como de la variable equivalente a la señal digital, que simula que se presiona un botón del mando dependiendo de su valor. Fuera del programa, se presentaron los cuestionarios mencionados en la sección 3.3.2 para medir la percepción de los participantes.

Criterios de exclusión

Los participantes no pueden ser menores de edad para poder autorizar el tratamiento de sus datos. Tampoco pueden presentar antecedentes que les impida el uso de la tecnología de RV, limite su movilidad de manera parcial o total, y que tampoco presenten dificultad o inhabilidad de leer y comprender el consentimiento informado.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

Esta sección será dedicada a enseñar los resultados de este experimento en forma de gráfica, acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

4.1. Ejecución del experimento

Antesala

Durante el periodo de pruebas se contó con la participación de catorce personas, divididos en once hombres y tres mujeres. De estos catorce participantes, diez afirmaron haber tenido experiencia previa en el uso de videojuegos de manera regular. Ninguno de ellos afirmó usar la RV repetidamente.

Como se explicó en la sección de metodología, se empezó por la limpieza de la piel del antebrazo de la persona usando un algodón y alcohol antiséptico, para luego localizar los músculos. Esto se realizó solicitando que la persona hiciera las acciones de flexión y extensión de la muñeca, además de abrir y cerrar la mano dado que los músculos implicados son adyacentes a aquellos que se desean estudiar. Tras tener las regiones óptimas de detección se le adhirieron a la piel los electrodos, conectándolos inmediatamente al sensor que recolecta las señales y a través del sistema embebido (ver Figura 3.4a,b) al computador, en el que se le enseñaba al participante cómo se visualizaban sus esfuerzos a través de las gráficas que se

comunicarían al videojuego serio.

Con el sistema de recolección de datos dispuesto para el experimento, se equipó al participante con los soportes impresos en 3D como se muestra en la Figura 4.1, que permitiría cierta libertad de movimiento sin perder el seguimiento que ofrece el mando de control de las Oculus Rift S.

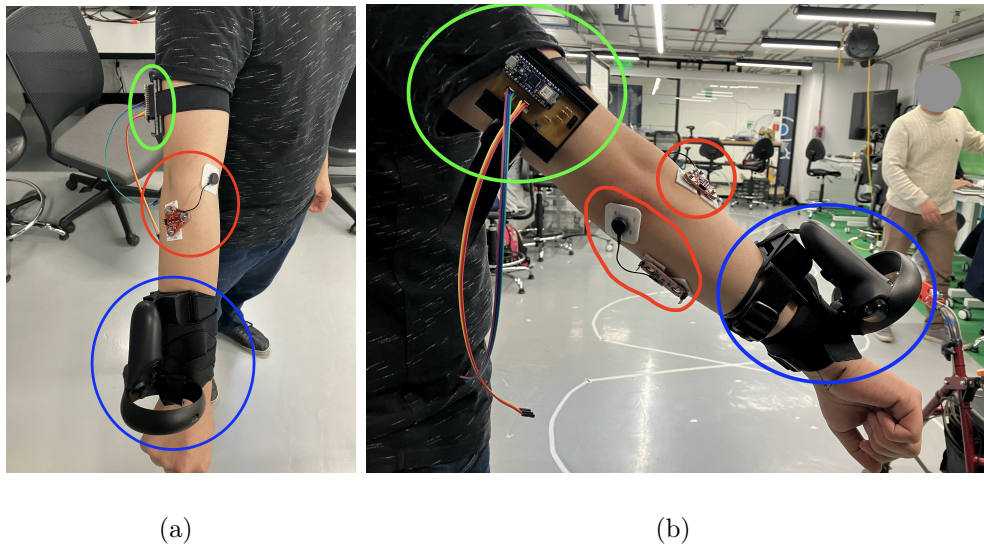


Figura 4.1: (a) Vista frontal del sistema de recolección completo; (b) Vista lateral del sistema de recolección completo. En rojo se resalta el sensor y los electrodos, en verde el sistema embebido que comunica los sensores con el computador, y en azul el mando de control que simularía la prótesis

Ejecución

Como se explicó anteriormente, los participantes interactuarían con el juego serio EM:GnLT a través de la realidad virtual, con un control de mando de libre uso en una de las manos y el otro en el ensamble situado en el antebrazo con los sensores de EMG, que manipularía de manera limitada al ser la simulación de la prótesis de mano (Ver Figura 4.2.



Figura 4.2: Jugador realizando una de las actividades. En el monitor se aprecia lo que el participante está observando en tiempo real.

4.2. Resultados del experimento

De los catorce participantes, dos no realizaron las últimas dos actividades y un tercero no fue exitoso en la finalización de la actividad en las que repiten las tres anteriores. Sin embargo los datos fueron utilizados en el análisis de las señales así como en la encuesta de usabilidad, dado que iniciaron con las actividades del juego, aún si su final no fue exitoso. Los demás participantes completaron satisfactoriamente todas las actividades indicadas.

4.2.1. Calibración de los sensores

Como se mencionó en la metodología del experimento, en el menú principal anterior a las actividades del juego EM:G nLT se le solicitó a los participantes realizar una calibración del sensor para cada uno de los dos movimientos a estudiar, para que así se ajustara

a sus capacidades y comodidad. Dicha calibración permitía al procedimiento del videojuego establecer un umbral para las señales musculares, y cualquiera que sobrepasara el valor del umbral establecido significaría que el usuario deseaba realizar la acción como si de presionar un botón se tratase. Este umbral se definió a través de la pantalla de calibración enseñada en la Figura 3.6, dependiendo enteramente del participante y el esfuerzo que realizaran en los movimientos a estudiar. Estos movimientos siendo la flexión y la extensión cumplían con la función de abrir el menú de gestos y el cambio de los mismos, respectivamente 3.10.

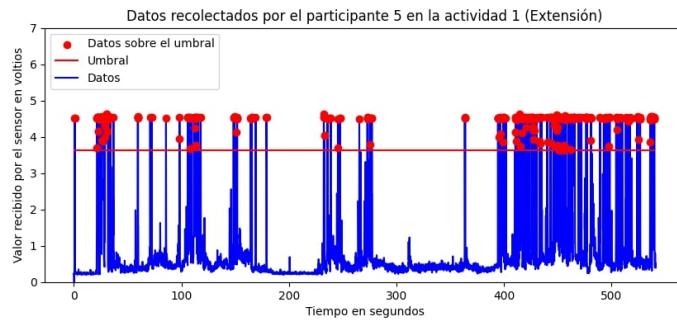
Como un ejemplo de esto, se enseña a continuación en dos gráficas diferentes obtenidas de la participación de una de las personas en la primera actividad. En color azul se tienen todos los datos de la actividad, mientras que el resaltado rojo corresponde a aquellos datos que el sistema reconoció con la acción correspondiente al movimiento (ver Figura 4.3).

Dada que cada una de las actividades poseía una calibración, los participantes podían ir ajustando los umbrales de activación para las acciones acorde a lo que consideren pertinente, ya sea por su nivel de agotamiento o por entender que el nivel de esfuerzo no es el adecuado.

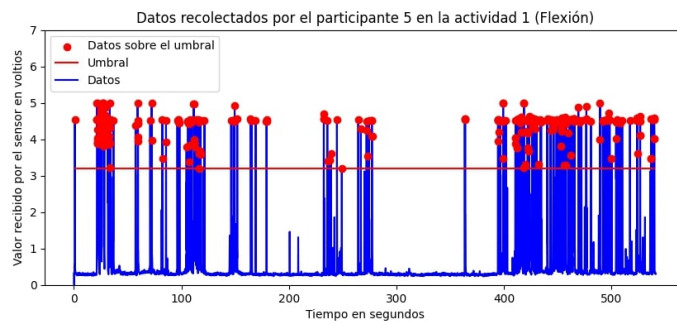
En la Figura 4.4 se enseña la distribución de los umbrales tanto para la actividad de la flexión como de la extensión de la muñeca. Tanto en la Figura 4.4a como 4.4b, se puede apreciar una tendencia a decrecer de estos umbrales de activación.

4.2.2. Tiempo de ejecución

Buscando ofrecer a los usuarios una mejoría en los tiempos de entrenamiento, la duración de cada una de las actividades y las similitudes que estas presentan entre cada

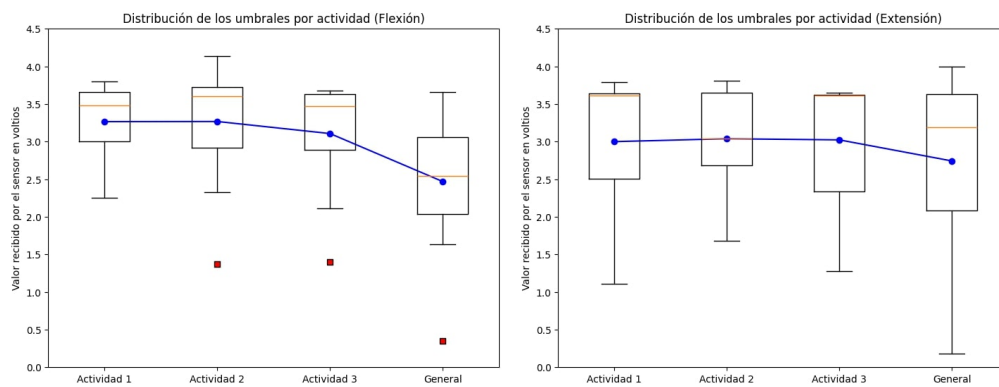


(a)



(b)

Figura 4.3: Gráficas correspondientes a la actividad de extensión (a) y flexión (b) de la muñeca, con los valores de activación y umbral de calibración.



(a)

(b)

Figura 4.4: Distribución del umbral de activación de la (a) flexión (b) y extensión de la muñeca por cada una de las actividades, así como de la media en cada una.

uno de los usuarios resulta un punto clave a analizar en este experimento. Por cada uno de los instantes en que el videojuego refresca la imagen, determina cuánto ha pasado desde el último cambio. Esto es llamado el tiempo delta, el cual también es utilizado para contar el periodo desde el inicio del programa. Por precisión, del tiempo total de cada actividad es restado el valor del instante en que se recolecta el primer dato, indicando el inicio de la actividad. Discriminando por cada una de las actividades, se obtiene la siguiente Figura 4.5 para cada uno de los participantes .

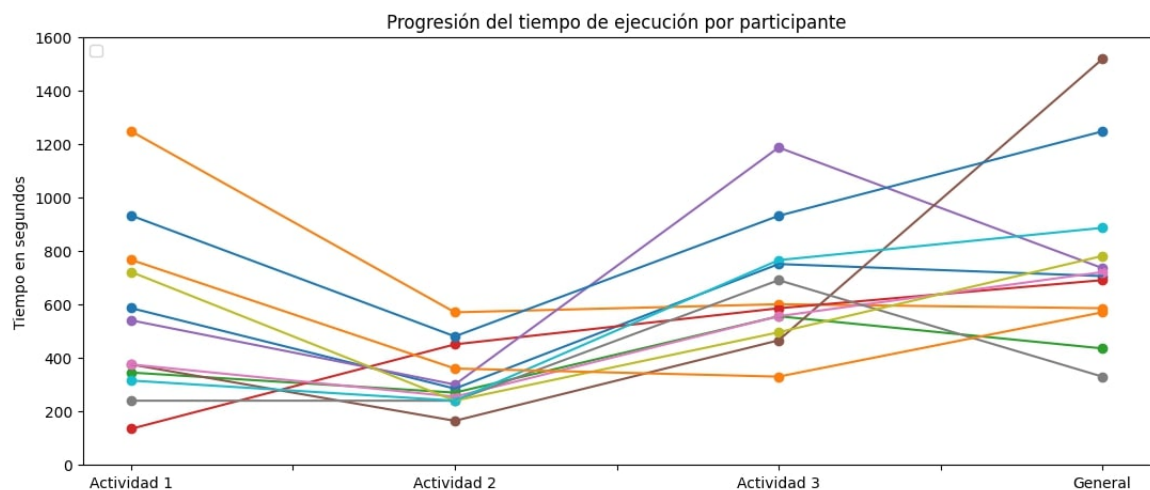


Figura 4.5: Tiempos de ejecución por actividad de cada uno de los participantes, discriminados de forma de que cada uno corresponde a un color diferente. Actividad 1: abrir la puerta secreta colocando un cuadro y dos flores en su lugar. Actividad 2: encender el fuego de una caldera y preparar dos pociones. Actividad 3: derrotar fantasmas y recoger los cristales que dan como recompensa. General: repetición de las 3 actividades anteriores

Para entender mejor la distribución de los tiempos de ejecución por actividad, se generó la Figura 4.6. Se puede apreciar que el paso de la primera actividad a la segunda, la distribución presenta una reducción del tiempo promedio para solucionar este reto, siendo casi de la mitad. Sin embargo, al llegar a la tercera actividad se revierte este comportamiento

con una media de tiempo mayor a las anteriores, atribuido a la introducción de una mecánica de combate en la sección del juego que corresponde al cementerio, donde por primera vez usan los encantamientos (ver Figura 3.11), además de la mecánica preestablecida de agarrar objetos.

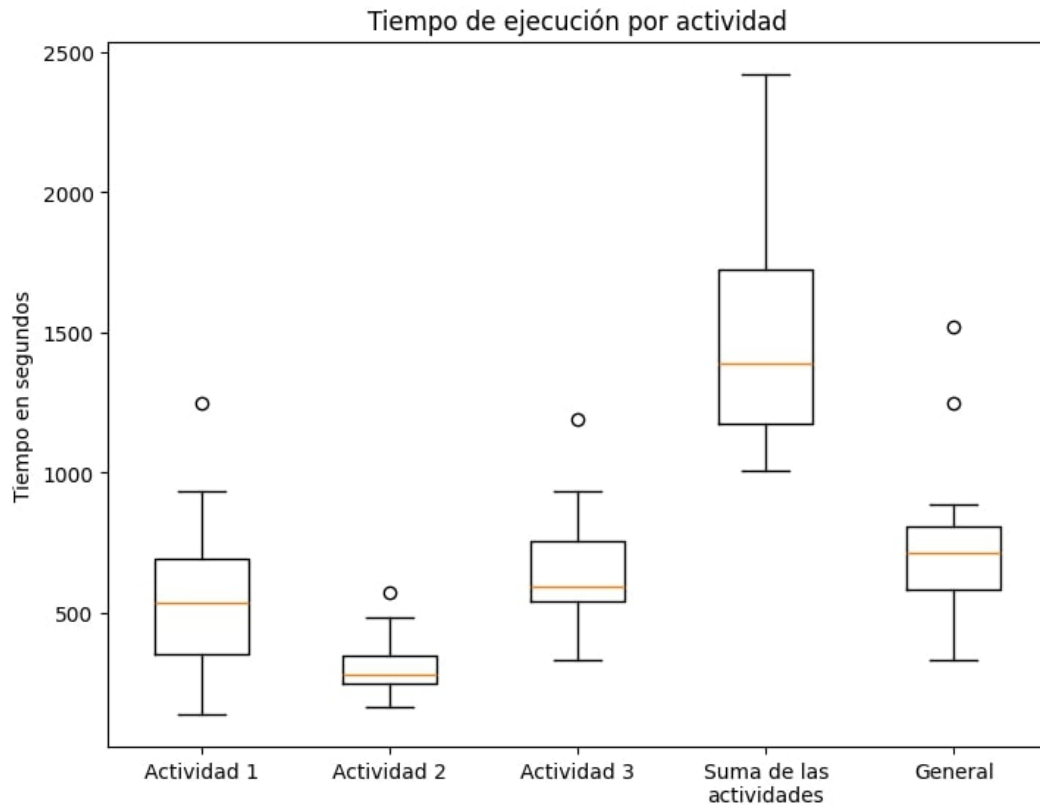


Figura 4.6: Distribución de los tiempos de ejecución por actividad.

En la Figura 4.6 se añadió un punto adicional, que representa la suma del tiempo de las primeras tres actividades. Apreciando la diferencia entre la distribución de esta suma y aquella que corresponde a su análogo que es la actividad de recuento, se observa que esta última es considerablemente menor. Es un resultado positivo, pues implica que tras la repetición y adaptación a cada una de las actividades, se percibe una mejoría de la eficiencia

en la realización de estas.

4.2.3. Percepción

Al final de cada una de las actividades, se le solicitó a los participantes dar la percepción en cada uno de los atributos en la escala de usabilidad (ver tabla 3.1) con un valor en el rango de uno que corresponde a “totalmente en desacuerdo” y cinco que corresponde a “totalmente de acuerdo”. En las tablas de la Figura 4.7 se indica la frecuencia de cada uno de los valores posibles dependiendo de las respuestas de los participantes.

En la escala de usabilidad del sistema los atributos se caracterizan por alternarse entre una

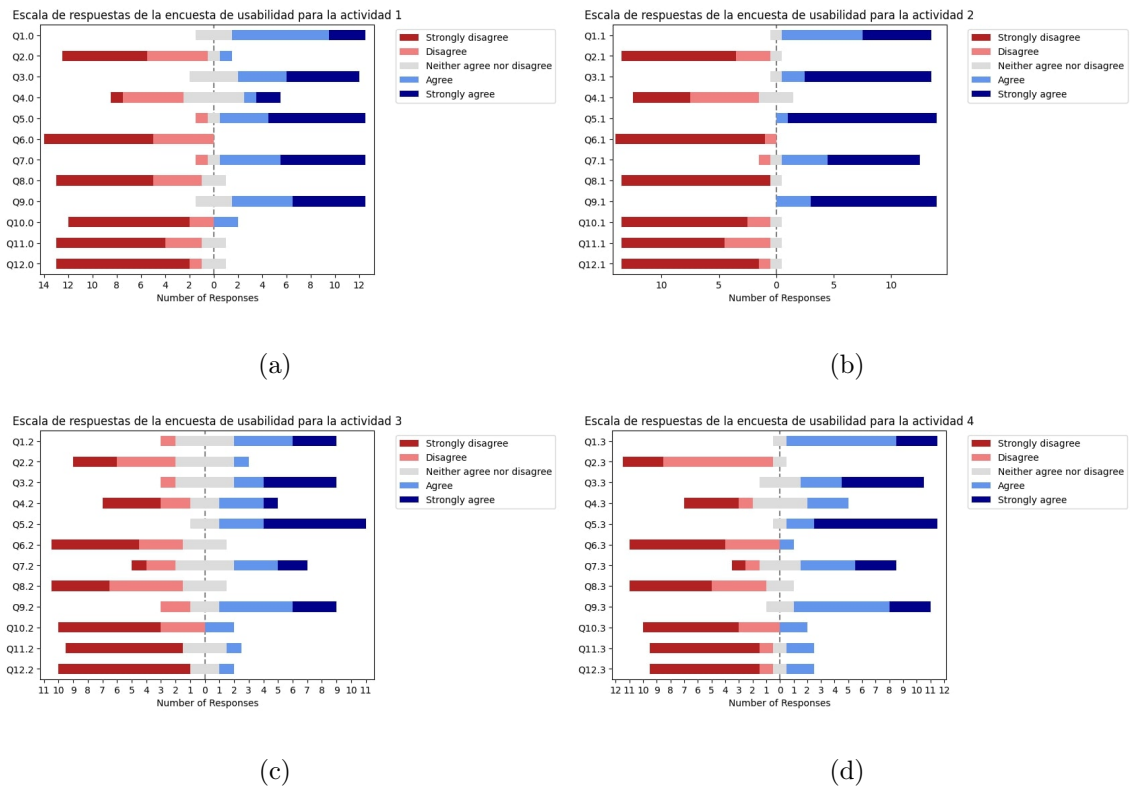


Figura 4.7: Cantidad de respuestas por cada una de los atributos mencionados en la tabla 3.1 por cada actividad. (a) Actividad 1; (b) Actividad 2; (c) Actividad 3; Recuento o Actividad general.)

perspectiva positiva y una negativa para evitar que se genere un sesgo por la naturaleza ágil del cuestionario adaptado de SUS (ver Tabla [5]). Teniendo en cuenta esto, se puede apreciar que para las cuatro actividades los atributos negativos presentan respuestas mayormente neutrales en desacuerdo, indicando que la efectividad, eficiencia y satisfacción en su uso -componentes de la usabilidad- se podrían encontrar en los rangos aceptables para el despliegue de un sistema, siendo en este caso un juego serio. Para proveer exactitud de estos datos, se obtuvo el promedio y desviación estándar de cada una de las actividades por separado y también de todas en conjunto, incluyendo la de recuento que incluye todas las actividades anteriores (Tabla 4.1). Para realizar el estudio de los datos, se restó el valor de uno de cada una de las respuestas para cuantificar el desacuerdo total con el valor de cero.

Volviendo a los resultados presentados en la Figura 4.7, se realizaría entonces la operación propia de la escala de usabilidad de un sistema para así determinar qué tan apropiado es para su despliegue, teniendo en cuenta los atributos positivos (atributos 1, 3, 5, 7 y 9 de la Tabla 3.1) y negativos (atributos 2, 4, 6, 8 y 10 de la Tabla 3.1)[[5]].

$$SUS = 2,5 \cdot (20 + \sum(\text{atributos positivos}) - \sum(\text{atributos negativos}))$$

Siguiendo se obtienen los puntajes de usabilidad de cada una de las actividades individuales así como su promedio y el recuento (ver Tabla 4.2).

De la Tabla 4.2 se evidencia que el puntaje del videojuego diseñado en promedio se mantiene cercano a aquel de la actividad de recuento, distinguiendo también la segunda actividad como un éxito rotundo, estando 12 puntos por encima de la primera actividad y

Atributo	Act. 1	Act. 2	Act. 3	General	Combinación
1	M: 3 D: 0.65	M: 3.36 D: 0.61	M: 2.75 D: 0.92	M: 3.17 D: 0.55	M: 3.04 D: 0.73
2	M: 0.71 D: 0.88	M: 0.36 D: 0.61	M: 1.25 D: 0.92	M: 0.83 D: 0.55	M: 0.81 D: 0.83
3	M: 3.14 D: 0.83	M: 3.71 D: 0.59	M: 2.92 D: 1.04	M: 3.25 D: 0.83	M: 3.27 D: 0.88
4	M: 1.86 D: 1.12	M: 0.86 D: 0.74	M: 1.58 D: 1.38	M: 1.5 D: 1.19	M: 1.44 D: 1.22
5	M: 3.36 D: 0.89	M: 3.93 D: 0.26	M: 3.42 D: 0.76	M: 3.67 D: 0.86	M: 3.56 D: 0.73
6	M: 0.36 D: 0.48	M: 0.07 D: 0.26	M: 0.75 D: 0.83	M: 0.58 D: 0.86	M: 0.46 D: 0.71
7	M: 3.29 D: 0.88	M: 3.36 D: 0.89	M: 2.25 D: 1.16	M: 2.58 D: 1.19	M: 2.85 D: 1.15
8	M: 0.57 D: 0.73	M: 0.14 D: 0.52	M: 0.92 D: 0.76	M: 0.67 D: 0.75	M: 0.6 D: 0.76
9	M: 3.21 D: 0.77	M: 3.79 D: 0.41	M: 2.75 D: 1.01	M: 3.08 D: 0.64	M: 3.17 D: 0.82
10	M: 0.57 D: 1.04	M: 0.29 D: 0.59	M: 0.75 D: 1.09	M: 0.75 D: 1.09	M: 0.63 D: 1.01

Tabla 4.1: Media (M) y Desviación Estándar (D) de las respuestas por cada uno de los atributos en la Tabla 3.1 y actividad

19 de la tercera. Como se vio anteriormente a través de la Figura 4.6, el reto de encender la caldera y preparar una poción fue la que consistentemente resultó más sencilla de finalizar y que la tercera, con la adición de la nueva mecánica, resultó en promedio ser la más demorada.

Actividad	Puntaje
1	79.82
2	91.07
3	72.08
Recuento	78.54
Promedio	80.99

Tabla 4.2: Puntaje de la escala de usabilidad del sistema

Las últimas dos preguntas buscaban mantener constancia del estado físico de los participantes en las áreas de agotamiento por el esfuerzo muscular y el mareo causado por el uso de la realidad virtual. Este último campo no se ahondará pues cumplía con la función de vigilar al participante y evitar algún accidente.

Respecto al agotamiento físico, los resultados expuestos en la Figura 4.8 no distinguen una tendencia por parte de los participantes, a diferencia del gráfico de cajas, en donde la tercera actividad presenta en promedio un nivel de agotamiento ligeramente mayor que las demás. Esto puede ser influido por la duración promedio de la tercera actividad, en la cual por el planteamiento requiere el intercambio de gestos de manera más seguida que las demás.

Los valores de la duración de la actividad y su distribución no se contradicen, dado un agotamiento físico menor en la actividad de recuento que al incluir todas las anteriores se pensaría que implica un esfuerzo más prolongado. Hay que tener en cuenta que en ese caso, como se enseña en la Figura 4.6, al ser la repetición de todos los anteriores retos –y similar a la transición entre la actividad 1 y 2- se reconoce de manera más sencilla el camino y los esfuerzos a realizar.

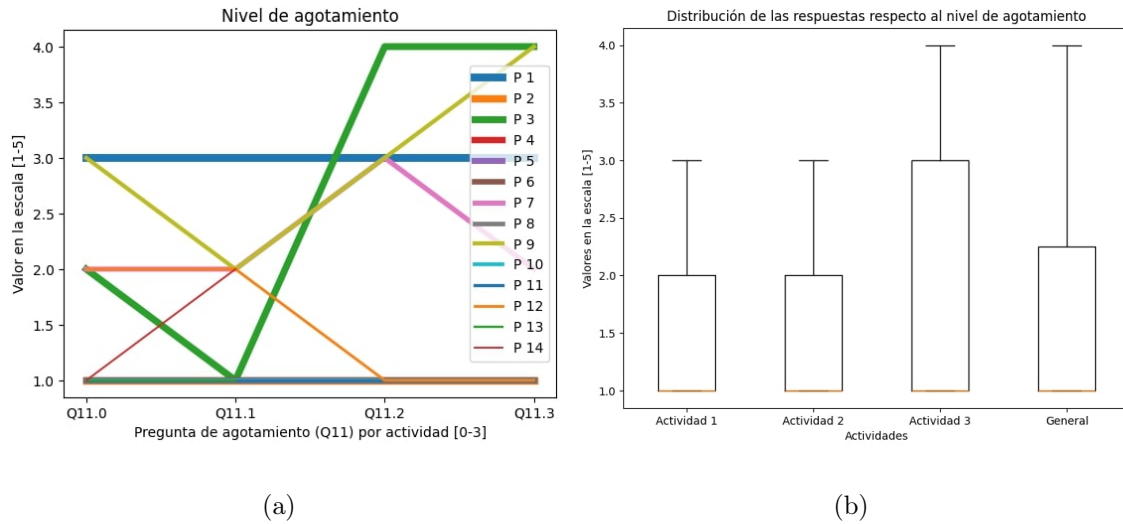


Figura 4.8: (a) Datos crudos del nivel de agotamiento por actividad; (b) Distribución del nivel de agotamiento por actividad

Esto cimienta la observación que implicaría una mejoría en el desarrollo del experimento a través de la repetición del mismo, pues es en la introducción de nuevas mecánicas (ya sea por inicio del experimento o una actividad desconocida) que el nivel de esfuerzo aumenta. Entra en este argumento de que un agotamiento residual no cambia los umbrales de activación sino que es la propia comodidad y conocimiento de los jugadores, retornando a la gráfica (4.4) donde en ambas acciones se presenta una tendencia decreciente.

4.2.4. Cuestionario de preguntas abiertas

Al finalizar la ejecución de todas las actividades y completar la encuesta de usabilidad (ver Tabla 3.1), se le indicó a los participantes responder las preguntas abiertas acerca de su percepción del experimento, conforme a la tabla 3.2. A partir de ésta, se realizó una gráfica para determinar la moda en cada uno de los atributos respecto a la demanda física y cognitiva de cada actividad (ver Figura 4.9).

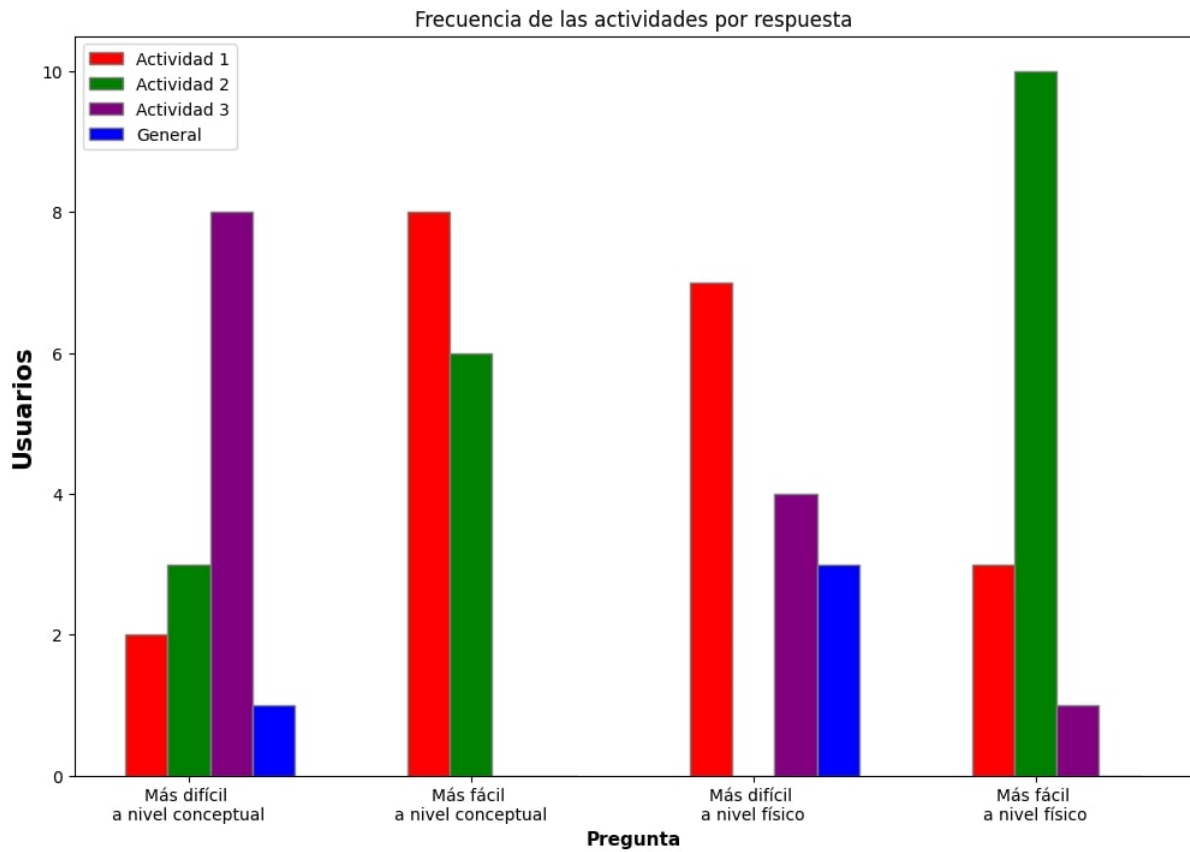


Figura 4.9: Frecuencia de las respuestas por cada una de las preguntas en 3.2.

En la gráfica, siendo los últimos dos atributos aquellos referentes al esfuerzo físico, se distingue a la primera actividad como la más demandante físicamente, contrario a las observaciones anteriores de agotamiento y duración de la actividad.

A esto puede contribuir un factor ajeno al uso de los sensores, el cual es que para solucionar el primer reto hay que agacharse para levantar un marco del suelo y colgarlo en un muro, siendo el participante propenso a soltarlo y tener que reiniciar el proceso.

Esto fue una situación repetitiva a lo largo de la mayoría de los usuarios, pues al no estar acostumbrados a los controles ni al uso de los sensores, además de no poder tener retroalimentación física en la mano virtual (como lo sería el uso de los gatillos para cerrar el

puño en la mano física), los jugadores separaban más las manos y se salían del espacio que activaba el agarre del cuadro.

Caso totalmente diferente a la segunda actividad, en la que no solo fue mayormente elegida como la menos demandante físicamente, sino que fue la única que no fue considerada por ningún participante como la que mayor desafío físico presentó (ver Figura 4.9). Se evidencia, si bien con un obstáculo para la primera actividad, la evolución en el momento de ejecución del segundo reto, especialmente teniendo en cuenta ahora que fueron la primera y la segunda las más sencillas de comprender (ver Figura 4.9). Esto, además del hecho de que fue la tercera actividad la seleccionada como la más complicada de entender (ver Figura 4.9), lo que establece es que es el desconocimiento de los mandos de control y de los sensores, sumado a la introducción de nuevas mecánicas, lo que debilitó el rendimiento de los participantes.

Pregunta abierta

La sección abierta de este cuestionario únicamente tenía la pregunta '¿por qué?' para cada uno de los atributos anteriormente discutidos.

Para analizar cuáles fueron las similitudes en esta área, se realizaron nubes de palabras para evidenciar de manera preliminar cuáles términos expresan las dificultades y virtudes en las actividades seleccionadas. Para evitar la aparición de palabras que no se consideraran como de parada (que no añaden información), se utilizó el listado de términos en español establecido por la librería de Python 'Spacy', añadiendo palabras como 'actividad', 'desarrollo' o 'elementos' que para el estudio no presentan mayor relevancia (ver Figura 4.10).



Figura 4.10: Nube de palabras de todas las respuestas juntas, por cada una de las preguntas del cuestionario 3.2. (a) ¿Cuál actividad le pareció la más sencilla a nivel conceptual? (b) ¿Cuál actividad le pareció la más complicada a nivel conceptual? (c) ¿Cuál actividad le pareció la menos demandante físicamente? (d) ¿Cuál actividad le pareció la más demandante físicamente?

Comenzando por el final, argumentando a favor de la observación realizada previamente acerca del ejercicio más complicado físicamente, se aprecian en la última nube de palabras dedicada a ese atributo los términos 'cuadro', 'desgaste', 'recoger' y 'levantar' (ver Figura 4.10). Esto contrario a la actividad más sencilla físicamente, que incluía palabras como 'disminuyó', 'esfuerzo', 'sencilla' y 'fáciles' (ver Figura 4.10).

En el caso de las más demandantes a nivel conceptual, las palabras 'cristales', 'fantasmas' y 'tiempo' fueron las que se hicieron presentes, relacionadas al concepto de un plazo de derrotar a los entes y recoger el cristal. Contrario a las más sencillas con términos como 'sencilla', 'intuitivo', 'agarrar' y 'botones'. Estos como referencia a las primeras dos actividades cuyos objetivos eran agarrar objetos y llevarlos a lugares llamativos.

Si bien son palabras que pueden guardar relación, la manera de escritura de cada participante difiere entre sí. Para determinar en realidad la similitud de las respuestas abiertas, se utilizó el método de la similitud del coseno de manera cruzada entre cada respuesta de los participantes, discriminándolas por preguntas, obteniendo los siguientes mapas de calor (ver Figura 4.11).

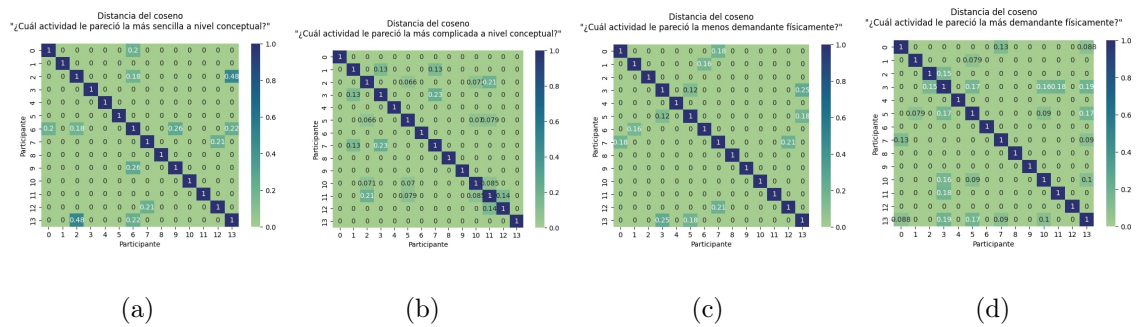


Figura 4.11: Mapa de calor de la similitud del coseno para las respuestas de cada participante para cada atributo de 3.2. (a) Facilidad conceptual; (b) Dificultad conceptual; (c) Facilidad física; (d) Dificultad física

Para el siguiente análisis, se seleccionaron únicamente las respuestas que tuvieran una similitud diferente de cero, pues esto implica que no guarda ninguna relación con ninguna otra del mismo atributo, obteniendo las siguientes nubes de palabras (ver Figura 4.12).

Para estas nuevas nubes de palabras, no se presentan cambios mayores respecto a las

4.2.5. Ruido en las señales de EMG

Dada la naturaleza de la electromiografía, durante la realización del experimento se presentaron instancias de ruido que entorpecieron la finalización de las actividades.

Previo a la primera inmersión, se le indicó a cada participante que existía la posibilidad de que el videojuego tuviera comportamientos erráticos por la presencia de señales de músculos adyacentes o que estuvieran alteradas por la posición y adherencia de los electrodos. Un ejemplo de estas interacciones se presenta en la Figura 4.13.

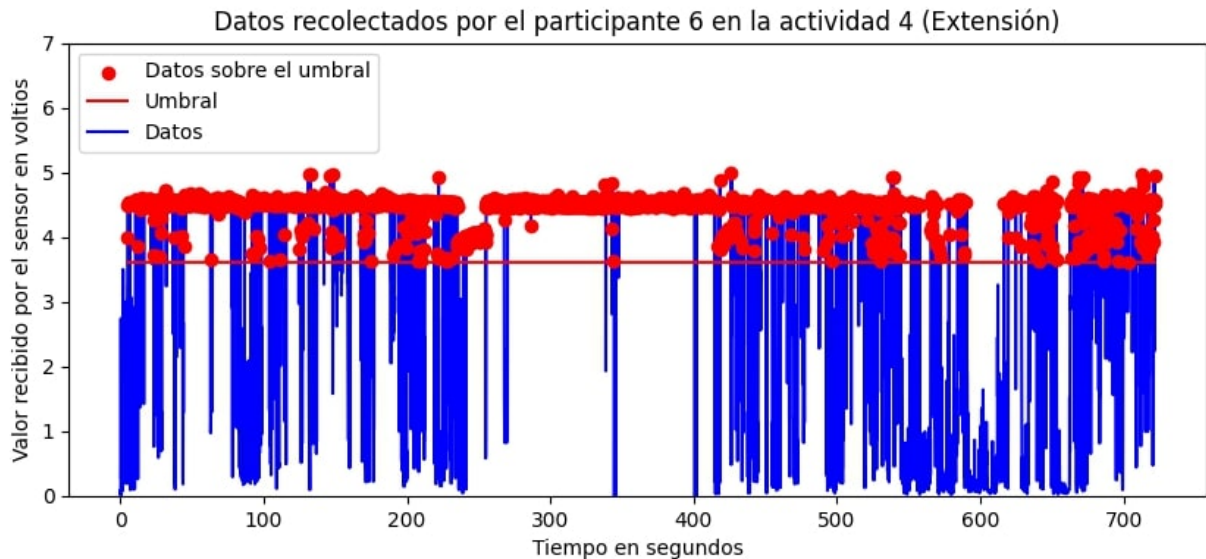


Figura 4.13: Gráfica de la señal EMG con ruido.

Como se puede evidenciar, la gran mayoría de los datos en esta actividad presentaban un fallo haciendo que la finalización del reto se viera entorpecido.

Desafortunadamente, no todo el ruido puede ser descartado de las observaciones dado el sistema de recolección, pero sí puede ser reducido a partir del concepto de los músculos.

Ya que las acciones que se estudiaron son contrarias, los músculos que se ven involucrados son antagonistas. Esto implica que en ningún momento ambos esfuerzos pueden realizarse

de manera natural.

Teniendo esto en cuenta, se determinó en la Figura 4.14 la distribución de los porcentajes en los que dicho ruido se presentaba a la mitad de una actividad.

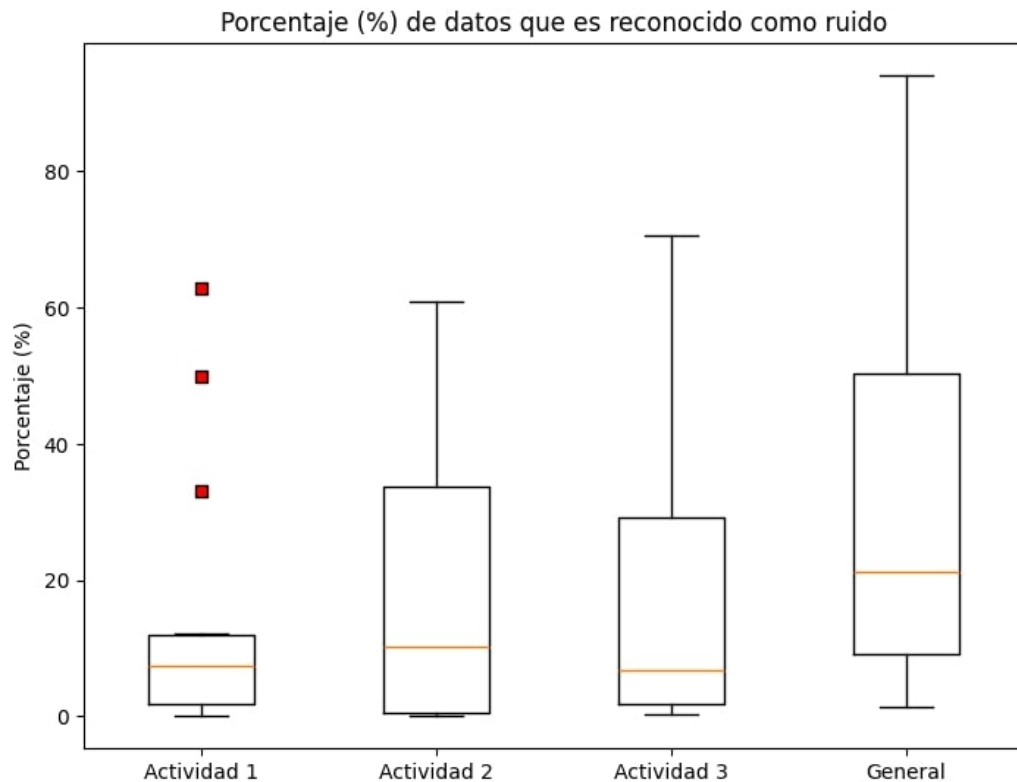


Figura 4.14: Porcentaje de datos que el ruido se hizo presente por cada actividad.

Si bien el ruido no puede ser distinguido de manera perfecta, a través de esta gráfica se puede interpretar su tendencia ascendente como el desgaste del sistema de recolección de las señales. Teniendo en cuenta que a lo largo de las cuatro actividades los participantes solo utilizaron un set de electrodos, factores como la transpiración de la piel pudieron contribuir a manera de interferencia, así como reduciendo la adherencia del electrodo.

A pesar de estas cifras, las que en algunos casos alcanzaron el ochenta por ciento en la última actividad, la gran mayoría de los participantes lograron finalizar con éxito el experimento con

mejorías en su rendimiento a partir de la repetición de los retos. Esto se evidencia también en la correlación que hay en la cantidad de datos correspondientes al ruido respecto al tiempo de realización de la actividad, siendo el índice de -0.091.

Capítulo 5

Conclusiones

La realización del proyecto se determina como exitoso, pues satisface los objetivos establecidos.

Se logró el desarrollo de un videojuego serio que cumpliera con la capacidad de comunicarse con el usuario a través de señales de electromiografía de una manera consistente y confiable, es decir sin la aparición de errores fatales que interrumpieran la ejecución del experimento. Si bien la presencia de obstáculos en la recolección de los datos entorpecieron la comunicación del usuario con la máquina, respecto a las 48 actividades totales realizadas y 47 completadas se obtiene un 97.9% de éxito en el experimento.

El análisis de la dificultad del videojuego serio y la progresión de los participantes a medida que avanzaban por cada una de las actividades resulta satisfactorio, pues a partir de las diferentes perspectivas obtenidas en cada uno de los estudios realizados sobresale un determinante para la mejoría de los usuarios en la ejecución de los retos, el cual es la repetición.

Factor clave en la rehabilitación neuromuscular, la repetición de las actividades y gestos también se hacen presentes como el motivo principal de la reducción de la dificultad para los participantes, como se vio en las dos ocasiones dispuestas. Teniendo en cuenta únicamente los doce usuarios que realizaron las cuatro actividades se aprecia la repetición de acciones en el paso de la primera a la segunda actividad, y del paso de la tercera a la cuarta. De las doce

personas, en el primer cambio hubo una mejora en tiempos de diez personas representando el 83.3 %, mientras que en el segundo cambio fueron once personas las que lograron reducir la duración de la última actividad a comparación de la suma de las anteriores, siendo un 91.6 %.

Finalmente, a partir de estas conclusiones y dada la posibilidad de aislar los puntos de mayor dificultad para los usuarios, el uso de un videojuego serio que aprovecha de la realidad virtual y la electromiografía puede considerarse oportuno como un método de entrenamiento para el uso de una prótesis avanzada.

5.1. Trabajos futuros

Como continuación de este proyecto, se pretende trabajar de la mano con la empresa Prótesis Avanzadas de la ciudad de Medellín, Colombia. Estos con su valiosa experiencia con usuarios de prótesis facilitarían los procesos de localización de las regiones óptimas para la localización del sistema de recolección de señales, con la esperanza de reducir los obstáculos presentes en este experimento.

Con el afán de mejorar la calidad de vida de las personas amputadas, se pretende también la inclusión de estas en la experimentación para así ampliar el horizonte del proyecto y obtener perspectivas imposibles bajo el contexto de un grupo de estudio de personas sanas.

Además de la mejora técnica y la ampliación del grupo de estudio, se propone ampliar la oferta de retos presentes en el videojuego serio, aplicando más estrategias de gamificación para fomentar a que el usuario realice las actividades sin necesidad de que se le indique pero sin perder la recolección de datos que resulta útil para monitorear el progreso de la persona.

Bibliografía

- [1] Madina Alimanova et al. «Gamification of Hand Rehabilitation Process Using Virtual Reality Tools: Using Leap Motion for Hand Rehabilitation». En: *2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*. 2017, págs. 336-339. DOI: [10.1109/IRC.2017.76](https://doi.org/10.1109/IRC.2017.76).
- [2] Prótesis Avanzadas. *Prótesis A3D*. URL: <https://www.protesisavanzadas.co/pr%C3%B3tesis-a3d>.
- [3] Cathrin Biitefisch et al. «Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand». En: *Journal of the Neurological Sciences* 130.. (1995), págs. 59-68.
- [4] Bruno Bonnechère. *Serious Games in Physical Rehabilitation: From Theory to Practice*. Springer, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66122-3>.
- [5] John Brooke. «SUS: a retrospective». En: *Journal of Usability Studies* 8.2 (2013), págs. 29-40.
- [6] Michael Burgess II. *Track sessions to simulators: discover how F1 drivers sharpen their skills*. URL: <https://www.redbull.com/ca-en/how-f1-drivers-practice>.
- [7] R. Cavalcante et al. «A VR-Based Serious Game Associated to EMG Signal Processing and Sensory Feedback for Upper Limb Prosthesis Training». En: *Entertainment Computing* (2021). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89394-1_36.
- [8] K. Chorianopoulos y M. Giannakos. «Design Principles for Serious Video Games in Mathematics Education: From Theory to Practice». En: *International Journal of Serious Games* 1.3 (2014). DOI: <https://doi.org/10.17083/ijsg.v1i3.12>.

-
- [9] E. A. Corbett, E. J. Perreault y T. A. Kuiken. «Comparison of electromyography and force as interfaces for prosthetic control». En: *J Rehabil Res Dev* 48.6 (2011), págs. 629-641. DOI: [10.1682/jrrd.2010.03.0028](https://doi.org/10.1682/jrrd.2010.03.0028).
- [10] Armand D'Angour. «Plato and Play: Taking Education Seriously in Ancient Greece.» En: *American Journal of Play* 5 (2013), págs. 293-307.
- [11] A. De Santis et al. «An atlas of physical human–robot interaction». En: *Mechanism and Machine Theory* 43 (2008), págs. 253-270. DOI: [doi:10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003).
- [12] D. Djaouti et al. «Origins of Serious Games». En: Springer London, 2011, págs. 25-43. DOI: [10.1007/978-1-4471-2161-9_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2161-9_3).
- [13] S. L. Farra et al. «Comparative Cost of Virtual Reality Training and Live Exercises for Training Hospital Workers for Evacuation.» En: *Comput Inform Nurs* 37.9 (2019), págs. 446-454. DOI: <https://doi.org/10.1097%2FCIN.0000000000000540>.
- [14] P. Fernanda-González et al. «Leap motion controlled video game-based therapy for upper limb rehabilitation in patients with Parkinson's disease: a feasibility study». En: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 16.133 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0593-x>.
- [15] Carlos F. Fernández. *Sí hay salida para los amputados*. 2006. URL: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1992341>.
- [16] M. G. Finco et al. «A review of musculoskeletal adaptations in individuals following major lower-limb amputation». En: *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions* 22.2 (2022), págs. 269-283.
- [17] F. J. Gallego-Durán et al. «Panorámica: serious games, gamification y mucho más». En: *ReVisión* 7.2 (2014).

-
- [18] S. Grosprêtre, P. Eon y P. Marcel-Millet. «Virtual reality does not fool the brain only: spinal excitability changes during virtually simulated falling». En: *Journal of Neurophysiology* 129 (2022), págs. 368-379. DOI: <https://doi.org/10.1152/jn.00383.2022>.
- [19] N. A. Hashim et al. «Video Game-Based Rehabilitation Approach for Individuals Who Have Undergone Upper Limb Amputation: Case-Control Study». En: *JMIR Serious Games* 9.1 (2021). DOI: <https://doi.org/10.2196/17017>.
- [20] F. Hojaji et al. «AI-Enabled Prediction of Sim Racing Performance Using Telemetry Data». En: <https://www.sciencedirect.com/journal/computers-in-human-behavior-reports> 14 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2024.100414>.
- [21] M. Hostovecky y B Babusiak. «Brain activity: beta wave analysis of 2D and 3D serious games using EEG». En: *Journal of Applied Mathematics, Statistics and Informatics* 13.2 (2017), págs. 39-53. DOI: <https://doi.org/10.1515/jamsi-2017-0008>.
- [22] Gunnar Johannsen. «Human-Machine Interaction». En: *Control Systems, Robotics and Automation* 21 (2009).
- [23] Zondervan D. K. et al. «Home-based hand rehabilitation after chronic stroke: Randomized, controlled single-blind trial comparing the MusicGlove with a conventional exercise program.» En: *Journal of Rehabilitation Research and Development* 53.4 (2016), págs. 457-472. DOI: [10.1682/JRRD.2015.04.0057](https://doi.org/10.1682/JRRD.2015.04.0057).
- [24] Regina Kaplan-Rakowski y Alice Gruber. «Low-Immersion versus High-Immersion Virtual Reality: Definitions, Classification, and Examples with a Foreign Language Focus». En: *Innovation in Language Learning International Conference*. 2019.
- [25] M. Kristoffersen et al. «User training for machine learning controlled upper limb prostheses: a serious game approach». En: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 18.32 (2021). DOI: [10.1186/s12984-021-00831-5](https://doi.org/10.1186/s12984-021-00831-5).

-
- [26] M. B. Kristoffersen et al. «Serious gaming to generate separated and consistent EMG patterns in pattern-recognition prosthesis control». En: *Biomedical Signal Processing and Control* 62 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102140>.
- [27] K Larson. «Serious Games and Gamification in the Corporate Training Environment: a Literature Review». En: *Tech Trends* 64 (2020), págs. 319-328. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11528-019-00446-7>.
- [28] D. Li, L. Wei y S. Xiang. «A study on the application of Prepar3D-based Aviation's Localizer Performance with Vertical Guidance Approach procedures in the teaching of simulated flight training courses». En: *International Journal of Educational Research and Development* 1.5 (2023). DOI: <https://doi.org/10.56028/ijerd.1.5.6.2023>.
- [29] Salvatore Livatino, Giovanni Muscato y Filippo Privitera. «Stereo Viewing and Virtual Reality Technologies in Mobile Robot Teleguide». En: *IEEE Transactions on Robotics* 25.6 (2009), págs. 1343-1355. DOI: [10.1109/TRO.2009.2028765](https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2028765).
- [30] L. H Lugo Agudelo et al. *Guía de Práctica Clínica para el diagnóstico y tratamiento preoperatorio, intraoperatorio y postoperatorio de la persona amputada, la prescripción de la prótesis y la rehabilitación integral*. 2015.
- [31] B. Maas, C. K. Van Der Sluis y R. M. Bongers. «Assessing the effectiveness of serious game training designed to assist in upper limb prosthesis rehabilitation». En: *Advances in Technology-Assisted Rehabilitation* 5 (2024). DOI: <https://doi.org/10.3389/fresc.2024.1353077>.
- [32] R. Merletti y D. Farina. *SURFACE ELECTROMYOGRAPHY Physiology, Engineering, and Applications*. IEEE Press, 2016.
- [33] G Murdoch. «Amputation Revisited». En: *The Knud Jansen Lecture* 8.. (1984), págs. 8-15.

-
- [34] Ottobock. *Upper Limb: Learning to use a prosthetic arm*. URL: <https://www.ottobock.com/en-us/resources/living-with-an-amputation/rehabilitation-and-the-prosthetic-arm>.
- [35] K.A. Pollard, A.H. Oiknine y B.T Files. «Level of immersion affects spatial learning in virtual environments: results of a three-condition within-subjects study with long intersession intervals». En: *Virtual Reality* 24 (2020), págs. 783-796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00411-y>.
- [36] F Reer et al. «Virtual reality technology and game enjoyment: The contributions of natural mapping and need satisfaction». En: *Computers in Human Behavior* 132 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107242>.
- [37] L. Resnik et al. «Advanced Upper Limb Prosthetic Devices: Implications for Upper Limb Prosthetic Rehabilitation». En: *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 93.4 (2012), págs. 710-717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.11.010>.
- [38] Miloš Roglić et al. «Serious gaming based on Kinect technology for autistic children in Serbia». En: *2016 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*. NEUREL, 2016, págs. 1-4. DOI: [10.1109/NEUREL.2016.7800105](https://doi.org/10.1109/NEUREL.2016.7800105).
- [39] Thomas B. Sheridan. «Human–Robot Interaction: Status and Challenges». En: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 58.4 (2008), págs. 525-532. DOI: <https://doi.org/10.1177/0018720816644364>.
- [40] David W. Sime. «Potential application of virtual reality for interface customisation (and pre-training) of amputee patients as preparation for prosthetic use». En: *Advances in Experimental Medicine and Biology* 1 (2019), págs. 15-19. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-06070-1_2.

- [41] Gaurav Sinha, Rahul Shahi y Mani Shankar. «Human Computer Interaction». En: *2010 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*. 2010, págs. 1-4. DOI: [10.1109/ICETET.2010.85](https://doi.org/10.1109/ICETET.2010.85).
- [42] O. Sourina, Q. Wang y M. K. Nguyen. «EEG-based "serious" games and monitoring tools for pain management». En: *Studies in health technology and informatics* 163 (2011), págs. 606-610. DOI: [doi:10.3233/978-1-60750-706-2-606](https://doi.org/10.3233/978-1-60750-706-2-606).
- [43] I. Suh et al. «Electromyographic Correlates of Learning during Robotic Surgical Training in Virtual Reality». En: *Medicine Meets Virtual Reality* 18 (2011). DOI: [doi: 10.3233/978-1-60750-706-2-630](https://doi.org/10.3233/978-1-60750-706-2-630).
- [44] Advancer Technologies. *Myoware Muscle Sensor 2.0*. URL: <https://myoware.com/products/technical-specifications/#muscle-sensor>.
- [45] J. Wangdell, G. Carlsson y J. Fridén. «Enhanced independence: experiences after regaining grip function in people with tetraplegia». En: *Disability and Rehabilitation* 35.23 (2013), págs. 1968-1974. DOI: <https://doi.org/10.3109/09638288.2013.768709>.
- [46] P Wilkinson. «A Brief History of Serious Games». En: *Entertainment Computing and Serious Games. Lecture Notes in Computer Science* 9970 (2016). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46152-6_2.
- [47] Nihal Ezgi Yüçetürk et al. «Predictive Analysis of Errors During Robot-Mediated Gamified Training». En: *2022 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. 2022, págs. 1-6. DOI: [10.1109/ICORR55369.2022.9896589](https://doi.org/10.1109/ICORR55369.2022.9896589).
- [48] A. Zech et al. «Neuromuscular training for rehabilitation of sports injuries: a systematic review.» En: *Medicine and science in sports and exercise* 41.10 (2009), págs. 1831-1841. DOI: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181a3cf0d>.
- [49] J.M. Zheng, K.W. Chan e I. Gibson. «Virtual reality». En: *IEEE Potentials* 17.2 (1998), págs. 20-23. DOI: [10.1109/45.666641](https://doi.org/10.1109/45.666641).