

DESARROLLO Y COMPARATIVA DE INTERACCIONES
FÍSICAS CON GUANTES HÁPTICOS Y MANDOS EN UN
ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL EN UNREAL ENGINE



TRABAJO FIN DE GRADO

CURSO 2023-2024

JAVIER MUÑOZ MARTÍN DE LA SIERRA

LAURA GÓMEZ BODEGO

SERGIO BAÑA MARCHANTE

JUAN DIEGO MENDOZA REYES

DIRECTOR

CARLOS LEÓN AZNAR

COLABORADOR

ALEJANDRO VILLAR RUBIO

GRADO DE DESARROLLO DE VIDEOJUEGOS

FACULTAD DE INFORMÁTICA

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

PHYSICAL INTERACTION DEVELOPMENT AND
COMPARISON OF HAPTIC GLOVES AND CONTROLLERS IN A
VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT WITH UNREAL ENGINE



FINAL DEGREE PROJECT

COURSE 2023-2024

JAVIER MUÑOZ MARTÍN DE LA SIERRA

LAURA GÓMEZ BODEGO

SERGIO BAÑA MARCHANTE

JUAN DIEGO MENDOZA REYES

DIRECTOR

CARLOS LEÓN AZNAR

COLLABORATOR

ALEJANDRO VILLAR RUBIO

BACHELOR OF COMPUTER SCIENCE IN VIDEOGAME DEVELOPING

COMPUTER SCIENCE FACULTY

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y seres queridos, por demostrarnos el cariño y el apoyo incondicional que nos dan al hablarles durante horas de cosas que no entienden.

Gracias a Carlos León Aznar y a Alejandro Villar Rubio, por ser nuestros mentores durante todo el proceso y por apoyarnos y darnos todo lo que hemos necesitado. A todos los voluntarios que nos han dedicado tiempo para participar en las pruebas.

A mis abuelos, que me recuerdan que hay que disfrutar de las cosas que uno hace. A mis padres por animarme siempre a ser creativo. A mi hermano por enseñarme que el camino no está escrito. Y a Mar, la luna que ilumina mi mar en calma. ~*Javier*

A mi padre, que ha sido siempre mi mentor e inspiración. Y a ti Sergio, que me has dado fuerza y animado todas las veces que te he dicho que ya no podía más. Te quiero mucho. ~*Laura*

A mi padre, que siempre me ha apoyado en los momentos difíciles y cuando más lo necesitaba. ~*Juan Diego*

A mis padres, que a pesar de la difícil situación siempre estuvieron ahí. A ti, Paula, que me abrazaste cuando lo necesitaba, me dijiste que todo iría bien, has sido mi apoyo fundamental en esta época. ~*Sergio*

“El futuro siempre se construye sobre el pasado, aun si no llegamos a verlo”.

~ Riebeck

Outer Wilds

RESUMEN

En la formación profesional en entornos simulados, es crucial un entrenamiento eficaz para desarrollar profesionales competentes. Aunque existen diversas aplicaciones y sistemas de Realidad Virtual diseñados para simulaciones de entrenamiento, su efectividad se ve limitada por la necesidad de que los usuarios requieran de conocimientos previos en realidad virtual. Esto puede llegar a ralentizar la formación del usuario y comprometer la precisión y autenticidad de la simulación.

En consecuencia, este proyecto de investigación se centra en analizar que interacciones del usuario son mejores en determinadas situaciones mediante tecnologías intuitivas e inmersivas. Para ello, se explora el uso de guantes hápticos en un entorno interactivo en realidad virtual, con el objetivo de facilitar la adaptación de usuarios sin experiencia previa. Por consiguiente, se han llevado a cabo pruebas de usuario para evaluar el potencial de esta tecnología en entornos virtuales simulados, donde los usuarios han realizado ensayos que implican interacciones con objetos dinámicos. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que los guantes hápticos han resultado ser una opción mucho más intuitiva, sin embargo, los mandos presentan una mejora respecto a la precisión y fluidez en las interacciones.

Palabras clave

Realidad Virtual, Guantes hápticos, Unreal Engine 5, Entornos simulados, Interacciones físicas, SenseGlove NOVA, Formación profesional, Experiencia inmersiva.

ABSTRACT

In professional training within simulated environments, effective training is crucial for developing competent professionals. Although various Virtual Reality applications and systems are designed for training simulations, their effectiveness is limited by the requirement for users to have previous knowledge of Virtual Reality. This can slow down user training and compromise the accuracy and authenticity of the simulation.

Consequently, this research project focuses on analyze which user interactions are better in certain scenarios through intuitive and immersive technologies. To achieve this, the use of haptic gloves in an interactive Virtual Reality environment it has been explored, aiming to facilitate the adaptation of users without prior experience. Therefore, user tests have been conducted to assess the potential of this technology in simulated virtual environments, where users performed trials involving interactions with dynamic objects. The results obtained in this study demonstrate that haptic gloves have proven to be a much more intuitive option; however, controllers show an improvement in terms of precision and fluency in interactions.

Keywords

Virtual Reality, Haptic gloves, Unreal Engine 5, Simulated environments, Physical interactions, NOVA, Professional training, Immersive experience

ÍNDICE

Agradecimientos	I
Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Índice.....	V
Índice de figuras.....	IX
Índice de ilustraciones	XI
Índice de tablas.....	XII
Capítulo 1 - Introducción.....	1
1.1 Motivación	2
1.2 Hipótesis de partida.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Metodología	7
1.4.1 Tecnologías y herramientas usadas	7
1.4.2 Plan de trabajo	10
1.5 Estructura del resto del documento	12
Capítulo 2 - Estado del arte.....	15
2.1 Sistemas de Realidad Virtual	15
2.1.1 Componentes de los sistemas de realidad virtual	15
2.1.2 Tipos de realidad virtual	16
2.2 Renderizado háptico	17
2.2.1 Arquitectura	18
2.2.2 Algoritmos de respuesta de fuerza.....	19
2.2.3 Aplicaciones de la tecnología háptica.....	20

2.3 Experiencias de usuario en realidad virtual.....	21
2.3.1 Estudios sobre la curva de aprendizaje inicial en RV.....	22
2.3.2 Beneficios cognitivos	22
2.3.3 Videojuegos en realidad virtual.....	22
2.4 SenseGlove	24
Capítulo 3 - Arquitectura del Proyecto	27
3.1 Clases y componentes.....	27
3.1.1 Tipos de usuario dependiendo de la entrada	27
3.1.2 Objetos interactivos y tipos de agarre	27
3.1.3 Instancias de la aplicación	29
3.2 Jerarquía de clases	29
Capítulo 4 – Extensiones relacionadas con la realidad virtual, implementación de interacciones, registro de datos y diseño de escenarios.....	33
4.1 Extensiones relacionadas con Realidad Virtual y entornos de físicas.....	33
4.1.1 Proyecto base de Unreal Engine para Realidad Virtual.....	34
4.1.2 Proyecto base de SenseGlove para Unreal Engine.....	35
4.1.3 Proyecto base de Physical Interaction System para Unreal Engine	36
4.2 Integración de Interacciones.....	38
4.2.1 Interacciones del usuario	38
4.2.2 Objetos Interactivos	40
4.3 Implementación del registro de datos y diseño de escenarios	41
4.3.1 Implementación del registro de datos.....	42
4.4 Diseño de escenarios	43
Capítulo 5 - Evaluación.....	47
5.1 Método de evaluación.....	47

5.2 Proceso de evaluación	50
5.2.1 Problemas con las pruebas.....	55
5.3 Resultados	56
5.3.1 Datos obtenidos de la aplicación.....	56
5.3.2 Datos obtenidos del cuestionario.....	66
5.4 Análisis de los resultados	77
Capítulo 6 - Discusión	81
Capítulo 7 - Conclusiones y trabajo futuro.....	83
7.1 Conclusiones del proyecto	83
7.2 Trabajo futuro	85
Capítulo 8 - Contribuciones personales	87
8.1 Javier Muñoz Martín de la Sierra	87
8.2 Laura Gómez Bodego.....	89
8.3 Sergio Baña Marchante	91
8.4 Juan Diego Mendoza Reyes.....	93
Capítulo 9 - Introduction	95
9.1 Motivation	96
9.2 Initial Hypothesis.....	98
9.3 Objectives	98
9.4 Methodology	101
9.4.1 Technologies and tools used	101
9.4.2 Work Plan	104
9.5 Document Structure	106
Capítulo 10 - Conclusion and future work.....	109
10.1 Project Conclusions	109

10.2 Future Work.....	111
Bibliografía.....	113
Apéndice A: Diseño del plan de pruebas.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de Gantt del flujo de trabajo.....	12
Figura 2.1: Arquitectura de un sistema de renderizado háptico [36].	18
Figura 3.1: Diagrama de clases del proyecto de Unreal Engine.....	30
Figura 5.1: Gráfico de la distribución de género de los participantes de las pruebas de usuario.....	52
Figura 5.2: Distribución de las edades de los usuarios de pruebas.	52
Figura 5.3: Experiencia previa de los sujetos de pruebas con realidad virtual.	53
Figura 5.4: Cantidad de interacciones totales con guantes hápticos y con mando.	57
Figura 5.5: Cantidad total de veces que se ha agarrado y soltado cada tipo de objeto con guantes hápticos (Azul) y mandos (Naranja).....	60
Figura 5.6: Número de interacciones de cada usuario con guantes hápticos.	61
Figura 5.7: Cantidad de interacciones de cada usuario con guantes con la mano derecha (Naranja) e izquierda (Azul).	63
Figura 5.8: Número de interacciones por usuario con mandos.	64
Figura 5.9: Comparación del número de interacciones con la mano izquierda (Azul) y derecha (Naranja) con mandos para cada usuario.	66
Figura 5.10: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con palancas, el rojo representa mandos y el azul representa guantes.	67
Figura 5.11: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con puertas. Rojo corresponde a mandos y azul a guantes.	67
Figura 5.12: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con los cubos. Rojo corresponde a mandos y azul a guantes.	68
Figura 5.13: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con los conos, rojo corresponde a mandos y azul a guantes.	68

Figura 5.14: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con los dosímetros, rojo corresponde a mandos y azul a guantes.....	69
Figura 5.15: Opinión de la encuesta sobre la preferencia para el desplazamiento, rojo corresponde a mandos y azul a guantes.....	69
Figura 5.16: Respuestas a la encuesta sobre la facilidad para aprender a coger y soltar objetos con mandos. 5 corresponde a la mayor facilidad y 1 a la menor.....	70
Figura 5.17: Facilidad a la hora de desplazarse por el entorno con mandos, donde 1 representa la mayor dificultad y 5 representa la mayor facilidad.....	71
Figura 5.18: Opiniones de los probadores sobre lo natural que les ha parecido la interacción con los mandos, 1 corresponde a Nada natural y 5 a Muy natural.....	72
Figura 5.19: Respuestas a la encuesta sobre la facilidad que han tenido los usuarios para aprender a coger y soltar objetos con los guantes hápticos, 1 corresponde a muy difícil y 5 a muy fácil.....	73
Figura 5.20: Opiniones de los usuarios sobre la facilidad que han tenido a la hora de desplazarse por el entorno con los guantes hápticos, 5 es muy fácil y 1 muy complicado.....	74
Figura 5.21: Opiniones de los usuarios sobre como de natural les ha resultado la interacción con los objetos y los guantes hápticos.....	75
Figure 9.1: Gantt chart of the execution flow.	106

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 4.1: Captura de pantalla de la plantilla de Unreal Engine para aplicaciones de realidad extendida.	35
Ilustración 4.2: Captura de pantalla de la plantilla de SenseGlove.	36
Ilustración 4.3: Captura de pantalla de la plantilla de Physical Interaction System.	38
Ilustración 4.4: Representación de la pose pistola escogida para el teletransporte con guantes.	40
Ilustración 4.5: Captura del primer escenario de pruebas.	43
Ilustración 4.6: Captura del segundo escenario de pruebas.	45
Ilustración 5.1: Usuario en la prueba con mandos.	54
Ilustración 5.2: Usuario de pruebas en el escenario de los guantes hápticos.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Plan de trabajo.....	11
Table 9.1: Work Plan.	105

Capítulo 1 - Introducción

La formación de trabajadores especializados en entornos controlados es crucial para el desarrollo competente de futuros profesionales. Con el crecimiento de la digitalización hoy, las industrias buscan garantizar la capacitación adecuada en los roles laborales relevantes, recrear situaciones laborales realistas en un entorno virtual controlado, para minimizar errores reales que pueden ser más costosos y presentar accidentes laborales [1].

Cada vez más empresas e instituciones optan por instruir a nuevos profesionales mediante simuladores y sistemas de realidad virtual, para reducir costos y evitar posibles contratiempos con pruebas en situaciones reales controladas [2]. Esto facilita el acceso a entornos de formación inmersivos, mejora la veracidad de las pruebas y refleja situaciones de campo realistas de manera más efectiva.

Es crucial no solo crear entornos virtuales interactivos para la formación de profesionales, sino también asegurar que aquellos con poca o nula experiencia en entornos de realidad virtual [3], se adapten de la mejor manera posible a estos. Este estudio se enfoca en dicha necesidad, y hace una comparación entre dispositivos de entrada como los guantes hápticos¹ y los mandos convencionales [4] [5]. Se realizarán pruebas de usuario para identificar ventajas e inconvenientes, con el objetivo de optimizar la experiencia de aprendizaje y la eficacia de la formación en estos entornos.

Los sistemas de realidad virtual como *Meta Quest* [6] o *HTC Vive* [7] integran como dispositivos de entrada, visores² y mandos [8]. Estas tecnologías permiten ejecutar aplicaciones desarrolladas en herramientas de software como *Unreal Engine* [9] y *Unity* [10], que ofrecen facilidades para crear funcionalidades, renderizar y diseñar escenarios. También existen dispositivos no nativos de las plataformas de realidad virtual que pueden implementarse para su uso en aplicaciones de estas plataformas.

¹ Dispositivos que permiten al usuario sentir y manipular objetos virtuales en entornos de realidad virtual mediante retroalimentación táctil.

² Dispositivos que permiten experimentar entornos digitales inmersivos a través de pantallas estereoscópicas y sensores de movimiento.

En este estudio se ha abordado uno de los desafíos del proyecto ADARVE [11] (Análisis de Datos de Realidad Virtual para formación en Emergencias Radiológicas) código SUBV-20/2021, financiado por el *Consejo de Seguridad Nuclear*; que es la interacción con guantes hápticos en entornos de realidad virtual. Aunque el foco principal del proyecto ADARVE está en la formación de profesionales frente a emergencias radiológicas [12], este estudio se centra en investigar los posibles avances tecnológicos y metodológicos que pueden mejorar la inmersión y la efectividad de la formación en RV³.

Este estudio se beneficia del contexto proporcionado por ADARVE y utiliza tecnologías y enfoques compartidos, como resultado se desarrolla una extensión de ADARVE para crear entornos virtuales con interacciones dinámicas⁴. Se investiga la efectividad de los guantes hápticos frente a los mandos de realidad virtual, con el objetivo de mejorar la interacción y la inmersión de usuarios sin experiencia previa en RV. Esta línea de investigación es esencial para maximizar la usabilidad y la eficacia de las plataformas de realidad virtual en diversos campos [13].

En resumen, este trabajo se inspira en los objetivos de ADARVE y aplica sus principios a un nuevo contexto. Al estudiar cómo diferentes dispositivos de entrada afectan la experiencia del usuario, se busca contribuir a la mejora continua de la formación y la capacitación mediante realidad virtual en el marco del proyecto ADARVE.

1.1 Motivación

La capacitación de usuarios en entornos reales presenta elevados costos y una notable complejidad logística [14]. Por esta razón, se considera la implementación de entrenamientos en entornos de realidad virtual, con el objetivo de minimizar costos y riesgos asociados a dichos entrenamientos. No obstante, los sistemas de realidad virtual son complejos y poco accesibles para el público general. Estos dispositivos no tienen

³ Abreviación de las palabras *realidad virtual*.

⁴ *Interacciones influenciadas por la física del motor del juego, como la gravedad o las colisiones.*

una presentación amigable para los nuevos usuarios [15], sin embargo, los guantes hápticos ofrecen una nueva forma de interacción más intuitiva y fácil de usar.

La realidad virtual se ha convertido en una herramienta esencial para la formación en diversas industrias gracias a su capacidad para crear entornos seguros y controlados, donde los usuarios pueden aprender y practicar habilidades sin los riesgos asociados a situaciones reales [1]. Sin embargo, para que la RV sea efectiva, es crucial que los usuarios puedan interactuar de manera intuitiva y natural con estos entornos.

Para lograr este objetivo, se evaluarán diferentes formas de interacción para determinar las fortalezas y debilidades de cada una de ellas, y concluir cuál puede ser la más efectiva, cómoda y fácil de usar. En particular, el estudio se centra en dos tipos de interacción: mediante mandos y guantes hápticos. Los guantes hápticos, aunque todavía en desarrollo, prometen una interacción más natural, al permitir que los usuarios sientan y manipulen objetos virtuales de una manera que se asemeja mucho a la manipulación de objetos reales. Por otro lado, los mandos de RV son más convencionales y están ampliamente disponibles, pero pueden ser menos intuitivos para los nuevos usuarios.

Además, se pretende explorar las oportunidades futuras que esta nueva forma de interacción puede ofrecer. Se busca determinar si el uso y desarrollo de aplicaciones o entornos con guantes hápticos facilita la adaptación de usuarios sin experiencia previa o no familiarizados con la tecnología de realidad virtual, de manera más intuitiva y fluida que mediante métodos convencionales. El objetivo final es concluir si el desarrollo de aplicaciones para guantes hápticos es una opción rentable y atractiva, que debería ser promovida entre particulares, empresas del sector tecnológico y futuros proyectos de investigación en universidades e instituciones.

Por estos motivos, se ha tomado la iniciativa de realizar un estudio comparativo de experiencia de usuario entre guantes hápticos y mandos en un entorno de pruebas interactivo de realidad virtual, desarrollado en *Unreal Engine 5*. Este estudio no solo permitirá evaluar la efectividad de cada tipo de dispositivo de entrada, sino también contribuir al avance de la tecnología de realidad virtual al proporcionar datos y conocimientos que puedan mejorar la experiencia del usuario en entornos virtuales.

1.2 Hipótesis de partida

Con todo lo expuesto anteriormente, se considera que el objetivo principal de este estudio es analizar el impacto del uso de los guantes hápticos frente a los mandos en la experiencia del usuario. Se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis 1: En entornos de formación de realidad virtual, el uso de los guantes hápticos frente a mandos favorece que el usuario presente un mejor desempeño de las prácticas adquiridas en pruebas de campo y situaciones reales.

Validar la Hipótesis 1 ofrece información acerca de si esta nueva tecnología satisface lo esperado de este proyecto de investigación. No obstante, el desempeño del usuario y su satisfacción durante el uso del correspondiente dispositivo pueden no ser equivalentes. Aunque existe una correlación entre ambos conceptos, resulta fundamental determinar qué dispositivo ofrece una experiencia óptima. Teniendo en cuenta el contexto actual de los guantes como una tecnología innovadora, y la falta de estandarización en su implementación, surge la necesidad de formular una nueva hipótesis:

Hipótesis 2: La experiencia general que encuentran los usuarios en las pruebas con guantes es menos satisfactoria que el uso de mandos.

Sin embargo, el planteamiento de este estudio es verificar que el uso de guantes para interactuar con el entorno sea lo más intuitivo posible. Ello, lleva a plantear una tercera hipótesis:

Hipótesis 3: El uso de guantes durante las primeras interacciones es más intuitivo que el uso de los controladores

1.3 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales que delinean las metas principales del proyecto. Estos objetivos orientan su desarrollo y aseguran un enfoque coherente en todas las etapas de este.

- Creación de un sistema de comparativas de diferentes interacciones.
Diseñar y desarrollar un sistema que permita comparar y analizar diversas interacciones. Este sistema debe ser capaz de recopilar datos de manera eficiente, recoger métricas de evaluación relevantes y generar informes detallados que faciliten la comprensión de las diferencias y similitudes entre las interacciones estudiadas.
- Realización de pruebas.
Establecer un plan de pruebas para evaluar el rendimiento y la efectividad del sistema de interacciones. Estas pruebas deben incluir una comparativa entre ambos tipos de dispositivos de entrada y estudiar el comportamiento de los sujetos de prueba en el escenario.

Para desarrollar esta investigación de manera efectiva, es fundamental establecer objetivos claros y concisos que nos permitan recrear un entorno real. A continuación, se describen unos objetivos iniciales previos al desarrollo del proyecto que proporcionan una guía inicial estructurada.

- Revisión sistemática de los guantes hápticos en el mercado actual.
Investigar y evaluar diversos guantes hápticos disponibles en el mercado para seleccionar la opción más adecuada.
- Análisis del motor de simulación que se va a utilizar.
Examinar el uso del motor de simulación *Unreal Engine 5* en esta investigación, y comprobar sus capacidades técnicas y características específicas para la integración de guantes hápticos en entornos de realidad virtual.

Una vez resueltos los objetivos previamente mencionados, este trabajo busca demostrar las hipótesis planteadas en la Sección 1.2, y se siguen estos objetivos:

- Definición de interacciones virtuales con guantes hápticos.
Desarrollar un catálogo de interacciones básicas de realidad virtual y sus posibles implementaciones con guantes hápticos.
- Integrar los guantes hápticos en un entorno de realidad virtual.

Se creará un escenario prototipo con guantes e interacciones de objetos sin implementación de movimiento.

- Implementar un sistema de físicas en la interacción en realidad virtual.
Se desarrollará una serie de interacciones físicas para cada tipo de objeto interactivo del proyecto de realidad virtual, diseñado preliminarmente con mandos.
- Diseño e implementación de interacciones con guantes hápticos en realidad virtual.
Se definirán y desarrollarán las formas de interacción entre el usuario y los objetos interactivos que se vayan a utilizar en las pruebas de usuario. Se tendrá también en cuenta el sistema de desplazamiento de los mandos, para emular una interacción/gesto con los guantes, de manera que ambos desplazamientos ofrezcan una experiencia similar.

Cumplidos los anteriores objetivos, se integrará el software prototipo de los guantes hápticos al proyecto de interacciones físicas. Con el objetivo de mantener siempre una separación de entrada de usuario entre mandos y guantes.

- Desarrollar un registro para recoger los datos del desarrollo de las pruebas.
Se crearán clases y sistemas que generarán tablas de datos a partir de las pruebas de los usuarios y se diferenciará entre guantes o mandos, para obtener resultados fiables sobre cada experimento, para poder compararlas.
- Diseñar dos escenarios de interacción para guantes y mandos.
Se crearán y diseñarán dos escenarios idénticos con interacciones dinámicas para guantes hápticos y mandos para realizar las pruebas. Con el objetivo de contrastar las interacciones que se dan con ambos en el mismo entorno, de tal manera que los datos obtenidos en cada prueba sean contrastables entre ellos.
- Desarrollo de experimentación con un grupo de usuarios para recopilar datos y realizar el estudio.

Se tendrá en cuenta el perfil del usuario de forma anónima, de manera que los datos recopilados sean verídicos y aplicables a muestras de mayor tamaño.

- Análisis exhaustivo de los datos obtenidos en los experimentos.

Se tratarán los datos recopilados de las pruebas, y se comprobarán la veracidad de las hipótesis planteadas. Se determinará qué elementos interactivos valora más el usuario y qué ventajas se pueden encontrar a la hora de usar guantes frente a mandos.

1.4 Metodología

En esta sección se abordan las herramientas y programas empleados para llevar a cabo este proyecto, además de la coordinación entre los miembros del equipo para ejecutar las diversas tareas que componen este trabajo.

1.4.1 Tecnologías y herramientas usadas

1.4.1.1 Meta Quest 2

Un visor de realidad virtual es un dispositivo que permite a los usuarios sumergirse en entornos digitales tridimensionales y proporciona una experiencia inmersiva mediante la visualización de imágenes y sonidos que responden a los movimientos de la cabeza y el cuerpo. En este contexto, se ha utilizado el visor *MetaQuest 2* [16], desarrollado por *Meta Platforms Inc.*, con un hardware⁵ competente, un diseño ligero y cómodo, junto con características como el seguimiento de manos y la capacidad de rastreo dentro y fuera del espacio, lo convierten en una opción óptima y accesible para el proyecto.

1.4.1.2 SenseGlove Nova

SenseGlove Nova [17] es un controlador de realidad virtual desarrollado por *SenseGlove Inc.* [18]. Se presenta en forma de guante que rastrea los movimientos del

⁵ Conjunto de componentes físicos y tangibles de un sistema informático.

usuario y proporciona retroalimentación háptica⁶, además, permite sentir la presencia y el tamaño de objetos virtuales. Está diseñado para entrenar a profesionales técnicos, como mecánicos de aeronaves y trabajadores de líneas de ensamblaje, en tareas complejas de manera intuitiva [19]. La calibración de los guantes se realiza a través del software *SenseCom* [20]. Este controlador será el principal objeto de estudio, para el que se ha desarrollado e implementado las interacciones con objetos en el entorno virtual.

1.4.1.3 SenseCom

El uso de guantes hápticos requiere un software específico para su funcionamiento con las herramientas de desarrollo. En este contexto, se utiliza la aplicación *SenseCom*, desarrollada por *SenseGlove*, creadores de los dispositivos *SenseGlove Nova 1.X* y *2.X* [17]. *SenseCom* permite el emparejamiento por Bluetooth con el ordenador, así como la calibración de los guantes y la actualización del firmware⁷.

Este software desempeña un papel crucial al proporcionar la interfaz necesaria para configurar y gestionar correctamente los guantes hápticos en los entornos de realidad virtual y simulación que se realizarán en el desarrollo. Además, permite que la empresa desarrolladora incorpore actualizaciones que incluyan mejoras y soluciones a errores de los guantes hápticos.

1.4.1.4 Unreal Engine

Un motor de videojuegos y simulación es un software diseñado para facilitar el desarrollo, la renderización y la ejecución de aplicaciones interactivas en 2D, 3D y realidad extendida, como videojuegos, simulaciones o aplicaciones [9]. Este software es utilizado por particulares, empresas del sector tecnológico y proyectos de investigación en universidades e instituciones [21].

Con el propósito de desarrollar un entorno de realidad virtual para la comparativa, se ha elegido *Unreal Engine 5*, desarrollado por *Epic Games* [9], como herramienta

⁶ Tecnología que utiliza el sentido del tacto para proporcionar respuestas físicas a los usuarios mediante vibraciones, fuerzas o movimientos.

⁷ Software integrado en dispositivos electrónicos que controla su funcionamiento.

debido a su capacidad para la integración con guantes hápticos y su potencial para crear entornos virtuales realistas, además de contar con una potencia de procesamiento y mejoras en la optimización y rendimiento para la ejecución de aplicaciones. Por último, dispone de una API⁸ [22] basada en nodos con una documentación extensa y bien detallada, soportada por la propia compañía y por expertos en la herramienta.

1.4.1.5 Visual Studio

Aunque esta API es nativa del motor de desarrollo, se ha utilizado *Visual Studio 2022*, un entorno de desarrollo integrado (IDE) que ofrece funcionalidades para facilitar el desarrollo de aplicaciones [23]. Incluye módulos diseñados para trabajar con diversos lenguajes de programación y plataformas. La elección de este IDE se basa en su integración nativa y soporte específico para el lenguaje de programación utilizado en *Unreal Engine 5* [24], lo que garantiza una experiencia de desarrollo eficiente, especialmente en el proceso de investigación sobre la implementación de guantes hápticos a bajo nivel. Esto contribuye a una mejor comprensión del enfoque estructural y del desarrollo del código necesario para el trabajo.

1.4.1.6 Herramientas de Scrum

Para la organización y gestión del proyecto, se han empleado diversas aplicaciones que facilitan la planificación de las tareas con el objetivo de ejecutarlas de manera eficiente.

GitHub [25] se ha utilizado como sistema de control de versiones para mantener actualizadas las versiones más recientes del proyecto y realizar copias de seguridad del desarrollo, donde se aloja el repositorio de este estudio. Por otro lado, para la gestión de tareas, se empleó *Pivotal Tracker* [26], una herramienta de gestión ágil de proyectos que permite planificar, priorizar y realizar un seguimiento de las tareas de desarrollo de software en equipos colaborativos. La mayoría de las tareas tenían una duración de dos

⁸ Interfaz de programación de aplicaciones.

semanas, lo que coincidía con el intervalo entre las reuniones acordadas con los tutores del trabajo.

1.4.1.7 Excel

Se ha utilizado el formato de archivo CSV [27] para la realización y guardado de los datos, este sigue una estructura de datos y valores. CSV permite almacenar los datos de manera sencilla y legible. En este tratamiento de datos, se ha utilizado la herramienta de *Excel* de *Microsoft*, con la que se han limpiado datos y realizado distintos gráficos para poder analizar con claridad los resultados obtenidos. Además, se han sacado medias, medianas, varianzas y desviaciones y se han realizado contrastes entre las hipótesis para analizar el comportamiento general de los usuarios de pruebas. De esta forma se puede saber si los resultados son generalizables.

1.4.1.8 OBS

Para el registro de las pruebas de usuario se ha utilizado *OBS Studio* [28], un software de código abierto utilizado para la grabación y transmisión en vivo de contenido multimedia que permite capturar vídeo y audio desde diversas fuentes, como cámaras web, micrófonos y ventanas de aplicaciones.

1.4.2 Plan de trabajo

Para mantener un seguimiento del avance del proyecto y establecer una rutina de trabajo, se acordaron reuniones periódicas bisemanales con los tutores. La planificación detallada se encuentra en la Tabla 1.1.

Fecha	Tareas realizadas
Mayo 2023	Planteamiento de la idea original, formación de grupo de trabajo y acuerdo con directores de proyecto.
Septiembre 2023	Planificación regular del trabajo, selección de tecnologías, programación periódica de reuniones con supervisores y comienzo de la tarea.
Octubre 2023	Investigación y diseño del primer prototipo de entorno. Primer estudio sobre el estado del arte.
Noviembre 2023	Implementación del prototipo de NOVA en Unreal Engine 5 y creación de un sistema de físicas sin implementar
Diciembre 2023	Diseño y prototipado del sistema de físicas con primeras utilidades con guantes.
Enero 2024	Finalización del sistema de físicas con guantes y primer prototipo con guantes.
Febrero 2024	Diseño e implementación de bases de datos. Desarrollo de interacciones con guantes.
Marzo 2024	Conexión del registro de datos con interacciones físicas de guantes y mandos. Diseño de un primer entorno virtual con interacciones.
Abril 2024	Finalización del sistema de físicas con guantes. Planificación y realización con los sujetos involucrados en las pruebas de usuario
Mayo 2024	Recopilación de datos obtenidos. Redacción de la memoria y conclusiones del trabajo
Junio 2024	Presentación del trabajo ante el tribunal y publicación de este.

Tabla 1.1: Plan de trabajo.



Figura 1.1: Diagrama de Gantt del flujo de trabajo.

1.5 Estructura del resto del documento

En esta sección, se ofrece un resumen esquemático de los capítulos y secciones siguientes del documento, y proporciona una visión general del contenido y del orden en que se presentan los aspectos fundamentales de la investigación.

En el Capítulo 2 se realiza un análisis del estado del arte para explorar tecnologías que desempeñan un papel similar al propuesto en este trabajo, además de exponer que características no se abordan completamente, lo que orientará el desarrollo futuro del proyecto. En este capítulo se investiga acerca de experiencias de usuario en este sector, como la adaptación de estos en entornos virtuales, y los posibles beneficios cognitivos.

La arquitectura y organización del proyecto se detallan en el Capítulo 3. Se definen las dependencias de los principales componentes del proyecto y la jerarquía de clases que siguen en el marco de la aplicación.

El Capítulo 4 presenta los proyectos base nativos de *Unreal Engine 5*, desarrollados y publicados por la comunidad y diferentes empresas, los cuales han servido como base para el desarrollo e incorporación de algunas funcionalidades en el proyecto. Además,

este capítulo, describe la implementación y los elementos que componen el sistema de interacciones, el guardado de datos y el comportamiento interno de todos ellos.

En el Capítulo 5, se desglosa la evaluación de usuarios y los datos obtenidos. Se incluye el proceso de evaluación, en el que se contempla el número de usuarios que han participado, los experimentos realizados y sus respectivos perfiles. Por último, se analizan los resultados obtenidos al seguir este proceso de evaluación y se obtienen conclusiones en base a estos.

En el Capítulo 6, se discuten las ventajas e inconvenientes a partir de los análisis obtenidos que presenta este proyecto. Se contrastan con lo abordado en la Sección 1.2 para determinar qué objetivos se han cumplido y cuáles no se han superado.

El Capítulo 7 es la conclusión de este trabajo, fundamentada en los resultados obtenidos y la resolución alcanzada en el capítulo anterior. Del mismo modo, también se detallan los aspectos que se han quedado pendientes para desarrollar en futuras investigaciones.

Por último, el Capítulo 8 refleja las contribuciones realizadas por los miembros del equipo que han colaborado en el proyecto

Capítulo 2 - Estado del arte

En este capítulo se detalla el estado del arte de los sistemas de realidad virtual y se abordan sus componentes y diferentes niveles de inmersión. También se examina el renderizado háptico y su importancia en la creación de experiencias más inmersivas, con especial atención en el uso de guantes hápticos como *SenseGlove*. Se presentan casos de estudio relevantes que demuestran la aplicación práctica de estas tecnologías en diversos sectores, y se proporciona una base sólida para el desarrollo y mejora de futuros proyectos en este ámbito. También se analiza el estado de experiencias previas de usuario, focalizadas en la adaptación, inmersión y retención de información en los sistemas de realidad virtual existentes.

2.1 Sistemas de Realidad Virtual

El ser humano ha tratado de crear experiencias inmersivas para las personas desde hace décadas [29] pero no fue hasta el año 1987 cuando se introdujo el término de realidad virtual por *Jaron Lanier* [30]. *Lanier* era el propietario de una empresa pionera en investigación de gráficos 3D y experiencias inmersivas, la cual desarrolló el primer equipamiento de realidad virtual disponible en el mercado.

Realidad virtual [29] es el uso de modelado y simulación por ordenador que permite a una persona interactuar con un entorno tridimensional. Las aplicaciones de realidad virtual consiguen dar la ilusión al usuario de estar inmerso en la simulación mediante sensores que captan sus movimientos y ajustan la vista del usuario en la simulación.

2.1.1 Componentes de los sistemas de realidad virtual

Para crear una experiencia inmersiva, es esencial contar con una combinación adecuada de componentes. Estos pueden dividirse en dos grandes subsistemas [31], el hardware y el software que, a su vez, se dividen en varios subsistemas.

El hardware [32] se refiere a cualquier componente físico que se pueda tocar. En los sistemas de realidad virtual, se divide en tres subsistemas [31]:

- Dispositivos de entrada.

Capturan la entrada del usuario, y le permiten interactuar con el mundo virtual. Estos dispositivos pueden tomar diversas formas, desde sensores de movimiento hasta controladores y dispositivos hápticos.

- Motor de realidad virtual.

Es el núcleo del sistema, encargado de la simulación. Recibe la entrada de usuario a través de los dispositivos de entrada y modifica la simulación acorde a dicha entrada, para dar retroalimentación al usuario a través de los dispositivos de salida.

- Dispositivos de salida.

Entregan retroalimentación al usuario de la simulación del entorno virtual. Se clasifican según la manera en la que informan al usuario de la simulación: visuales, como monitores o visores, auditivos y hápticos.

El software [32] se refiere al sistema operativo, programas, aplicaciones y herramientas para el diseño y desarrollo informático. En el contexto de los sistemas de realidad virtual, incluyen las herramientas para el diseño, desarrollo y mantenimiento de entornos virtuales. En estos sistemas, se distinguen dos subsistemas de software [31], herramientas de modelado y de desarrollo.

2.1.2 Tipos de realidad virtual

Los sistemas de realidad virtual pueden clasificarse en tres categorías [31], basadas en el nivel de inmersión de este y el tipo de interfaces o componentes del que se compone:

- Realidad virtual no inmersiva.

Este tipo de sistemas es el menos inmersivo y, a su vez, el menos costoso de todos, pues requiere de los componentes menos sofisticados. Permite al usuario interactuar con un entorno tridimensional a través de un monitor especial de visualización y gafas estereoscópicas, que permiten crear la ilusión de profundidad. Además, pueden incluir controladores espaciales creados específicamente para este tipo de sistemas.

- Realidad virtual inmersiva.

Son los más inmersivos y a su vez los más complejos, pues requieren de numerosos componentes. El más importante es el visor, que se coloca a la altura de los ojos, y proporciona una visualización en primera persona del entorno virtual. Además, estos sistemas incluyen dispositivos de seguimiento que monitorizan los movimientos de la cabeza y el cuerpo, y permiten una interacción más natural y precisa con el entorno virtual. Pueden usarse estos sistemas con otros dispositivos como guantes hápticos para proporcionar una mayor inmersión.

- Realidad aumentada y Realidad Mixta.

Este tipo de sistemas de realidad virtual también se denominan semi inmersivos pues combinan elementos de la realidad con elementos del entorno virtual [33].

2.2 Renderizado háptico

La háptica [34] es la ciencia y técnica de transmitir y comprender información a través del sentido del tacto. Esta se usa en el día a día. Por ejemplo, en los teléfonos móviles se utiliza para proporcionar retroalimentación táctil mediante vibraciones. De igual manera, se usa en los mandos de videoconsolas mediante vibraciones e incluso, más recientemente, mediante el bloqueo de los gatillos, como es el caso en la PS5, para simular resistencia de las interacciones virtuales como, por ejemplo, la resistencia del gatillo de un arma de fuego. Además, en la industria de la realidad virtual y aumentada, la háptica desempeña un papel crucial al proporcionar sensaciones táctiles orgánicas que complementan las experiencias visuales y auditivas, lo que resulta en una mayor sensación de presencia y realismo para el usuario.

Aunque la háptica se ha usado desde hace años en la tecnología [35] , el panorama de estos dispositivos en la actualidad es todavía algo prematuro [35]. A pesar de tener varios años de investigación, hay muchas variables que hacen que desarrollar un dispositivo háptico ideal sea imposible con los descubrimientos actuales.

Un dispositivo háptico ideal es un dispositivo capaz de transmitir sensaciones que hagan creer a la persona que lo usa que realmente no lleva nada y que todo lo que siente es real. Los dispositivos más capaces de llegar a conseguir este objetivo son los guantes hápticos [4], aunque su complejidad los hace poco accesibles para el público general.

2.2.1 Arquitectura

Renderizado háptico [36] es el proceso software, mediante el cual se transforma la información que se obtiene del dispositivo háptico en base a una serie de algoritmos para permitir al usuario interactuar con el mundo virtual y recibir, a su vez, retroalimentación física a través de dicho dispositivo. La Figura 2.1, representa una arquitectura para el renderizado háptico y como se comunica con el resto de la simulación.

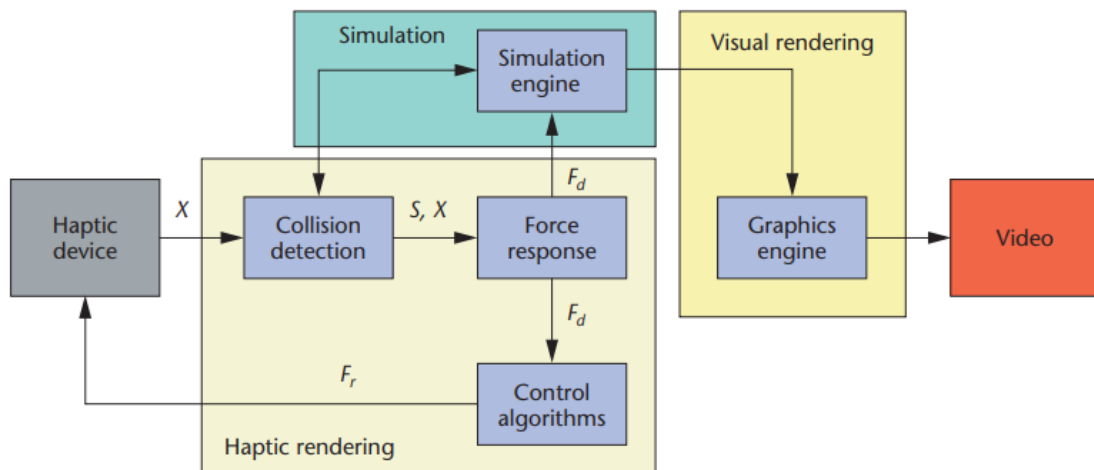


Figura 2.1: Arquitectura de un sistema de renderizado háptico [36].

La Figura 2.1 muestra una iteración normal para una arquitectura de renderizado háptico, que es la siguiente:

- Se obtiene la posición X del dispositivo háptico en sistema cartesiano.
- Esta posición X pasa a un algoritmo de detección de colisiones (*Collision detection*) que, con ayuda del motor de simulación (*Simulation engine*), calcula las colisiones que se hayan podido producir entre el usuario y objetos virtuales. El algoritmo devuelve información relevante sobre estas colisiones (S), que pasa directamente,

junto con la posición (X) del dispositivo háptico al algoritmo de respuesta de fuerza (*Force response*).

- El algoritmo de respuesta de fuerza calcula la fuerza ideal (F_d) que habría que aplicar sobre los objetos de la simulación que han colisionado sobre el usuario y sobre los dispositivos hápticos. Se hablará un poco más sobre el cálculo de estas fuerzas más adelante, en este mismo capítulo.
- No obstante, esta fuerza resultante no va directamente a los guantes hápticos, pasa primero por unos algoritmos de control (*Control algorithms*) que aproximan esa fuerza ideal resultante del anterior algoritmo, a una fuerza (F_r) que se adapte a las capacidades del dispositivo háptico.

2.2.2 Algoritmos de respuesta de fuerza

Los humanos son capaces de percibir el contacto con objetos reales gracias a unos sensores situados en la piel, articulaciones, tendones y músculos, los mecanorreceptores [37], un tipo especial de neurona que detectan estímulos como el tacto, la presión y la vibración. Estas neuronas proporcionan bastante información acerca del objeto con el que se interactúa, que se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Información táctil.

Se adquiere mediante los mecanorreceptores situados en la piel y proporciona detalles sobre la superficie del objeto, como la textura y la fricción.

- Información cinestésica.

Se obtiene mediante los mecanorreceptores de las articulaciones y proporciona detalles sobre la forma del objeto.

Para poder proporcionar una buena inmersión y hacer que la interacción háptica resulte creíble, se tiene que proporcionar al usuario estos dos tipos de información. La tecnología háptica actual permite calcular con efectividad la fuerza en respuesta a una interacción háptica en casos simples, pero el caso de la retroalimentación táctil es mucho más complicado; por eso por lo que no existe un dispositivo háptico ideal.

Se pueden distinguir dos tipos de algoritmos según la información que se le quiera proporcionar al usuario:

- Basados en la geometría del objeto.

Este tipo de algoritmo intenta recrear la realimentación de fuerza y proporcionar la información cinestésica que un usuario sentiría al interactuar con un objeto sin ningún tipo de textura o fricción. Solo basado en la geometría y flexibilidad de la representación del dispositivo háptico en el entorno virtual.

- Basados en las propiedades de la superficie.

Este tipo de algoritmo intenta recrear la realimentación táctil, y proporcionar la información que un usuario sentiría al interactuar con un objeto con textura o fricción, solo basado en su superficie y sus propiedades.

2.2.3 Aplicaciones de la tecnología háptica

La tecnología háptica se aplica a numerosos campos, desde la medicina hasta el entretenimiento y la enseñanza entre otros campos.

Unos de los campos donde más destaca el uso de esta tecnología es la medicina, en especial en la formación médica. Por ejemplo, el simulador *HapTEL* [38] se usa en el campo de la odontología para que los estudiantes practiquen técnicas de perforación dental con retroalimentación táctil, lo que mejora su destreza y precisión. Existen también dispositivos pensados para ayudar durante cirugías. Este es el caso del dispositivo *ARAKNES* [39], que permite al cirujano realizar operaciones mínimamente invasivas a la vez que recibe retroalimentación táctil. Otros dispositivos como el *YouGrabber* [40] o sistemas como el *I-TRAVLE* [40] y el *VERA System* [41] ayudan en la rehabilitación de pacientes.

Otro de los campos donde destaca el uso de la háptica es en la educación [38]. Se usan dispositivos para la enseñanza en ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas, lo que permite a los estudiantes interactuar físicamente con modelos y experimentos virtuales para una mejor comprensión de los conceptos. Además, también se usan en simulaciones educativas para entrenar a profesionales en distintas áreas

como la aviación, cirugía y manejo de maquinarias pesadas entre otras. Ejemplos de dispositivos usados en la educación son el dispositivo *Hapkit* [42] o el *Haptic Paddle* [43].

Otros dispositivos no tienen un objetivo específico, si no que pueden usarse en distintas áreas, desde el entretenimiento y los videojuegos, como el *HaptX* [44], el modelado 3D, hasta el desarrollo de aplicaciones con otro tipo de propósito, como *SenseGlove*.

2.3 Experiencias de usuario en realidad virtual

La realidad virtual ha emergido como una herramienta poderosa para el aprendizaje y la capacitación profesional. La RV permite a los usuarios interactuar con entornos simulados de manera inmersiva, y facilita el acceso al conocimiento de una forma más activa y práctica. En particular, la aplicación de la RV en situaciones de alto riesgo ha demostrado ser efectiva para mejorar las capacidades de respuesta de los profesionales [45].

El potencial de la realidad virtual no solo se limita al ámbito educativo; también se extiende a diversos sectores, que incluyen la medicina, la arquitectura, la ingeniería, y el entretenimiento. En medicina se emplea para la detección y tratamiento de trastornos mentales, como el estrés postraumático y distintas fobias y trastornos de ansiedad, de tal forma que proporciona entornos controlados y seguros para la terapia de exposición y la evaluación psicológica [46]. En arquitectura, la RV facilita la visualización de proyectos en tres dimensiones, y permite a los diseñadores y clientes experimentar y modificar espacios antes de la construcción [47] [48]. En el campo del entretenimiento, además de los videojuegos, la RV transforma la manera en que se consume el contenido multimedia, además de proporcionar experiencias inmersivas en cine y turismo virtual [49] [50]. Estas aplicaciones demuestran que la RV es una herramienta versátil con un amplio rango de beneficios potenciales en múltiples disciplinas.

La realidad virtual ha emergido como una herramienta poderosa para el aprendizaje y la capacitación profesional [51]. Además, permite a los usuarios interactuar con entornos simulados de manera inmersiva, y facilita el acceso al conocimiento de una forma más activa y práctica. En particular, la aplicación de la RV

en situaciones de alto riesgo ha demostrado ser efectiva para mejorar las capacidades de respuesta de los profesionales [45].

Las primeras interacciones con la RV suelen enfocarse en la familiarización con el entorno virtual y la navegación básica. Este primer contacto es crucial para el éxito de la experiencia de aprendizaje, ya que una interfaz intuitiva y una experiencia de usuario positiva pueden aumentar la retención de conocimientos y habilidades [52].

2.3.1 Estudios sobre la curva de aprendizaje inicial en RV

La curva de aprendizaje inicial en realidad virtual es un aspecto crucial que determina la efectividad y la aceptación de esta tecnología tanto en contextos educativos como de formación y de entretenimiento [53].

Diversas investigaciones han demostrado que los usuarios experimentan una fase de adaptación al comenzar a interactuar con la RV, donde la familiarización con los controles y la navegación es esencial [54]. Los factores que afectan la curva de aprendizaje incluyen la complejidad de los controles, la calidad de los gráficos y la latencia [55] [56] [57].

2.3.2 Beneficios cognitivos

La inmersión en entornos virtuales puede mejorar la memoria espacial y la capacidad de aprendizaje. Varios estudios han mostrado que la RV puede aumentar la retención de información al permitir a los usuarios experimentar situaciones de manera más realista y envolvente [58]. Además, la RV puede mejorar la atención y la concentración, ya que los entornos virtuales inmersivos suelen eliminar las distracciones externas, y permite a los usuarios enfocarse mejor en la tarea en cuestión.

2.3.3 Videojuegos en realidad virtual

Los videojuegos en realidad virtual representan una de las aplicaciones más populares y de rápido crecimiento de esta tecnología [59]. La capacidad de crear experiencias inmersivas y envolventes ha revolucionado la industria del entretenimiento, de tal forma que ofrece a los usuarios una sensación de presencia y realismo sin precedentes [60].

La historia de la VR en los videojuegos comenzó en la década de 1960, con los primeros experimentos en simulaciones, como señala *Jaron Lanier* en su libro *Dawn of the New Everything*, "La realidad virtual nos ofrece una nueva forma de percibir y experimentar el mundo, llevándonos más allá de las limitaciones físicas" [61]. Sin embargo, fue en los años 2015 y 2016 cuando la tecnología se volvió más accesible para el público general, gracias a dispositivos como *Oculus Rift* y *HTC VIVE*, junto con la incorporación de cientos de empresas al desarrollo de productos de RV [62]. Estos avances permitieron que la RV dejara de ser una curiosidad tecnológica para convertirse en una herramienta integral del entretenimiento digital.

La tecnología detrás de la RV incluye componentes clave como los cascos de realidad virtual o *HMD*⁹, sensores de movimiento y controladores de mano. Los *HMD*, como *Oculus Rift* y *HTC Vive*, ofrecen pantallas de alta resolución y seguimiento preciso de la cabeza, mientras que los sensores permiten un seguimiento exacto de los movimientos del usuario, y los controladores de mano facilitan la interacción dentro del entorno virtual [63].

Entre los videojuegos más populares de RV se encuentran títulos como *Beat Saber*, un juego de ritmo que combina música y acción, y *Half-Life: Alyx*, conocido por su narrativa envolvente y mecánicas de juego innovadoras [64]. Estos juegos no solo han capturado la atención de los usuarios, sino que también han demostrado el potencial de la RV para ofrecer experiencias únicas e inmersivas. *Cory Shilling* de *Bleeding Fool* destaca que "la Realidad Virtual representa un cambio revolucionario en la narración de videojuegos. Al sumergir a los usuarios en un entorno completamente 3D, la RV ofrece un nivel de inmersión narrativa sin precedentes" [65].

El impacto de la RV en la industria de los videojuegos ha sido profundo, lo que ha abierto nuevas posibilidades para la creación de contenidos y la interacción de los usuarios [7]. Con avances tecnológicos continuos, tales como la integración de tecnologías hápticas en los videojuegos en RV, se puede aumentar significativamente la sensación de inmersión y la satisfacción del usuario [66], por lo que según *U-Tech*

⁹ Head Mounted Display: Tecnología de proyección integrada en gafas o casco de RV.

Technologies, "a medida que la tecnología sigue mejorando, se espera que los juegos de realidad virtual se vuelvan aún más populares, atrayendo a una audiencia más amplia de usuarios y desarrolladores por igual" [67].

2.4 SenseGlove

SenseGlove Inc. [18] es una empresa fundada en 2014 por *Emmanuel Ferran*, un ingeniero francés con experiencia en robótica y realidad virtual. La empresa tiene su sede en París, Francia, y cuenta con un equipo de ingenieros y científicos que se centran en el desarrollo de la tecnología háptica.

SenseGlove se dedica al desarrollo de tecnologías hápticas innovadoras que permiten a las personas interactuar con el mundo digital de una manera más natural e intuitiva. La empresa ha desarrollado varios guantes hápticos que ofrecen retroalimentación táctil precisa y fiable, lo que lo convierte en una herramienta ideal para una amplia gama de aplicaciones que incluye entrenamiento, juegos, educación y rehabilitación.

Varios proyectos existentes han utilizado la tecnología que ofrece *SenseGlove* para desarrollar experiencias inmersivas de RV con interacciones hápticas. Por ejemplo, *E-learning Design Center* en el proyecto *MedVR* [68] ha empleado esta tecnología para mejorar los programas de entrenamiento en el ámbito de la salud. La capacidad de sentir tanto los instrumentos como a los pacientes virtuales permite una práctica más efectiva e inmersiva, crucial para la formación de profesionales médicos.

Otro caso destacado es *Volkswagen Car Assembly Training* [69], que ha experimentado con la combinación de RV y guantes hápticos para optimizar su programa de preentrenamiento. Esta integración permite a los empleados de *Volkswagen* entrenar desde cualquier ubicación sin necesidad de acceder físicamente a los vehículos, de tal forma que aumenta la eficiencia y el realismo del entrenamiento.

En resumen, *SenseGlove Inc.* es una empresa dedicada al desarrollo de tecnologías hápticas avanzadas que permiten interacciones más naturales e inmersivas con entornos digitales. Esta empresa ha creado guantes hápticos innovadores que son ideales para diversas aplicaciones, como entrenamiento, educación y rehabilitación.

La capacidad de ofrecer una retroalimentación táctil precisa hace que *SenseGlove* sea una buena opción para mejorar la efectividad y realismo en diferentes áreas de formación y práctica profesional.

Capítulo 3 - Arquitectura del Proyecto

En este capítulo se describen las partes que componen el proyecto y cómo se relacionan entre sí. También se explica la estructura de los módulos que lo conforman y qué archivos están incluidos en cada uno de ellos.

3.1 Clases y componentes

Esta sección expone brevemente las clases y componentes utilizados por cada instancia, así como los afines a ambas y como se relacionan entre ellos. La información más detallada acerca del uso e implementación se puede ver en el Capítulo 4 de este documento.

3.1.1 Tipos de usuario dependiendo de la entrada

La clase *Pawn*, nativa de *Unreal Engine 5*, actúa como clase base para nuevas clases, donde se redefinen aspectos como la recepción de todos los eventos de entrada, la funcionalidad del movimiento del usuario, la retroalimentación visual de la mano al interactuar con un objeto, y la llamada a los eventos de interacción correspondientes. Tras realizar cualquiera de estos eventos, la clase desarrollada procede a comunicarle al registro de datos que tipo de interacción se ha producido. Cada tipo de instancia de mandos o guantes presenta eventos de entrada diferentes, por lo que se requiere de una separación, se implementa de esta forma un *BP_Player*, para mandos, que recibe la entrada de usuario que sigue unos eventos preestablecidos por el propio motor de *Unreal Engine 5*; y *BP_SG_Player*, para guantes, que recibe la entrada de los guantes.

3.1.2 Objetos interactivos y tipos de agarre

En el apartado anterior se ha comentado como el usuario llama a los eventos de interacción de los objetos. Cada objeto presenta las funciones agarrar (*PickUp*) y soltar (*Drop*). Ambas están definidas en una clase padre presente en cada objeto interactivo llamada *Pickable_Item*. Los objetos de cada tipo heredan de esta clase padre, y redefinen el comportamiento de agarrar o soltar según el tipo de objeto que sean. Cada

objeto utiliza la llamada a la función de la clase padre como una señal de inicio de interacción. Existen dos tipos de anclajes para los objetos dinámicos según el tipo de agarre:

Por una parte, está el agarre libre, los objetos con este tipo de agarre se anclan a la mano virtual y según el punto desde el que se realice el agarre, este se establece donde haga contacto con la mano virtual al interactuar. De esta forma se da libertad al usuario para agarrar el objeto de diferentes puntos, y tiene más rango de movimiento para el objeto. Con este tipo de interacciones, los objetos se mueven y rotan con físicas e inercias que siguen el movimiento de la mano por ese punto de anclaje. En este proyecto se han utilizado cubos, que tienen un tamaño pequeño, como la mano virtual, y conos¹⁰, de un tamaño más grande.

El otro tipo de agarre es fijo. Los objetos con este agarre se fijan a una posición y rotación fijas respecto a la mano virtual y se mueven con relación a esta, como si formaran parte de ella. De esta forma el usuario pierde libertad a la hora de agarrar y mover el objeto, pero gana precisión en las interacciones. En el proyecto hay dos tipos de objetos de este tipo, los dispositivos EPD¹¹ y SABG-100¹².

Por otra parte, existen objetos fijos, estos no presentan el mismo funcionamiento de agarrar y soltar que los objetos dinámicos, sino que rotan en un rango con respecto a un punto de anclaje y según donde se aplique la fuerza para moverlos. En el proyecto se han incluido dos objetos de este tipo, puertas y palancas.

De forma paralela a la función de agarre, está la función de soltar (*Drop*), con la que cada objeto define el comportamiento que deben seguir sus componentes cuando este ha dejado de ser interactuado por el usuario.

¹⁰ Conos de tráfico convencionales. Al igual que los objetos EPD y SABG100 han sido extraídos del proyecto ADARVE. Su función es ejemplificar las interacciones con agarre libre.

¹¹ Dispositivo diseñado para la vigilancia radiológica. Tanto este objeto como el dispositivo SABG han sido extraídos del proyecto ADARVE y se utiliza como ejemplo de interacción dinámica con agarre anclado.

¹² Dispositivo diseñado para detectar emisiones radiológicas. Al igual que el objeto EDP, forma parte del proyecto ADARVE, y se utiliza solamente para ejemplificar interacciones con agarre anclado.

Respecto a la recolección y registro de datos, cada objeto *Pickable_Item*, tiene como padre una clase *BP_Interact_Item_Parent*, que incluye funciones para llamadas a eventos de la clase encargada de registrar las interacciones de agarrar y soltar en la tabla de datos correspondiente.

3.1.3 Instancias de la aplicación

Como se comenta en la Sección 1.3, uno de los objetivos principales del estudio consiste en diseñar dos escenarios idénticos para ejecuciones con mandos y guantes. Por consiguiente, para poder implementar el uso e interacciones de las diferentes versiones, el proyecto se encuentra dividido en dos instancias, que emulan el mismo comportamiento, pero ambas con sus propias implementaciones. La primera para mandos, llamada *RR_GameInstance*, se encarga de gestionar que los componentes relacionados con la entrada del usuario de mandos, y la relación de este con las interacciones físicas, se comuniquen con la clase encargada de registrar de datos mediante eventos implementados en otras clases específicas de la instancia correspondiente a los mandos. La segunda instancia para guantes, llamada *RR_SG_GameInstance*, gestiona de igual manera los componentes, sus relaciones y la comunicación para poder registrar los datos, que, a diferencia con su contraparte de mandos, recibe los componentes específicos de esta instancia, provenientes del usuario y los objetos.

Hay que aclarar, que ambas instancias no implican una duplicación de clases entre sí, hay clases y componentes que heredan de clases padre ¹³ que son comunes en ambas instancias.

3.2 Jerarquía de clases

Como último punto de la arquitectura del proyecto, es imperativo explicar el flujo de ejecución. Gracias a ello, se puede entender la razón detrás de las dependencias descritas en el apartado 3.1.

¹³ Una clase padre es una clase que es extendida por otras clases, que comparte sus atributos y métodos.

Como se muestra en la Figura 3.1, el diagrama de clases¹⁴ representa de forma general los componentes y clases del proyecto, además de sus dependencias y relaciones entre ellas.

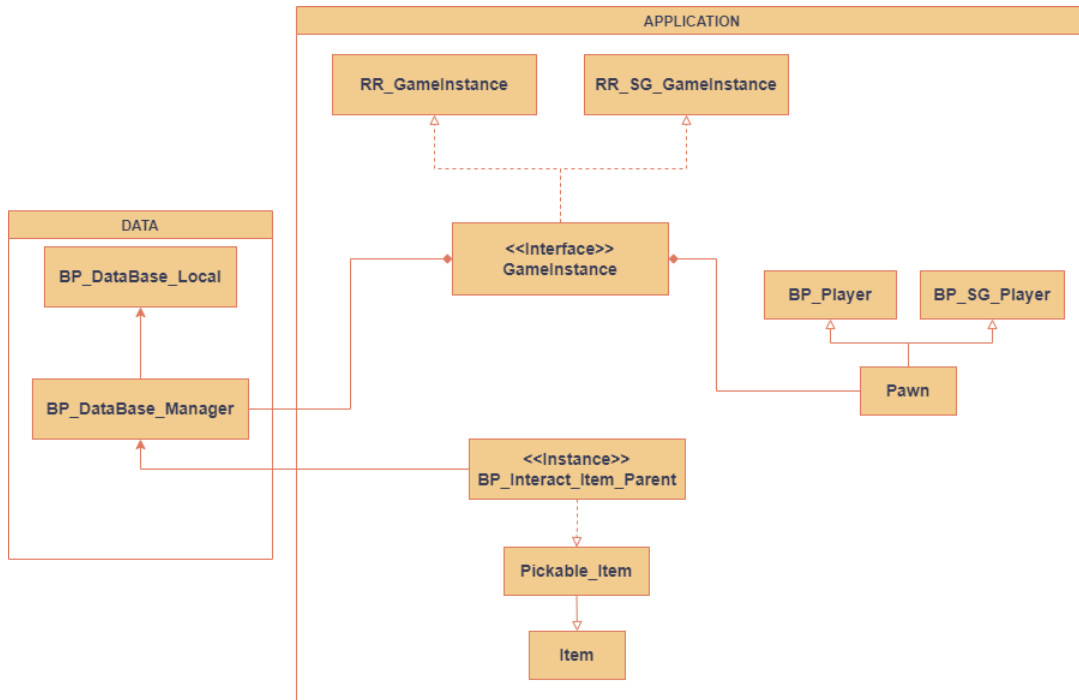


Figura 3.1: Diagrama de clases del proyecto de Unreal Engine.

Al ejecutar la aplicación, se lanza el escenario inicial perteneciente a su instancia, donde se crea un *blueprint DataBase_Manager*¹⁵ con datos correspondientes al usuario y al dispositivo de entrada asignado. Una vez se crea el usuario, *BP_SG_Player* para guantes, o *BP_Player* para mandos, realiza las diferentes acciones que dependen de la instancia inicial. Las diferentes clases involucrados en la interacción, llaman a *BP_Item_Interaction*, que realizará de manera independiente el uso de las funciones del *DataBase_Manager* de datos y llamadas a otras clases, si es que lo necesitan. Terminada

¹⁴ Un diagrama de clases es una herramienta esencial para visualizar, especificar, construir y documentar sistemas de software y su comportamiento. Se basa en utilizar un conjunto de notaciones y técnicas para representar gráficamente los diversos aspectos de un sistema.

¹⁵ Manager: encargado de la gestión de uno o varios comportamientos del programa donde está presente

la ejecución, la aplicación llama a *DataBase_Manager* y se cierran esta y cada uno de los CSV correspondientes al usuario de prueba y su dispositivo de entrada.

Capítulo 4 – Extensiones relacionadas con la realidad virtual, implementación de interacciones, registro de datos y diseño de escenarios

A continuación, se comentan los aspectos más importantes de la implementación de las interacciones, el registro de datos y el diseño de escenarios que componen el proyecto.

Para realizar las extensiones que requiere nuestro proyecto, se ha partido de la base de varios proyectos de *Unreal Engine* que han aportado diferentes funcionalidades, como la integración de guantes hápticos y su interacción con objetos cinemáticos¹⁶, o la interacción con ratón y teclado de objetos dinámicos¹⁷. Se han juntado las diferentes funcionalidades en un mismo proyecto, se han implementado escenarios de físicas reales con objetos interactivos en realidad virtual, con la posible interacción tanto de mandos convencionales como de guantes hápticos, para poder realizar una comparativa de ambos dispositivos de entrada en las sucesivas pruebas de usuario. Y finalmente se han recogido los datos de estas para su posterior análisis. Todas estas interacciones fueron desarrolladas en un proyecto independiente, para posteriormente ser integradas en el proyecto *ADARVE*.

4.1 Extensiones relacionadas con Realidad Virtual y entornos de físicas

En este apartado, se analizan diversas extensiones y herramientas utilizadas en *Unreal Engine* para el desarrollo de este proyecto. Estas herramientas ofrecen plataformas robustas y versátiles que permiten a los desarrolladores crear experiencias

¹⁶ Objeto que sigue una trayectoria controlada por el usuario y no está influenciado por la física del motor del juego, como la gravedad o las colisiones.

¹⁷ Objeto que está influenciado por la física del motor del juego, como la gravedad o las colisiones.

inmersivas y realistas en múltiples contextos. A continuación, se analizan los tres proyectos base utilizados para el desarrollo de este proyecto.

4.1.1 Proyecto base de Unreal Engine para Realidad Virtual

El escenario de realidad virtual proporcionado por *Unreal Engine 5* constituye una herramienta fundamental en el desarrollo de aplicaciones inmersivas. Esta plantilla ¹⁸ ofrece una plataforma robusta que permite a los desarrolladores crear experiencias de realidad virtual de alta calidad. En el presente análisis, se examina el estado actual de la plantilla de *Unreal Engine 5* y su relevancia en el ámbito del desarrollo de aplicaciones de Realidad Virtual.

Una de las principales ventajas de esta plantilla radica en su capacidad para integrar una variedad de hardware de RV mediante el uso de *OpenXR* [70] como sistema de interfaces para recibir la entrada de diferente *hardware*. Esta flexibilidad facilita el desarrollo de aplicaciones de RV que sean compatibles con una amplia gama de visores de realidad virtual, como *Oculus Quest* y *HTC Vive*.

Además, incluye una serie de funcionalidades que permiten al usuario interactuar con el entorno virtual. Como interactuar con objetos y desplazarse por el entorno, lo que proporciona una experiencia inmersiva.

Varios proyectos existentes han utilizado la plantilla de *Unreal Engine 5* para desarrollar experiencias inmersivas de RV. Por ejemplo, el proyecto *Assessing the validity of VR as a training tool for medical students* [71], 2024 [72], una experiencia de entrenamiento en RV para profesionales médicos, que destaca por la precisión de las interacciones y la fidelidad visual del entorno virtual.

En resumen, la plantilla de realidad virtual de *Unreal Engine 5* representa una opción poderosa y versátil para el desarrollo de aplicaciones de RV. Su capacidad para integrar diferente hardware y sus robustas funcionalidades de interacción lo convierten en una herramienta invaluable para crear experiencias inmersivas y educativas.

¹⁸ Proyectos que sirven como base para la creación de otros proyectos o documentos.

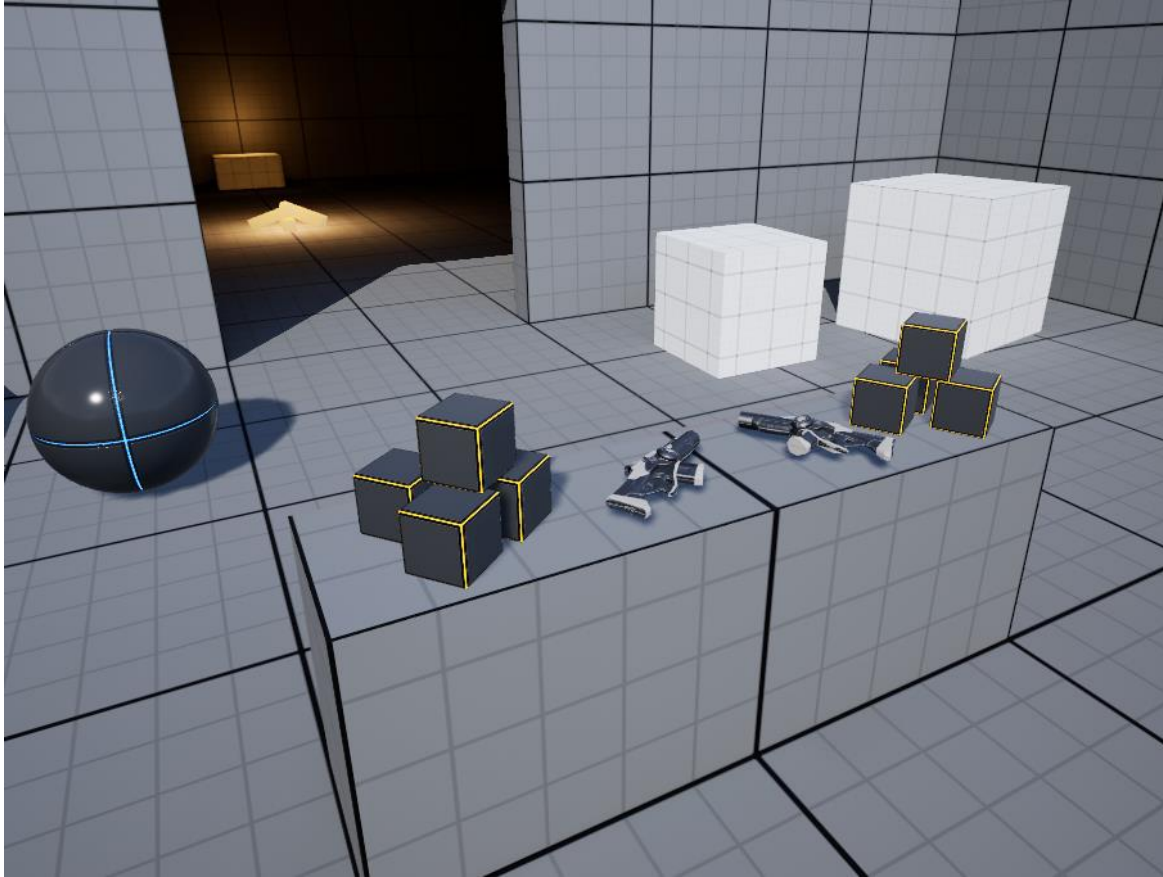


Ilustración 4.1: Captura de pantalla de la plantilla de Unreal Engine para aplicaciones de realidad extendida.

4.1.2 Proyecto base de SenseGlove para Unreal Engine

El escenario de Realidad Virtual proporcionado por SenseGlove [73] para *Unreal Engine* constituye una herramienta fundamental en el desarrollo de aplicaciones inmersivas con interacciones hápticas. El entorno ofrece una plataforma robusta que permite a los desarrolladores crear experiencias de realidad virtual de alta calidad con una interacción natural.

Una de las principales ventajas radica en su capacidad para integrar los guantes hápticos, lo que permite generar eventos en tiempo real basados en la captura del movimiento y la posición de las manos del usuario. Esta funcionalidad es crucial para aplicaciones que requieren una interacción precisa con objetos virtuales. La capacidad de sentir y manipular estos objetos con una sensación orgánica podría mejorar la experiencia de inmersión y la percepción del entorno virtual.

Sin embargo, la plantilla presenta la limitación de que su lógica y programación subyacentes no son accesibles ni modificables desde el editor de *Unreal Engine*. Este encapsulamiento del código a nivel de motor requiere recompilar manualmente *Unreal Engine* para realizar cualquier modificación, un proceso complejo que puede afectar la estabilidad del motor. Estas restricciones limitan la capacidad de personalizar y optimizar el comportamiento de este, lo que plantea desafíos significativos para el desarrollo de proyectos que requieren un alto grado de personalización.

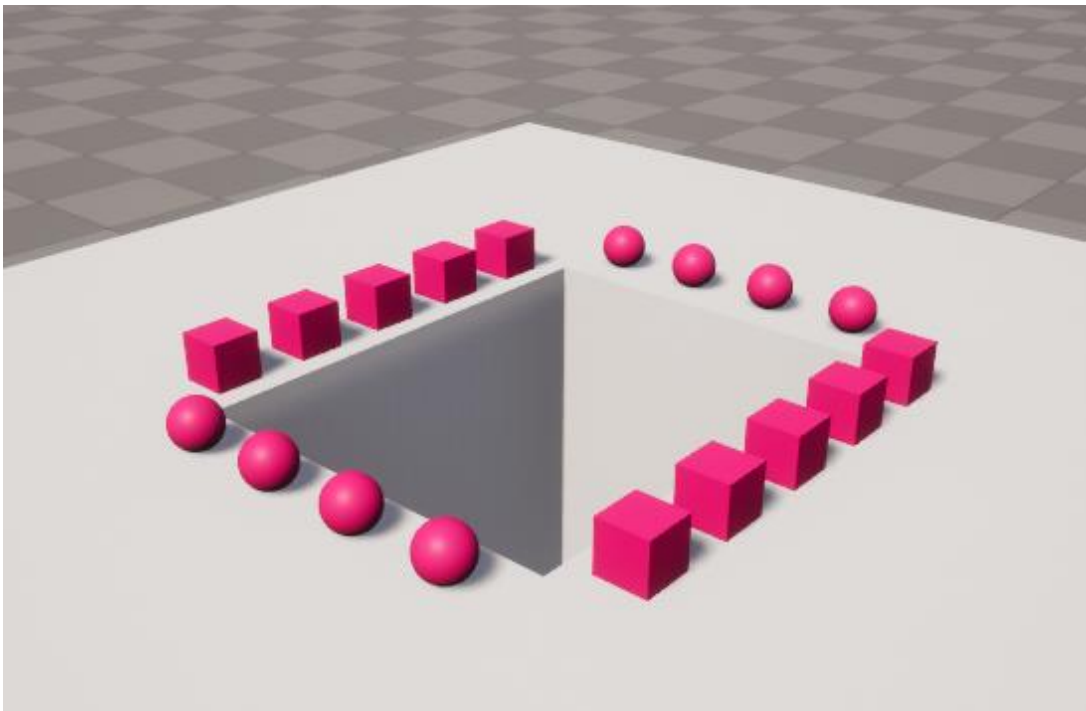


Ilustración 4.2: Captura de pantalla de la plantilla de SenseGlove.

4.1.3 Proyecto base de Physical Interaction System para Unreal Engine

El proyecto base *Physical Interaction System* [74] disponible en la *Unreal Engine Marketplace* es una herramienta esencial en el desarrollo de aplicaciones con interacciones físicas avanzadas. Esta plantilla, actualmente de pago, permite a los desarrolladores integrar interacciones físicas con teclado y ratón, y facilita acciones como coger y tirar objetos, abrir puertas y mover palancas mediante la entrada de ratón y teclado.

Una de las principales características de *Physical Interaction System* es su capacidad para ofrecer una amplia gama de interacciones físicas con componentes

estándar de *Unreal Engine* para la simulación de físicas. Estas interacciones incluyen la manipulación directa de objetos, y permiten a los usuarios agarrar, soltar y lanzar objetos en el entorno virtual, así como interactuar con elementos mecánicos como puertas, palancas, armarios y baúles.

Physical Interaction System ha recibido numerosas buenas reseñas por su funcionalidad y facilidad de uso. Eventualmente disponible de forma gratuita, ha demostrado ser una herramienta valiosa para la comunidad de desarrolladores. Su implementación mediante *blueprints*¹⁹ de *Unreal Engine* es una de sus ventajas más significativas, ya que permite una modificación sencilla y flexible de su funcionamiento. Estos facilitan a los desarrolladores la personalización de las interacciones y la extensión de las funcionalidades según las necesidades específicas de sus proyectos.

En resumen, esta plantilla representa una tecnología avanzada y versátil para el desarrollo de aplicaciones con interacciones físicas en *Unreal Engine*. Su integración con teclado y ratón, junto con su implementación basada en *blueprints*, lo convierten en una herramienta accesible y altamente modificable para desarrolladores. La combinación de componentes de física estándar y lógica de interacción avanzada permite crear experiencias interactivas ricas y detalladas, y destaca por su relevancia y utilidad en el desarrollo de aplicaciones interactivas en diversos campos.

¹⁹ Sistema visual de scripting que permite a los desarrolladores crear lógica de juego sin necesidad de escribir código, utilizando nodos que representan eventos, funciones y variables.



Ilustración 4.3: Captura de pantalla de la plantilla de Physical Interaction System.

4.2 Integración de Interacciones.

La integración de interacciones se basa en un sistema de eventos y comunicación entre el usuario y los objetos en el entorno virtual. Este proceso se compone de dos partes fundamentales: la interacción desde la perspectiva del usuario y la respuesta de los objetos en el mundo virtual.

4.2.1 Interacciones del usuario

El usuario actúa como el punto de origen para las interacciones en el entorno virtual. Cuando realiza una acción, *Unreal Engine* recibe los eventos de entrada asociados con dicha acción y a su vez, invoca funciones relativas a su interacción para que este aplique la lógica correspondiente.

4.2.1.1 Interacción con mandos

Cuando se detecta un evento de agarre por parte del usuario, al pulsar el botón de agarre convencional de los mandos, se verifica si hay objetos interactivos dentro del rango de agarre especificado. En caso afirmativo, se llama a un método del sistema de interfaces del objeto y se indica que ha sido agarrado. Este proceso implica la

comunicación entre el usuario y el objeto, donde este actúa como iniciador de la interacción y el objeto como receptor. Con esto se puede tocar, agarrar y soltar objetos interactivos, y que estos objetos reaccionen a estos eventos según sus propias características.

4.2.1.2 Interacción con guantes

Cuando se detecta un evento de agarre por parte del usuario, por ejemplo, al tocar con los dedos pulgar, índice y medio simultáneamente la superficie de un objeto interactivo, la API de *SenseGlove* lanza un evento de agarre.

Modificar la funcionalidad del proyecto base de *SenseGlove* es una de las dificultades que este mismo presenta, como se explica en el apartado 4.1.2 Sin embargo, la propia API ofrece la posibilidad de implementar lógica a partir de métodos que se llaman al agarrar y soltar objetos.

Cuando se recoge uno de estos eventos por parte de la API, se instancia un objeto interactivo dinámico y se oculta el objeto que interactúa con *SenseGlove* (cinemático). Visualmente no hay cambios, y por consecuencia, se consigue cambiar la forma en la que el objeto interactúa con el usuario y con el entorno. Cuando se suelta el objeto, se borra el que se había instanciado y se vuelve a hacer visible el original que interactúa con *SenseGlove*, y se reestablece el ciclo de interacción.

4.2.1.3 Poses de las manos y sistema de teletransporte

La API de *SenseGlove* no aporta ninguna función para moverse por el entorno de forma predeterminada. Por esta razón ha sido necesario aportar una nueva forma de movimiento por teletransporte. Esto permite al usuario poder desplazarse sin necesidad de moverse en el espacio real.

Para conseguir esto se han combinado el propio sistema de teletransporte del usuario que incluye *Unreal Engine*, con las flexiones de los dedos que permite detectar *SenseGlove*. Se ha hecho uso del método *GetNormalizedFlexion* en la clase *BP_SG_Player*, para analizar la cantidad de flexión que hay en cada dedo. Con la combinación de dichas flexiones se guardan dos tipos de poses para las manos: pose

de pistola (Pulgar, índice y corazón estirados, anular flexionado, *Ilustración 4.4*), pose de puño (todos los dedos flexionados).



Ilustración 4.4: Representación de la pose pistola escogida para el teletransporte con guantes.

El teletransporte funciona de la siguiente manera: el usuario debe poner su mano en una pose pistola. Una vez se ha detectado la pose, saldrá un rayo rojo de su cabeza, que girará con respecto a esta. Con esta pose fija se apunta a una zona concreta del suelo y, al cambiar la pose de la mano, el usuario se teletransporta de forma inmediata.

La elección de la pose de pistola para el teletransporte se debe a que se buscaba una pose que resultara suficientemente cómoda de realizar, para no cansar al usuario de prueba ni causarle dolores físicos. A la vez se buscaba una pose suficientemente concreta para que no se activara sin querer, tanto al interactuar con objetos como al tener la mano relajada. Tras varias reflexiones y pruebas con otras poses por parte del equipo de desarrollo se llegó a la conclusión de que la pose de pistola era la óptima.

4.2.2 Objetos Interactivos

Los objetos en el entorno virtual están diseñados para ser interactivos, lo que significa que pueden responder a las acciones realizadas por el usuario. Cada objeto posee lógica encapsulada que define su comportamiento en respuesta a diferentes eventos, como ser agarrado por el usuario.

Cuando un objeto recibe el mensaje de que ha sido agarrado por el usuario, activa su lógica interna para responder adecuadamente. Esta lógica puede variar según del tipo de agarre y del contexto de la interacción. Por ejemplo, un objeto puede ajustar su posición y orientación para alinearse con la mano del usuario, o por el contrario puede darle al usuario la libertad de agarrarlo desde cualquier ángulo. También puede variar

su manera de desplazarse, como es el caso que se ha desarrollado, un movimiento que interactúe con el resto de las físicas del entorno, para tener así una interacción más orgánica.

Para integrar la interacción con objetos dinámicos, se han desarrollado las siguientes extensiones sobre los blueprints de *Unreal Engine*:

Se ha modificado el blueprint de los objetos interactivos que vienen por defecto en la plantilla de *Unreal Engine* para hacer aplicaciones de realidad extendida, como se menciona en el apartado 4.1.1, para añadir una nueva forma de interacción basada en físicas.

Cuando se interactúa con un objeto calificado con agarre de tipo dinámico, se llama a su función de agarre (*PickUp*), como se detalla previamente en el apartado 3.1.2 de este documento. Esta función gestiona la interacción física del objeto, y se diferencia de los comportamientos predefinidos que vienen con el motor de *Unreal Engine*. De esta manera, se han adaptado los objetos interactivos para que utilicen la lógica extendida que se ha implementado, que funcionen con físicas dinámicas en lugar de cinemáticas, y que interaccionen así con el resto de las colisiones del entorno.

En el caso de la interacción con *SenseGlove Nova*, mencionado en el apartado 4.1.2, el procedimiento incluye la instancia de un objeto que cumple con las características de interacción física definidas previamente. Simultáneamente, se oculta el objeto que realmente está agarrado para proporcionar una experiencia de usuario más coherente e inmersiva.

Así, se logra combinar las funcionalidades del proyecto base original de *Unreal Engine* con el sistema de físicas extendido y con el proyecto de *SenseGlove*, y se proporciona una interacción más natural y fluida dentro del entorno de realidad virtual.

4.3 Implementación del registro de datos y diseño de escenarios

En la Sección 1.3, se describen varios objetivos relacionados con el método de evaluación, por ende, este apartado aborda la creación e integración de la manera utilizada para registrar los datos en tiempo real de las pruebas y como otro objetivo, el

diseño y configuración de los escenarios necesarios para la realización de los experimentos.

4.3.1 Implementación del registro de datos

Se establece como uno de los objetivos principales la implementación de un registro para recopilar como datos observables las diferentes interacciones y movimientos para cada dispositivo de entrada por usuario por prueba realizada. Para mostrar mejor esta estructura se divide en varias partes.

- Creación del registro de datos.

Dada la instancia establecida, cada vez que se ejecuta la aplicación existe un *blueprint* de tipo *GameInstance* que, al iniciar el escenario de pruebas, inicia una nueva *blueprint* local, que se llama *BP_DataBase_Local* y se asigna como un componente a uno de los tipos de instancias descritos en la Sección 3.1.3. Posteriormente en el escenario, una *blueprint BP_DataBaseManager*, recibe y gestiona el registro de eventos mediante el acceso a la instancia. Esta, junto con sus componentes y funcionalidades se mantienen durante toda la ejecución.

- Llamadas a eventos.

Como se explica en la Sección 3.1.1, los *blueprints BP_Player* o *BP_SG_Player* hacen uso de la instancia correspondiente para obtener las llamadas a eventos de *BP_DataBaseManager* de movimiento, inicio y fin de interacciones con objetos. Según el evento, transmite qué mano ha realizado la interacción con el objeto y las coordenadas iniciales y finales del movimiento. Por otro lado, cada objeto tiene la clase base *BP_Interact_Item_Parent*, que llama al evento que informa de su tipo, su estado y que tipo de usuario ha interactuado con él. Todas estas llamadas también registran el instante de tiempo en el que ha sucedido el evento y la id del usuario.

- Gestión de eventos.

El *BP_DataBaseManager*, recibe el evento como una serie de valores que, en función del tipo de interacción, crea la estructura correspondiente previamente definida en formato de tabla de datos, y la envía a *BP_DataBase_Local* con

unas funciones de consultas. Estas son solicitudes de información enviadas a bases de datos para obtener datos específicos. Se escriben en un lenguaje de valores en formato texto, CSV en este caso, y se procesan para obtener resultados según criterios definidos, y facilitan la extracción eficiente de datos precisos de grandes conjuntos de información almacenados.

4.4 Diseño de escenarios

Para realizar las pruebas de usuario ha sido necesario diseñar dos escenarios de pruebas, idénticos para mandos y guantes, de tal forma que ofrecieran resultados sencillos de contrastar. Cada escenario se divide en dos escenas y aísla los datos por el tipo de prueba, de tal forma que se facilita su tratamiento y permite obtener una perspectiva general del estudio a través de diversas visiones específicas.

La primera escena consta de tres pruebas, orientadas a probar la interacción de agarrar y soltar objetos repartidos por el entorno. Con este objetivo, se han dispuesto tres tipos diferentes de interacciones físicas y formas de agarrar los objetos.



Ilustración 4.5: Captura del primer escenario de pruebas.

En este segmento, como primera prueba, se han dispuesto objetos dinámicos de agarre fijo, los cuales se cogen desde una posición preestablecida, y una vez sostenidos se quedan en esa posición relativa a la mano hasta que son soltados, en esta parte de la prueba se ha solicitado a los sujetos que separaran los dos tipos que había en dos montones diferentes. Para la segunda prueba, se han añadido unos cubos sobre una mesa, con un agarre dinámico libre, los cuales, cuando se interactúa con ellos, se agarran desde el punto geométrico donde el usuario establece la interacción mientras manifiestan físicas en tiempo real con la mano; con los que el usuario debería hacer una pirámide. Por último, en la tercera prueba, se han dispuesto una serie de conos de tipo dinámico con agarre libre, más grandes que los cubos, con el objetivo de que se cogieran todos los conos de la habitación y se pusieran en un mismo sitio. Se observa aquí cómo funciona el movimiento unido a la interacción física.

En el segundo escenario, las interacciones se han basado en abrir puertas y rotar palancas, para así observar qué movimientos y controles resultan más intuitivos a la hora de interactuar con estos objetos físicos. Este segmento se ha compuesto de varios pasillos, con objetivos constantes, para que el sujeto de pruebas interaccionara con los objetos presentes. Al comenzar cada pasillo se le presentan una serie de puertas, de las cuales solo una se podía abrir para pasar a la siguiente parte. De esta forma el usuario se ve obligado a probar las diferentes puertas y adivinar cómo abrirlas. Una vez encuentran la puerta correcta, pasan a otro pasillo, en el que hay una serie de palancas, que cambian a medida que avanza, de tal forma que se pide al usuario que sigan ciertos patrones (girar todas hacia el mismo lado, cada una para un lado y la mitad para un lado y la otra mitad para el otro). Una vez se interactúa con las palancas, se pasa por una puerta a la siguiente sala, compuesta otra vez por varias puertas de las cuales solo una estaba abierta.



Ilustración 4.6: Captura del segundo escenario de pruebas.

Capítulo 5 - Evaluación

Esta es una de las partes más fundamentales del estudio, que permite estudiar si las hipótesis planteadas son ciertas; y cómo funciona en una muestra variada de la población el uso de mandos y guantes hápticos.

Para llevar a cabo las pruebas, se ha reunido a un grupo relativamente heterogéneo en diferentes aspectos, que han realizado las mismas pruebas con guantes hápticos y mandos, y han formado una opinión sobre su preferencia de uso en cada escenario. Una vez obtenidos los datos de la observación, y los cuestionarios de los sujetos de pruebas, se han sacado conclusiones sobre en qué casos es favorable el uso de guantes hápticos y para cuales son mejores los mandos.

En este capítulo se describen las evaluaciones con usuarios, y se detalla el proceso de cómo se ha llevado a cabo y sus resultados. En primer lugar, se presentan las gráficas y los datos en una sección, y en la siguiente se analiza qué significan esos gráficos y datos para la investigación.

5.1 Método de evaluación

Para evaluar las hipótesis planteadas, se han realizado una serie de pruebas con diversos usuarios de diferentes edades y entornos sociales distintos. Se ha asegurado una búsqueda de personas con distintos niveles de educación y experiencia previa, tanto en entornos digitales como con la realidad virtual; para que los resultados puedan ser generalizados.

El objetivo de estas pruebas es observar qué aspectos favorecen a la adaptación del usuario en un entorno virtual, y se enfocan en las diferencias entre las interacciones con mandos, y aquellas realizadas con guantes.

Durante estas pruebas se ha seguido el plan de pruebas redactado en el Apéndice A.

Se ha querido comprobar el nivel de inmersión que genera cada controlador al usuario promedio, con qué naturalidad se desenvuelve y como afectan los diferentes controles y respuestas hápticas al desarrollo natural de la prueba.

Cabe destacar que, el bajo nivel de avance de la tecnología disponible en esta investigación ha perturbado el desarrollo natural de las pruebas, y ha sesgado los resultados. A pesar de esto, se han podido observar ciertas acciones y comportamientos que se analizarán en el siguiente capítulo. El objetivo es entender si el uso de los guantes hápticos supone o no una mejora en los entornos de realidad virtual.

La primera prueba se ha realizado con mandos, sin informar de sus controles, para observar como de intuitivos resultan en una primera toma de contacto. Luego se ha procedido a realizar una segunda prueba con los guantes, para observar si la interacción en el entorno resulta más intuitiva sin dar información sobre los controles, al igual que con los mandos.

Ambas pruebas se han realizado en los escenarios descritos en el *apartado 4.4*

En el desarrollo de las pruebas se proporcionan al sujeto diversos objetivos que completar, para que experimente de forma activa con las interacciones que ofrece el entorno. De esta manera tiene sentido interactuar con los objetos, que se pueden coger y soltar, abrir y cerrar puertas e interactuar con las palancas. Con esto se ha dado al usuario un fin que, al ser igual en mandos y guantes hápticos, y además ser el mismo para todos los usuarios, ha permitido recoger datos que tienen sentido, y que pueden compararse para sacar conclusiones sobre las diferentes interacciones. Además, se permitía al sujeto de pruebas tener una comparativa real de como son las interacciones en realidad virtual con mandos y con guantes, así, se permite formar una opinión crítica sobre ambos dispositivos de interacción.

Para poder analizar todo lo que se ha observado en las pruebas, se ha recurrido a dos métodos. Por una parte, se ha observado en todo momento lo que hacían los sujetos, y se han anotado las cosas más relevantes de sus pruebas, para realizar un análisis cualitativo. Además, se ha grabado la aplicación durante todas las pruebas al completo, y se ha monitorizado y guardado en un archivo CSV [75] cada interacción del juego, para el posterior análisis cuantitativo de las interacciones. En las primeras

pruebas se grabó también a los propios usuarios, pero se tomó la decisión que no hacerlo ya que, al ser un entorno en realidad virtual, los usuarios se tienden a moverse por el entorno físico, y se salen del plano de la cámara. Además, el vídeo no aportaba nada a la propia grabación de la pantalla del experimento, ni a la corroboración de las hipótesis planteadas.

Aparte de la observación, se ha redactado un cuestionario que debía cumplimentar cada usuario después de realizar las pruebas, para conocer un poco más a fondo la opinión tanto objetiva como subjetiva de los sujetos de prueba.

Preguntas realizadas en el cuestionario:

- Preguntas sociodemográficas, estas se han incluido en el cuestionario para poder estudiar si alguno de estos factores afecta a la naturalidad de las interacciones. También se busca determinar si, por el contrario, estos factores son irrelevantes. Se han incluido preguntas sobre:
 - Edad
 - Género
 - Educación
- Preguntas de experiencia previa. Se ha considerado que estos factores son relevantes a la hora de saber desenvolverse con naturalidad en un entorno de realidad virtual. Se han incluido las siguientes preguntas, que se considera que engloban todo lo relacionado con la experiencia anterior a las pruebas:
 - ¿Qué experiencia tienes con los videojuegos?
 - ¿Qué plataformas usas para jugar a videojuegos?
 - Cuando has jugado a videojuegos ¿Qué tipo de controladores has usado?
 - ¿Con qué frecuencia utilizas controladores PS4/PS5/Xbox?
 - ¿Con qué frecuencia usas la realidad virtual?
- Preguntas generales de la prueba de interacción. Estas preguntas se han hecho dos veces, para la prueba de mandos y para la de guantes, para poder analizar cómo ha sido la experiencia con los distintos controladores.
 - ¿Qué facilidad tuviste para aprender a coger y soltar objetos?
 - ¿Cómo consideras la dificultad a la hora de desplazarte por el entorno?
 - ¿Cómo te ha resultado la interacción de coger/soltar objetos?

- Sensaciones físicas. Al igual que en el apartado anterior, estas preguntas se han puesto por duplicado, para entender mejor cuáles han sido las sensaciones que han tenido durante el desarrollo de la prueba.
 - ¿Has sentido mucha sensación de mareo?
 - ¿Cómo de natural/intuitiva te ha parecido la interacción con los objetos?
 - ¿Qué opinas de la sensación de agarrar objetos? ¿La has sentido realista?
 - Comenta brevemente cuales han sido las peores y mejores partes de la interacción con (mandos/guantes)
- Comparación de interacciones. En esta sección se busca que el sujeto de pruebas decida de forma subjetiva, y basada en las interacciones que acaba de tener en la prueba, qué control prefiere para cada una. Y cuál de ellos le ha proporcionado una mejor experiencia de interacción en la realidad virtual.
 - ¿Qué ha sido mejor para agarrar los conos?
 - ¿Qué ha sido mejor para ordenar los cubos?
 - ¿Qué ha sido mejor para agarrar los dosímetros?
 - ¿Qué ha sido mejor para desplazarse?
 - ¿Qué ha sido mejor para abrir puertas?
 - ¿Qué ha sido mejor para mover las palancas?

5.2 Proceso de evaluación

Antes de realizar las pruebas definitivas que se han utilizado para este estudio, se realizó una batería previa de pruebas, con estudiantes de entre 15 y 16 años. Si bien estas pruebas no se han utilizado para el estudio, si fueron útiles como piloto, para tantear el terreno de cara a la realización posterior de las pruebas de usuario finales. En estas pruebas los sujetos eligieron entre hacer el escenario con guantes hápticos o con los mandos. El programa consistía en un tutorial sencillo de agarrar, soltar objetos y desplazarse, sin mucha orientación más que las instrucciones que se daban por parte de los evaluadores. De estas pruebas no se sacaron datos de las interacciones, ya que fue solo un prototipo para ver posibles fallos, y que las pruebas reales fueran lo más útiles posible y transcurrieran con el mínimo de complicaciones. Estas pruebas también

ayudaron a determinar si el desarrollo realizado hasta el momento era suficiente. La conclusión a la que se llegó fue que había mucho avance, pero faltaba arreglar ciertas cosas; por lo que después de finalizarlas, se continuó con el desarrollo de la aplicación durante dos semanas más antes de comenzar las pruebas reales.

Durante el desarrollo de las pruebas iniciales, se pudo observar que la falta de un objetivo concreto desorientaba a los usuarios, que preguntaban qué podían hacer o cómo continuar la prueba. Muchos de ellos querían acabar antes del tiempo fijado, además de quedarse quietos esperando más instrucciones de los investigadores. Además, tras analizar estas pruebas, se llegó a la conclusión de que, al no ser iguales para todos los usuarios, no eran comparables cuantitativamente. Por esta razón, se decidió que era necesario dar un objetivo fijo igual para todos los sujetos de pruebas. De esta forma, los usuarios tendrían una misión que cumplir, haciendo la prueba más amena y con resultados que si eran comparables para los análisis. Por esta razón se decidió cambiar los escenarios, de tal forma que le dieran un sentido global a la prueba y a los posteriores análisis.

También se llegó a la conclusión de que todos los usuarios debían realizar las pruebas con ambos dispositivos de interacción; para poder así comparar en cada sujeto el nivel con el que se desenvuelve en ambos escenarios, tanto con mandos como con guantes hápticos.

Las pruebas finales debían ser realizarlas en la facultad, por la necesidad de estar presentes y utilizar el único hardware que había disponible. Por esta razón no ha sido fácil encontrar personas dispuestas a realizarla, por lo que la muestra está compuesta principalmente por estudiantes y profesores de la facultad; además de conocidos y familiares. Si bien, esto no es una muestra representativa de la sociedad, sí ha sido productiva para entender las dificultades que tiene el desarrollo de aplicaciones, dada la poca penetración que tiene la utilización de la realidad virtual actualmente.

Durante un período de dos semanas, se llevaron a cabo experimentos con una muestra compuesta por 45 participantes.

Esta muestra ha estado formada por 30 hombres, 12 mujeres y 3 personas no binarias, como se muestra en la Figura 5.1.

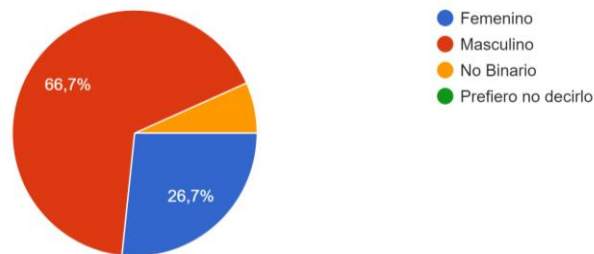


Figura 5.1: Gráfico de la distribución de género de los participantes de las pruebas de usuario.

Los sujetos tenían edades entre 19 y 52 años, con una media de edad de 25 años y desviación típica de 8 años (Figura 5.2).

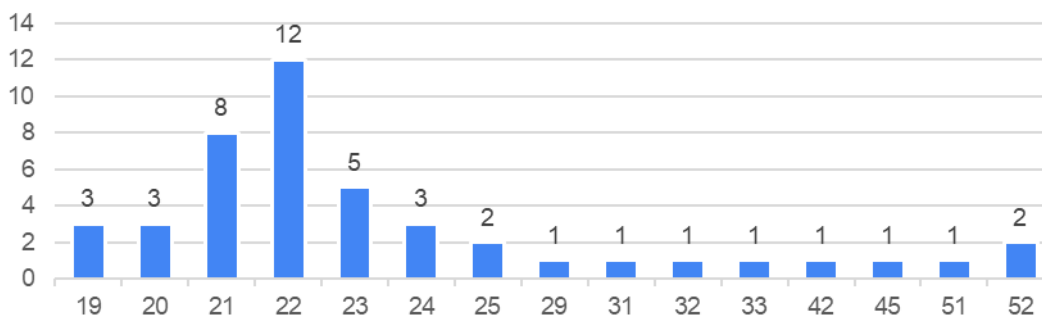


Figura 5.2: Distribución de las edades de los usuarios de pruebas.

El grupo de participantes presenta una variedad de niveles educativos, con 30 personas de nivel universitario, 2 de formación profesional, 4 con bachillerato, 2 con máster universitario y 7 doctores. Esta muestra también contiene personas con diferente experiencia previa con realidad virtual, como se puede observar en la Figura 5.3, 10 personas nunca la habían utilizado, 27 la habían utilizado en alguna ocasión, 4 la utilizan alrededor de una vez al mes, 2 una vez por semana y 2 personas que la usan diariamente.

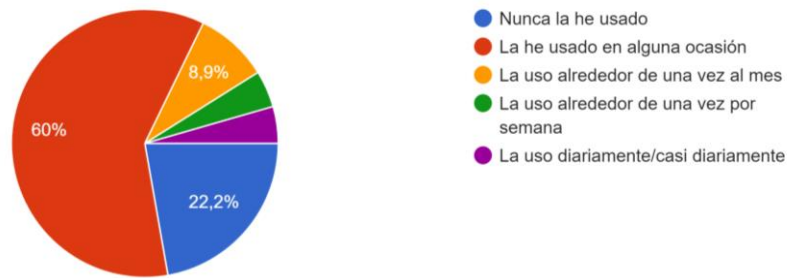


Figura 5.3: Experiencia previa de los sujetos de pruebas con realidad virtual.

Para llevar a cabo el desarrollo de los experimentos, se ha utilizado un espacio que hay al fondo de la tercera planta de la biblioteca. Este espacio ha sido el ideal, ya que ha garantizado una zona de pruebas lo suficientemente grande y debidamente delimitada. Con el objetivo de que los usuarios pudieran moverse físicamente lo justo y tener una experiencia adecuada. Además, este espacio ha permitido una cómoda observación con cercanía, y ha permitido ayudar a los probadores cuando, tanto las gafas de RV, los guantes o el editor de *Unreal Engine* han dado problemas, como cuando los usuarios se han mostrado confusos o perdidos.

En la mayoría de los experimentos han estado presentes al menos dos de los miembros del equipo, para asegurar que no se perdía ningún detalle de la prueba. El objetivo ha sido controlar que la preparación del usuario para cada parte fuera suficientemente ágil, además de no cansar a los voluntarios. También era importante poder hacer el máximo posible de pruebas en el espacio de tiempo que se ha designado para el estudio.

Antes de cada prueba se ha informado a cada usuario del objetivo de esta investigación, y que, por tanto, no se podía proporcionar información sobre cómo utilizar los guantes o los mandos. También se les ha informado de que era posible que algo de la prueba diera errores o saliera mal, y se les ha asegurado que no era responsabilidad suya, para evitar que se sintieran frustrados. Se ha realizado un gran esfuerzo por crear un ambiente relajado y natural, en el que no se sintieran demasiado observados para que se comportaran de la manera más intuitiva y natural que pudiesen.

Cada usuario ha realizado las mismas pruebas dos veces, primero con mandos, como se puede observar en la Ilustración 5.1; donde simplemente se les ha informado sobre qué debían hacer en cada escenario, sin explicar nada más.



Ilustración 5.1: Usuario en la prueba con mandos.

Una vez que cada usuario ha acabado la prueba con mandos se ha pasado a la prueba con guantes como se muestra en la

Ilustración 5.2. Se pusieron los guantes a cada probador, de tal forma que les resultaran cómodos, pero sin poner en riesgo la integridad de estos, para lo que se amarraron con la suficiente fuerza a las manos. Se ha pedido a cada voluntario antes de empezar la prueba y durante el desarrollo de la misma, que no realizara movimientos bruscos con las manos ya que los guantes son muy delicados y se podían partir piezas del soporte.



Ilustración 5.2: Usuario de pruebas en el escenario de los guantes hápticos.

Una vez los guantes estaban puestos, se han calibrado con la aplicación *SenseCom* [20], para asegurarse de que la mano virtual captara las posiciones y movimientos de la mano real de la forma más precisa posible.

5.2.1 Problemas con las pruebas

Durante el desarrollo de las pruebas han surgido diversos problemas tanto con el hardware como con el software.

El desafío principal ha estado relacionado con el desempeño de los guantes, que ha generado ciertas dificultades debidas a su bajo nivel de desarrollo. Durante el desarrollo de estas pruebas la API de *SenseGlove* provocaba fallos de ejecución de forma puntual. Esto hacía que la ejecución y el editor de *Unreal Engine* se cerraran, de tal forma que era necesario reestablecer el resto de las aplicaciones para poder seguir con la prueba. En alguna ocasión este error ha provocado que los guantes mantuvieran la respuesta háptica, tanto la vibración como la tensión en los dedos, y ha causado malestar físico en algunos de los probadores. En una ocasión incluso ha sido necesario apagar los guantes para evitar causar daños mayores en uno de los voluntarios.

También se han experimentado ciertos problemas a la hora de usar los guantes con gente con las manos pequeñas. Este caso se ha dado especialmente en mujeres,

ya que tienden a tener los dedos más finos y de menor tamaño. Esto hacía que los guantes no detectaran la correcta posición y flexión de los dedos, y empeoraba la experiencia e inmersión de los usuarios. En ocasiones puntuales ha habido que ayudar a las personas para que el software recibiera bien las posiciones de los dedos.

Al cambiar entre sujetos, si los tamaños de las manos de las personas variaban mucho, resultaba más difícil calibrar, por problemas de la aplicación mencionada anteriormente. Incluso ha sido necesario reiniciar la aplicación varias veces en alguna ocasión para que se captara bien la calibración y que no diera problemas.

Lo mismo ha sucedido con el funcionamiento de las gafas de realidad virtual, y la gente con gafas y grandes diferencias de altura.

Pese a estos contratiempos, se han podido finalizar con éxito la totalidad de las pruebas, y se han recogido una serie de resultados, tanto cuantitativos, sacados de los registros de interacciones dentro de la aplicación; como cualitativos, sacados tanto del cuestionario como de las observaciones durante las pruebas. Estos resultados se expondrán y analizarán en los siguientes apartados.

5.3 Resultados

En este apartado se presentan los datos cuantitativos que han proporcionado las pruebas. Primero se mostrarán los datos obtenidos de la telemetría de la aplicación y seguimiento de las acciones realizadas por cada usuario. A continuación, se mostrarán los resultados de las opiniones reflejadas en el cuestionario que ha contestado cada voluntario al finalizar las pruebas. Todos estos datos están acompañados de gráficas y métricas que analizan el significado los resultados.

5.3.1 Datos obtenidos de la aplicación

En esta sección, se presentan una serie de gráficas, obtenidas de los datos de la aplicación, que comparan las interacciones con ambos dispositivos. Se proporcionan las gráficas que se han considerado como las más importantes a la hora de sacar conclusiones.

La Figura 5.4 compara la cantidad de interacciones virtuales que se han realizado en total con los mandos, que suman un total de 5529; y las interacciones con los guantes que suman un total de 10552. Esto conforma una diferencia de 5023 unidades, lo que representa más del doble de interacciones para guantes que para mandos. Esto se debe a que las interacciones con mandos son más precisas que con guantes, lo que lleva a cada usuario a tener que realizar más interacciones con guantes para hacer las mismas actividades que con mandos.

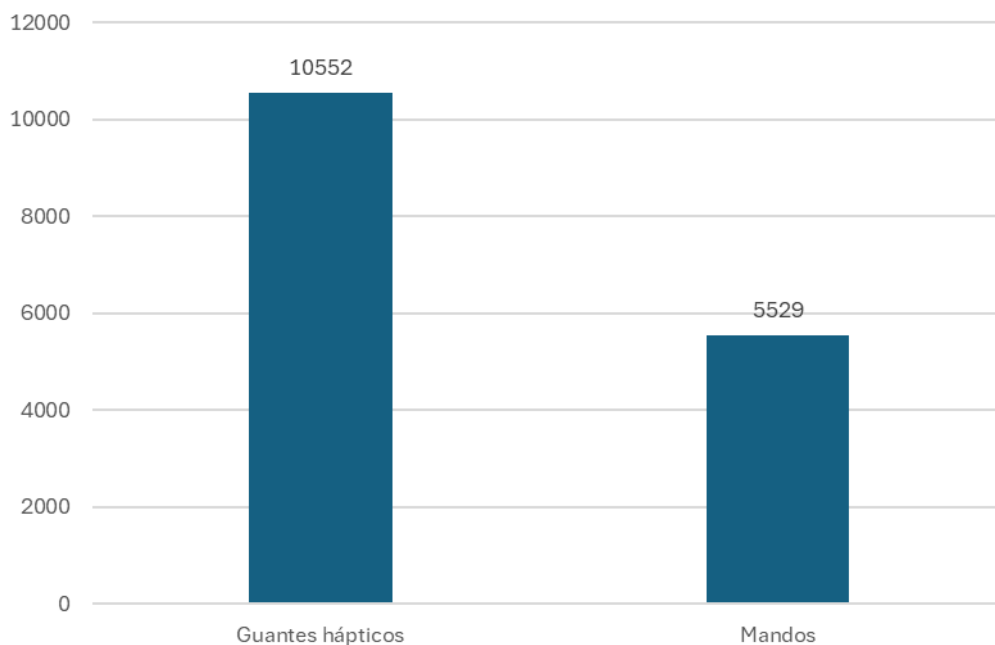


Figura 5.4: Cantidad de interacciones totales con guantes hápticos y con mando.

La Figura 5.5 muestra las diferencias de interacciones tipo agarrar y soltar para diferentes objetos. Primero se analizan las acciones de agarrar objetos.

En los cubos hay 1662 interacciones con guantes frente a 1565 con mandos, hay solamente 97 interacciones más con guantes que con mandos, lo que significa un 6% más de interacciones con los guantes.

Los dispositivos EPD han tenido 739 interacciones con guantes hápticos y 339 interacciones con mandos, con 400 interacciones de diferencia. Esto significa que se agarran más del doble de veces estos objetos con guantes que con mandos. Los

dispositivos SABG100²⁰, tienen 1028 interacciones con guantes hápticos frente a 322 con mandos; la diferencia de interacciones con guantes y mandos es de 706, lo que significa que estos objetos se han agarrado más del doble de veces con guantes. Para los conos, de tipo dinámico, se han registrado 1859 interacciones de agarrar con guantes frente a 630 interacciones con los mandos, la diferencia es 1229 interacciones, lo que significa casi el triple de interacciones con los guantes.

Con estos datos se puede observar la diferencia de la cantidad de interacciones de agarrar debido a la alta precisión de los mandos, con una media de 1322 con guantes y 714 con mandos. Las medianas de estas muestras son de 1345 con guantes y 485 con mandos. En el caso de los guantes puede decirse que es una distribución simétrica, ya que la mediana está cerca de la media. En cambio, la diferencia entre la mediana y la media para los mandos es muy alta, lo que quiere decir que es una muestra asimétrica. Esto significa que para la mayor parte de los objetos se han hecho menos interacciones de la media. Como se puede observar en Figura 5.5, con los cubos se han registrado muchas más interacciones de agarrar que para el resto de los objetos. Las desviaciones típicas de las muestras son de 526 para guantes y 584 para mandos; y los coeficientes de variación son respectivamente 39% y 82%. Esto corrobora lo que se ha mencionado anteriormente, que la muestra de agarrar con guantes tiene menos variabilidad, y con mandos es más diversa, por lo cual hay más variabilidad a la hora de agarrar objetos con mandos que con guantes. Estos datos indican que la cantidad de veces que se agarran los distintos objetos con guantes componen una muestra con dispersión moderada, es decir, que se agarran los distintos tipos objetos una cantidad similar de veces.

Dados estos datos se ha realizado una Prueba t para medias emparejadas, que compara interacciones de *agarrar* con mandos y guantes, cuya hipótesis nula es que no hay diferencia entre ambas medias. El valor $P(T \leq t)$ para una cola es de 0,004, por lo que se rechaza la hipótesis nula, es decir, las medias de cantidad de interacciones de

²⁰ Dispositivo diseñado para detectar emisiones radiológicas. Al igual que el objeto EDP, forma parte del proyecto ADARVE, y se utiliza solamente para ejemplificar interacciones con agarre anclado.

agarrar objetos son muy diferentes para guantes y mandos. Además, sale un estadístico t de 2,52, que corrobora que la diferencia entre las medias de las dos muestras es mayor en relación con la variabilidad dentro de las muestras. Ambos datos significan que, aunque haya cierta correlación, hay diferencia entre las medias; es decir, la cantidad de interacciones con cada objeto es considerablemente diferente para mandos y guantes.

En la Figura 5.5 también se muestran las comparaciones de los distintos tipos de objetos en la interacción de soltar, con mandos y guantes. Los cubos, de tipo dinámico con agarre libre, para los que se han registrado 1658 interacciones con guantes y 1454 con mandos, lo que supone una diferencia de 14% más de interacciones con guantes. Los dispositivos EPD han registrado 735 interacciones con guantes frente a 330 con mandos, con una diferencia de 405 interacciones, más del doble con guantes que con mandos. De forma similar sucede con los objetos SABG100, con 1022 interacciones con guantes y 316 con mandos, con una diferencia de 706 interacciones, lo que significa que ha habido más del triple de interacciones con guantes para este tipo de objetos. Los conos (agarre libre) presentan 1849 interacciones con guantes y 573 con mandos.

Para estas interacciones los resultados son muy similares que para las de agarrar, con una media de 1316 con guantes y 668 con mandos, las medianas son respectivamente 1340 y 452. Las desviaciones típicas son 524 para guantes y 537 para mandos, y los coeficientes de variación son 39% y 80%. Como estos resultados son similares a los de agarrar objetos, se pueden sacar las mismas conclusiones descritas anteriormente.

Las diferencias de cantidad de registros de agarrar y soltar objetos se deben a ligeros fallos del programa que da soporte a la prueba, y hacen que parezca que hay objetos que se agarran, pero no se sueltan. Aun así, la diferencia no es suficientemente notable para que suponga un problema a la hora de sacar conclusiones.

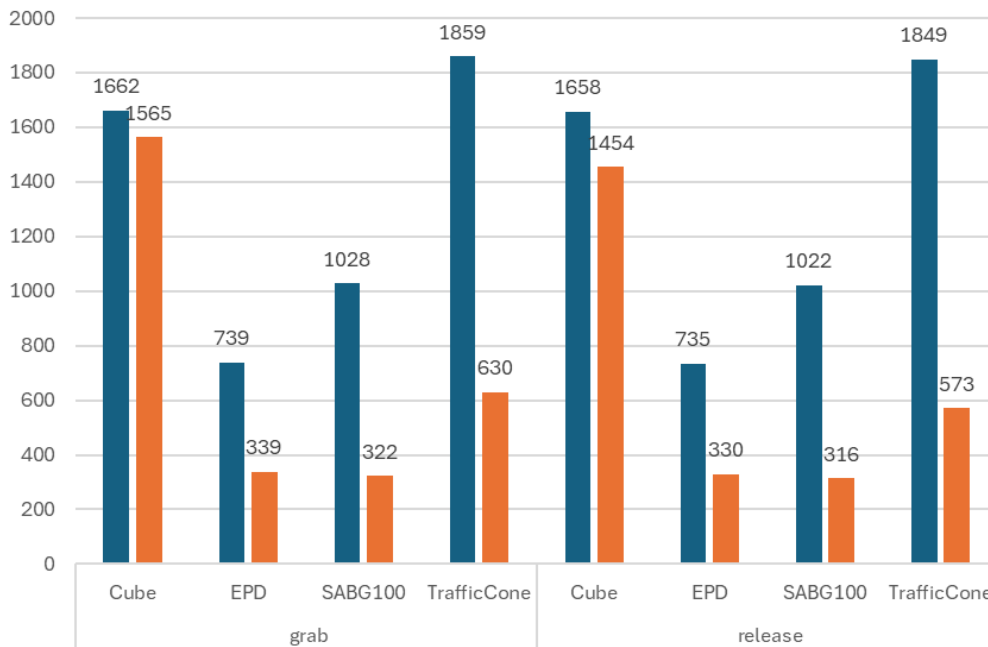


Figura 5.5: Cantidad total de veces que se ha agarrado y soltado cada tipo de objeto con guantes hápticos (Azul) y mandos (Naranja).

La Figura 5.6 ilustra la cantidad total de interacciones de cada sujeto de pruebas con los guantes hápticos. Se ha registrado una media de 238 por usuario, con una mediana de 233. Esto prueba que es una muestra simétrica, y se podría estudiar si sigue una distribución normal. Con esto se concluye la mitad de los usuarios han realizado menos interacciones que la media. La desviación típica es de 58,2 y el coeficiente de variación es de 54%, por tanto, hay una gran variabilidad en la cantidad de interacciones realizadas. Se puede observar que el mínimo de interacciones es de 33 y el máximo es de 502, que es 15 veces más que el que menos interacciones hizo.

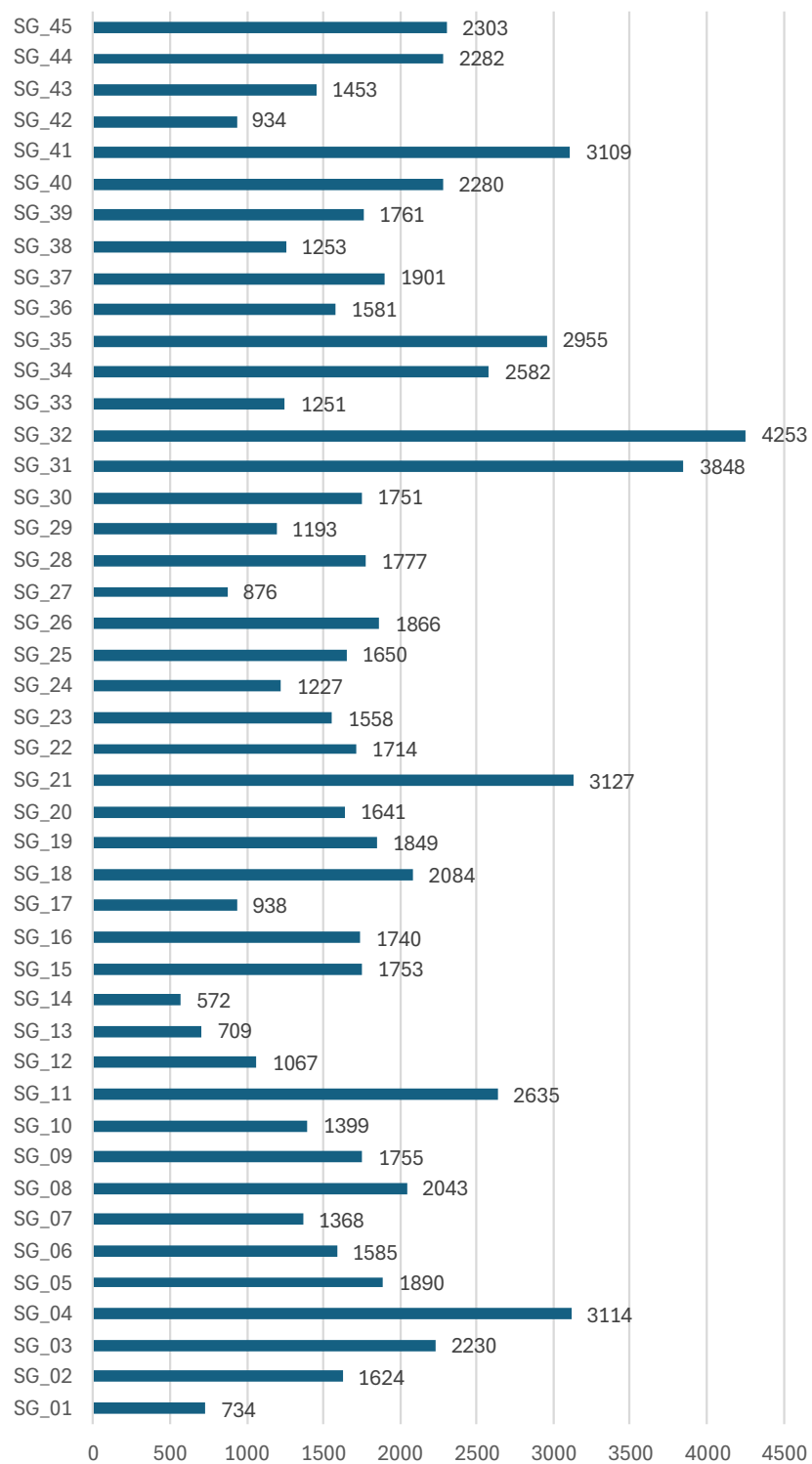


Figura 5.6: Número de interacciones de cada usuario con guantes hápticos.

La gráfica de la Figura 5.7 distingue interacciones con la mano derecha e izquierda con los guantes hápticos para cada usuario. Se ha registrado una media de 120 para la izquierda y 118 para la derecha, mientras la mediana es respectivamente 124 y 115. Como las medianas y las medias son tan similares, se puede considerar que las dos muestras son simétricas. Por tanto, en ambos casos la mitad de los usuarios hicieron más interacciones que la media. Las desviaciones típicas son de 69,8 para la mano izquierda y 68,9 para la derecha y los coeficientes de variación son respectivamente 48% y 46%. Esto demuestra hay una gran variabilidad en los datos, pero muy similar en ambas manos. Esto se puede observar también en la Figura 5.6, en la que se habla de la cantidad total de interacciones con guantes para cada usuario.

Se ha realizado un contraste de hipótesis, en el cual la hipótesis nula es que no hay diferencia en el número medio de interacciones con cada una de las manos. Sale un estadístico t de 0,27, que podría indicar que la diferencia entre medias es pequeña en relación con la variabilidad dentro de las muestras, además el valor p es de 0,78, lo que quiere decir que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, se puede asumir que hay igualdad de medias. Lo que significa que no hay diferencia en las medias de interacciones con la izquierda y con la derecha.

La máxima diferencia entre interacciones con guantes con ambas manos para un usuario es de 122 interacciones, y la diferencia media es de 40. Esto es una cantidad relativamente baja respecto a la media de interacciones, que es 233. Es decir, la diferencia general entre el máximo y mínimo de interacciones conforma solamente un 17% de las interacciones totales. Con esto se concluye lo expuesto anteriormente, que no hay apenas diferencia entre la cantidad de interacciones con cada mano que realiza cada usuario.

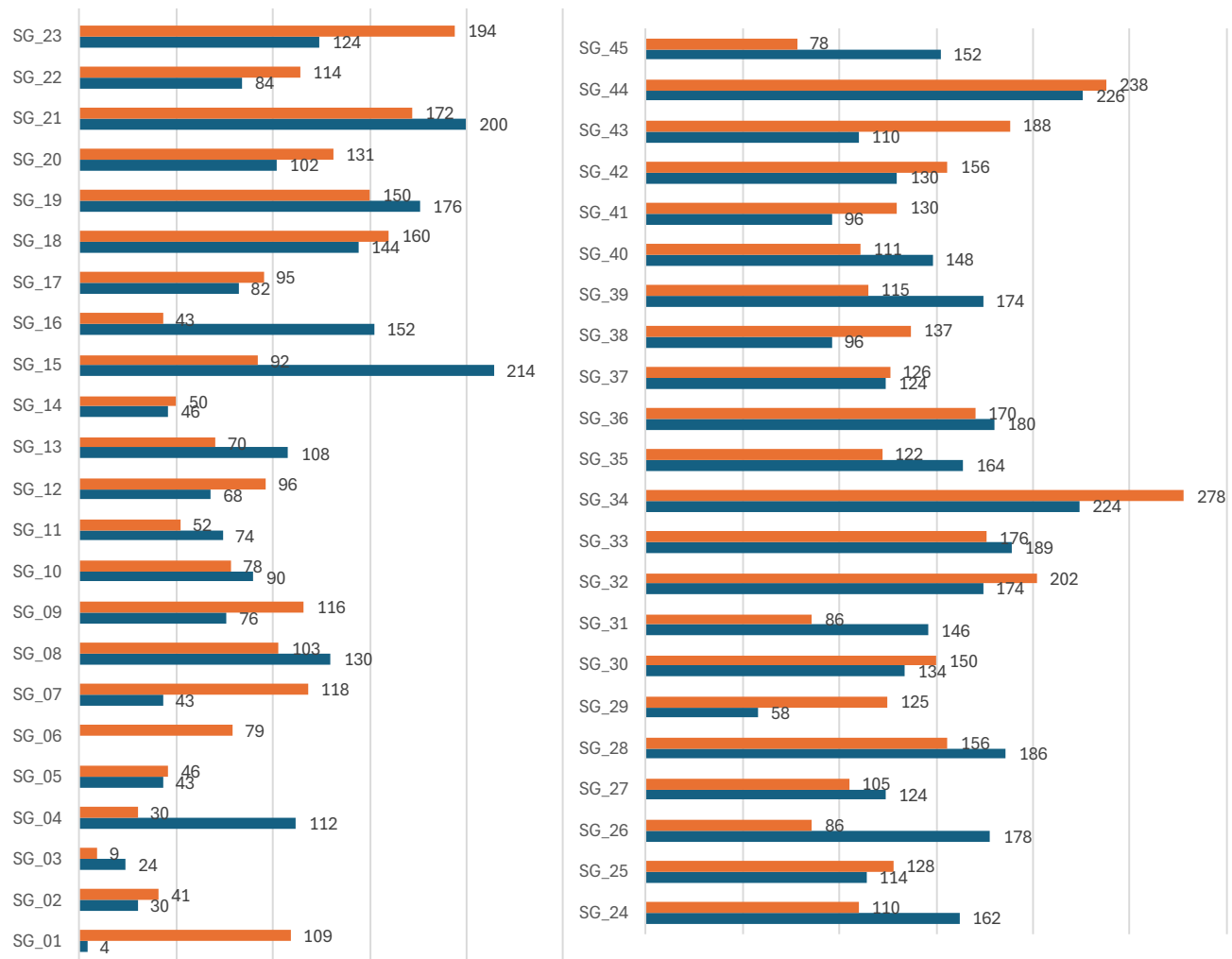


Figura 5.7: Cantidad de interacciones de cada usuario con guantes con la mano derecha (Naranja) e izquierda (Azul).

La Figura 5.8 muestra la cantidad total de interacciones de cada usuario con mandos. La media de interacciones es de 203 por usuario, con una mediana de 200, lo que puede indicar que la muestra es simétrica, es decir, la mitad de los usuarios han hecho más interacciones que la media, y podría estudiarse si sigue una distribución normal. La desviación típica es de aproximadamente 48 y el coeficiente de variación 24%, lo que indica que no hay una gran variación entre las interacciones totales con mandos entre unos y otros usuarios. Se puede observar que el mínimo de interacciones es de 119 para un usuario, frente al máximo que es 347. Este máximo es el doble que el mínimo lo que significa que la diferencia entre el usuario con más interacciones y con menos es mucho menor con mandos que con guantes hápticos.

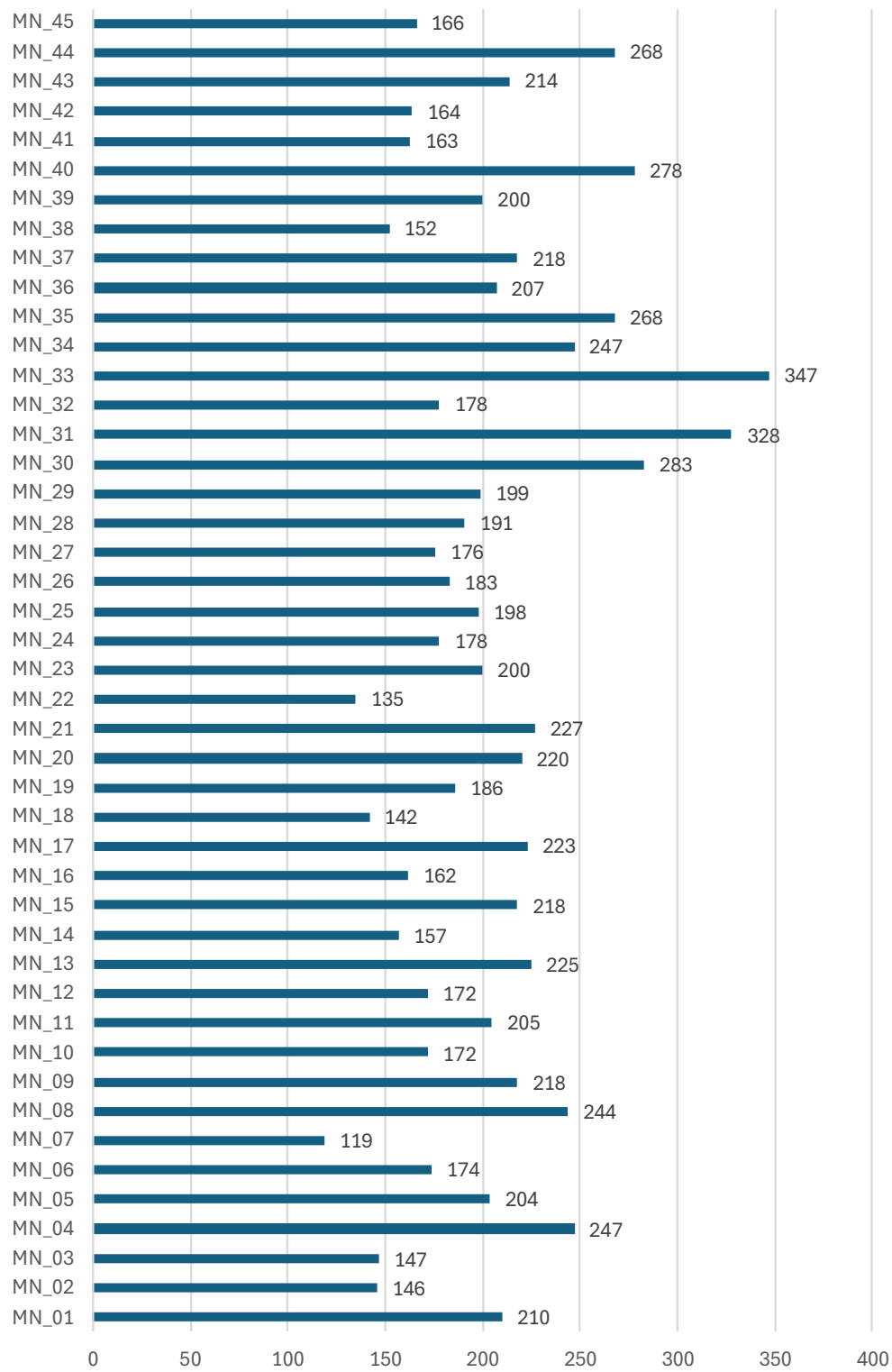


Figura 5.8: Número de interacciones por usuario con mandos.

La Figura 5.9 compara la cantidad de interacciones con la mano derecha y con la mano izquierda para cada usuario con los mandos. Estas muestras tienen una media de 52 interacciones con la izquierda y 150 con la derecha. Las medianas son respectivamente 53 y 150, lo que quiere decir que ambas muestras son simétricas, es decir, la mitad de los usuarios han hecho más interacciones con ambas manos que la media. Las desviaciones típicas de las muestras son aproximadamente 32 para la mano izquierda y 52 para la derecha. Los coeficientes de variación son respectivamente 60% y 30%. Esto significa que ha habido mucha más variación en la cantidad de interacciones general de los usuarios con la mano izquierda que con la derecha. Se ha realizado un contraste de hipótesis para comprobar si las interacciones con el mando izquierdo y derecho son similares. Se ha hecho una prueba t de muestras pareadas, ya que cada registro de mano izquierda y derecha es del mismo usuario. La hipótesis nula es que no hay diferencia en las medias, sale un p -valor de prácticamente 0, con lo que no se puede aceptar la hipótesis nula. Además, sale un estadístico t -9,3910, que indica una gran diferencia entre ambas manos.

La máxima diferencia entre interacciones para la mano izquierda y derecha de un usuario es de 232 interacciones, y la diferencia media de interacciones con la mano derecha e izquierda es de 109, que es una cantidad bastante alta, y en casi todos los usuarios domina la mano derecha, además la media de interacciones es de 200. Es decir, la diferencia general entre el máximo y mínimo de interacciones es mayor que la mitad de las interacciones para cada usuario. Se puede asumir con esto, que los usuarios en general utilizan la mano derecha para realizar el doble de interacciones que con la izquierda.

En resumen, las interacciones con la mano derecha son significativamente mayores que con la izquierda. Esto puede deberse a que los usuarios tienden a utilizar la mano dominante para usar controladores a los que no están acostumbrados diferentes.

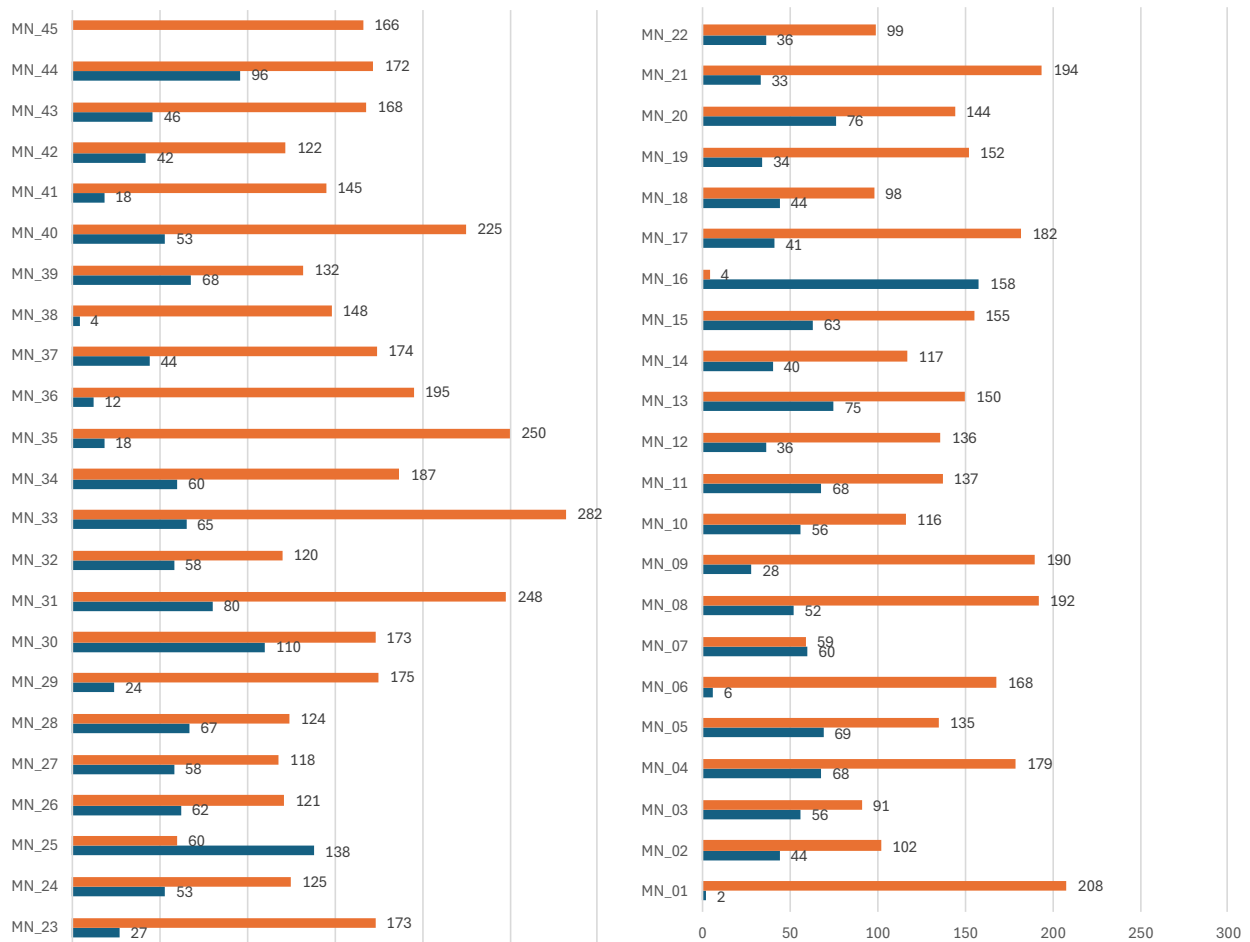


Figura 5.9: Comparación del número de interacciones con la mano izquierda (Azul) y derecha (Naranja) con mandos para cada usuario.

En cuanto al tiempo de duración de cada prueba, los usuarios con mandos han tardado una media de 10:59 minutos, los valores de duración de la prueba están entre 20:33 minutos y 6:07 minutos. Los usuarios con guantes han tardado una media de 11:02 minutos en completar la prueba, con valores entre 27:49 minutos y 7:42 minutos.

5.3.2 Datos obtenidos del cuestionario

A continuación, se muestran gráficas de las opiniones subjetivas de los usuarios, obtenidas a partir de las respuestas del cuestionario.

Los siguientes gráficos contienen la preferencia de las distintas interacciones físicas al comparar mandos y guantes en los usuarios de prueba.

La Figura 5.10 muestra una comparativa de las opiniones de los usuarios en la interacción con palancas. Un 27% de la gente prefiere los mandos frente a un 63% prefiere los guantes. Esto muestra que, en general, es preferible el uso de guantes para empujar palancas.



Figura 5.10: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con palancas, el rojo representa mandos y el azul representa guantes.

La Figura 5.11 muestra la preferencia reportada de los usuarios para la interacción de las puertas. Los guantes tienen un 87% de preferencia y los mandos un 13%. Esto significa que de forma general es preferible utilizar guantes para estas interacciones.



Figura 5.11: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con puertas. Rojo corresponde a mandos y azul a guantes.

La Figura 5.12 compara la preferencia de uso de mandos frente a guantes en las interacciones con los cubos. Los guantes tienen una preferencia del 16% y los mandos de 84%, lo que significa que es preferible utilizar mandos para este tipo de interacciones.

Ordenar los objetos "Pickup" pequeños



Figura 5.12: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con los cubos. Rojo corresponde a mandos y azul a guantes.

La Figura 5.13 muestra las opiniones sobre la interacción con conos. Con un 11% que prefiere utilizar guantes y un 89% prefiere los mandos. Se observa una clara preferencia del uso de mandos para esta interacción.

Mover los objetos "Pickup" grandes



Figura 5.13: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con los conos, rojo corresponde a mandos y azul a guantes.

En la Figura 5.14 se expone la preferencia para la interacción con dosímetros. Los guantes tienen una preferencia del 16% y los mandos 84%. Con esto se puede concluir que es preferente utilizar mandos para llevar a cabo este tipo de interacciones.

Interacción con objetos "Pickup hard"



Figura 5.14: Opinión de la encuesta sobre la preferencia de interacción con los dosímetros, rojo corresponde a mandos y azul a guantes.

La Figura 5.15 muestra una diversidad de opiniones en la mecánica de teletransporte. Un 56% de los usuarios prefieren el uso de mandos y el 44% prefieren los guantes. Esta diferencia es poco significativa, y no permite sacar conclusiones. A modo de trabajo futuro se podría estudiar según otros factores, como edad, género o experiencia previa, que puede conducir a estas preferencias.

Desplazamiento

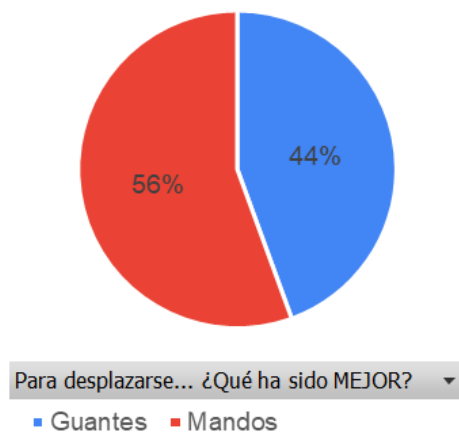


Figura 5.15: Opinión de la encuesta sobre la preferencia para el desplazamiento, rojo corresponde a mandos y azul a guantes.

A continuación, se presenta una serie de gráficos sobre las respuestas de los usuarios en las preguntas sobre interacción con mandos

La Figura 5.16 muestra la facilidad con la que los sujetos de pruebas han aprendido a coger y soltar objetos, donde el 5 representa la máxima facilidad y el 1 representa gran dificultad. De la totalidad de usuarios, un 2,2% han considerado relativamente complicado este aprendizaje, un 8,9% se muestran neutros, un 46,7% han aprendido de forma más sencilla y a un 42,2% le ha parecido muy fácil aprender a cogerlos.

Esto conforma una media de 4,2, con una desviación típica de 0,71, que es notablemente baja, y un coeficiente de variación del 16%, que también es muy bajo. Es decir, la mayoría de opiniones están entre 4 y 5. Además, solo hay una opinión por debajo de 3. Con esto se puede asumir que la mayoría de usuarios tuvo bastante facilidad para aprender a coger y soltar objetos con los mandos.

¿Qué facilidad tuviste para aprender a coger/soltar objetos?

45 respuestas

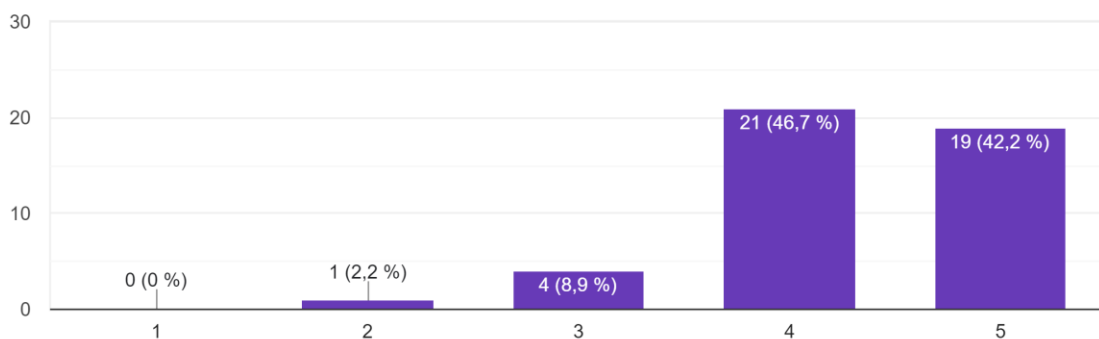


Figura 5.16: Respuestas a la encuesta sobre la facilidad para aprender a coger y soltar objetos con mandos. 5 corresponde a la mayor facilidad y 1 a la menor.

La Figura 5.17 muestra la dificultad que han tenido los usuarios para desplazarse por el entorno virtual, esta gráfica muestra gran disparidad de opiniones, ya que a un 33,3% le ha parecido muy sencillo, un 20% lo encuentra ligeramente menos sencillo, un 24,4% se muestra neutro, ni muy sencillo ni muy complicado; y a un 22,2% le ha parecido relativamente complicado el desplazamiento.

La media está en 3,64, la desviación típica es de 1,15, que es ligeramente alta respecto a la media, y el coeficiente de variación es 31%. Con esto no se puede sacar una conclusión clara sobre si ha resultado sencillo o no el desplazamiento con mandos

en general. Como trabajo futuro se podría separar a los sujetos por grupos más concretos para poder estudiar que condiciona esta opinión sobre el desplazamiento.

¿Cómo consideras la dificultad a la hora de desplazarte por el entorno?

45 respuestas

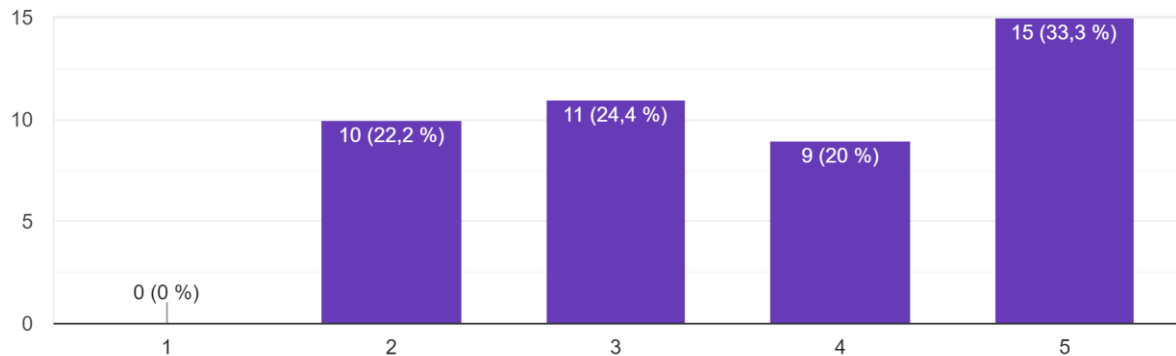


Figura 5.17: Facilidad a la hora de desplazarse por el entorno con mandos, donde 1 representa la mayor dificultad y 5 representa la mayor facilidad.

La gráfica de la Figura 5.18 muestra las opiniones de los usuarios sobre lo natural o intuitiva que ha resultado interacción de coger y soltar objetos con los mandos, al 20% le ha parecido muy natural, al 44,4% le ha parecido relativamente intuitiva, el 26,7% de los usuarios se muestran neutrales y al 8,9% le ha parecido relativamente poco natural.

La media es de 3,75, la desviación típica 0,8, que es baja con respecto a la media, y el coeficiente de variación es 23%. Esto significa que a la mayor parte de las personas les ha parecido relativamente natural la interacción con los mandos, aunque no han elegido el máximo. Cabe destacar que ningún usuario ha opinado que haya sido el mínimo, es decir nada natural. Por lo que se concluye que la interacción con mandos resulta natural pero no todo lo natural que sería deseable.

¿Cómo de natural/intuitiva te ha parecido la interacción con los objetos?

45 respuestas

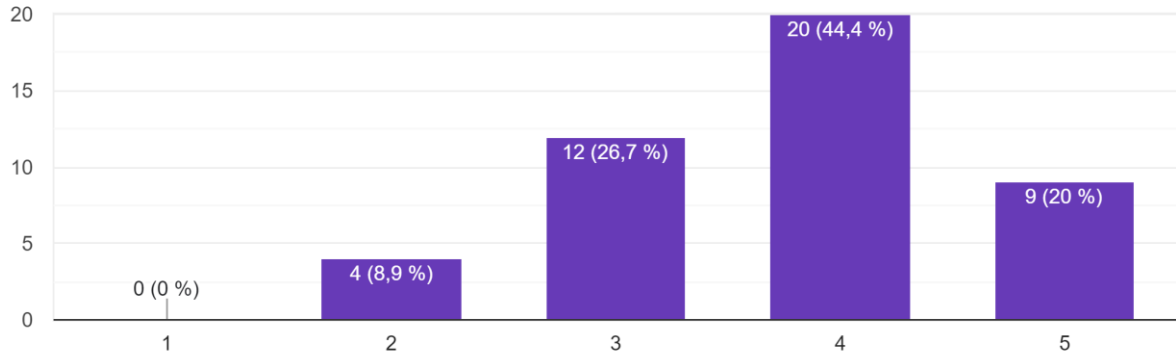


Figura 5.18: Opiniones de los probadores sobre lo natural que les ha parecido la interacción con los mandos, 1 corresponde a Nada natural y 5 a Muy natural.

A continuación, se presenta una serie de gráficos sobre las respuestas de los usuarios en las preguntas sobre interacción con guantes.

La Figura 5.19 muestra la facilidad que han tenido los usuarios a la hora de aprender a coger y soltar objetos con los guantes hápticos. Se puede observar una gran disparidad de opiniones, con un 8,9% que opina que es muy difícil, un 28,9% que lo ha encontrado bastante difícil, el 24,4% considera que no es ni fácil ni difícil, el 17,8% opina que es relativamente fácil y al 20% les ha resultado muy sencillo.

La media de opiniones está en 3,02, con una desviación típica de 1,27 que es bastante alta con respecto a la media, y el coeficiente de variación es de 40%, también muy alto. Con esto se concluye que no hay una opinión clara generalizada sobre la dificultad que tienen los usuarios a la hora de aprender a coger y soltar objetos con guantes.

¿Qué facilidad tuviste para aprender a coger/soltar objetos?

45 respuestas

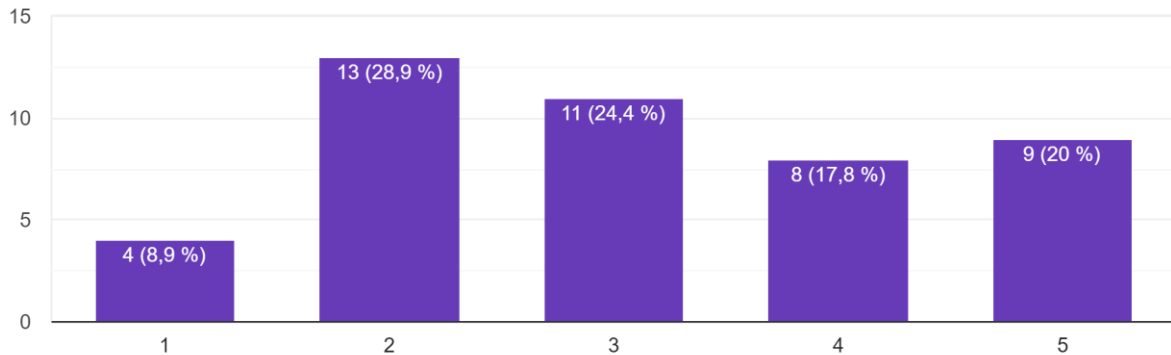


Figura 5.19: Respuestas a la encuesta sobre la facilidad que han tenido los usuarios para aprender a coger y soltar objetos con los guantes hápticos, 1 corresponde a muy difícil y 5 a muy fácil.

La gráfica de la Figura 5.20 muestra la facilidad que han tenido los distintos usuarios a la hora de desplazarse por el entorno con los guantes hápticos; en este caso se observan también opiniones muy dispares, con un 17,8% a los que les ha resultado muy sencillo, al 31,1% les ha resultado relativamente sencillo, un 22,2% de los usuarios opina que no es ni fácil ni difícil, un 26,7% lo ha encontrado bastante difícil y un 2,2% le ha resultado muy difícil el desplazamiento.

La media de opiniones está en 3,33, con una desviación típica de 1,11, alta con respecto a la media, y el coeficiente de variación es del 33%, que es relativamente alto. Con estos datos no se puede llegar a ninguna conclusión sobre como de difícil resulta en general el desplazamiento por el entorno.

¿Cómo consideras la dificultad a la hora de desplazarte por el entorno?

45 respuestas

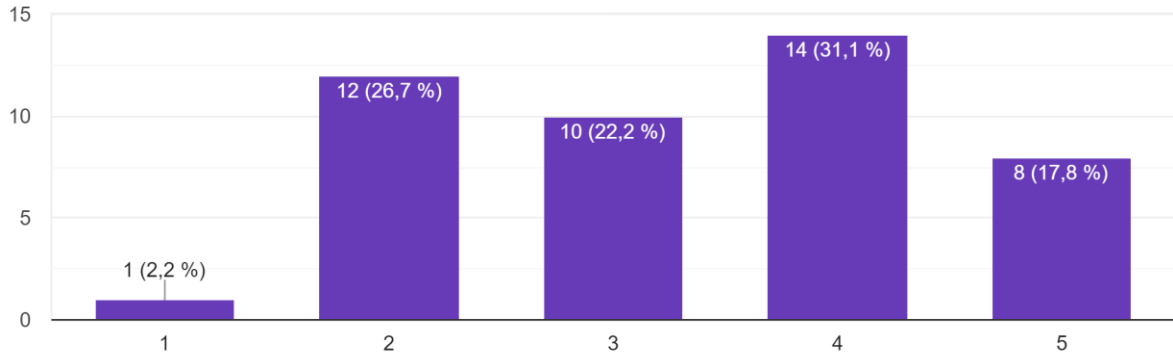


Figura 5.20: Opiniones de los usuarios sobre la facilidad que han tenido a la hora de desplazarse por el entorno con los guantes hápticos, 5 es muy fácil y 1 muy complicado.

Por último, la Figura 5.21 muestra la naturalidad que han sentido los usuarios de las pruebas a la hora de interactuar con los distintos objetos del escenario. En esta gráfica se observa también una gran disparidad, ya que todas las opiniones están muy igualadas, un 13,3% cree que la interacción no es nada natural, un 20% opina que es poco natural, un 22,2% se muestra neutro, otro 22,2% opina que es bastante natural y otro 22,2% cree que es muy natural.

Esta muestra tiene una media de 3,07, una desviación típica de 1,34, que es relativamente alta respecto a la media, y el coeficiente de variación es 44%. Con estos datos no se puede sacar ninguna conclusión, hay demasiadas opiniones diferentes en cuanto a cómo de natural resulta la interacción con guantes hápticos.

¿Cómo de natural/intuitiva te ha parecido la interacción con los objetos?

45 respuestas

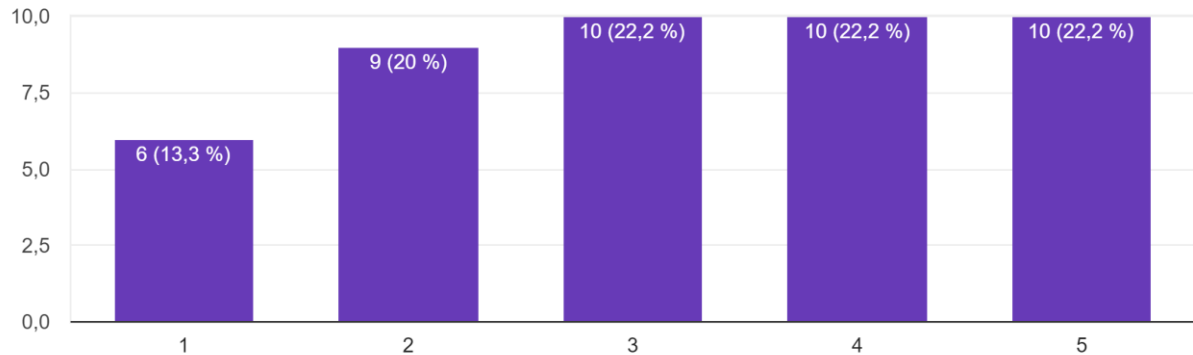


Figura 5.21: Opiniones de los usuarios sobre como de natural les ha resultado la interacción con los objetos y los guantes hápticos.

En este apartado se ha podido observar que las opiniones generales en la interacción con guantes son bastante diversas, y podrían depender de muchos factores, como el tamaño de las manos, el entrenamiento previo y conocimiento sobre la realidad virtual, entre muchos otros factores. Por eso se considera que, a modo de trabajo futuro, se debería hacer el estudio en el que se separe a los usuarios en distintos grupos, con el objetivo de entender que factores afectan al nivel de desenvolvimiento con guantes hápticos. Estas pruebas se han hecho con tan solo 45 participantes por lo que, en un futuro se deberían hacer con más, para sacar distintos grupos más numerosos y estudiar correctamente cada factor.

Comentarios destacados en las respuestas del cuestionario sobre la interacción con mandos:

- *“Los mandos en general son bastante intuitivos si has jugado previamente con unas gafas de Realidad Virtual.”*
- *“Al principio muy confusa, pero al cabo de un rato terminé más o menos cogiendo la dinámica.”*
- *“Lo mejor es que respondida inmediatamente. Lo peor, que los objetos colgaban y eso hacía que se movieran, dificultando posarlos en el suelo rectos.”*

- *“Cuando te acostumbras es relativamente sencillo e intuitivo, pero lleva un rato acostumbrarse.”*
- *“Se sentía bastante realista el tirar objetos y era bastante divertido. En general el movimiento y la experiencia con los mandos ha sido agradable. Lo peor de los mandos es que me ha costado un poco aprender cómodamente.”*

Se puede observar que, en general, los usuarios han quedado satisfechos con los mandos. Cabe destacar que gran cantidad de estos comentarios mencionan que puede ser difícil controlarlos al principio si no se había usado antes la realidad virtual, pero la mayoría coincide en que, una vez superada esa barrera de aprendizaje, las interacciones resultan sencillas y satisfactorias en general.

Comentarios destacados en las respuestas del cuestionario sobre la interacción con guantes:

- *“Me ha gustado mucho la forma de interactuar con los objetos porque creo que se siente más realista que una interacción con mando, sin embargo, he tenido bastantes problemas a la hora de desplazarme utilizando los guantes y he necesitado ayuda del equipo que estaba realizando las pruebas.”*
- *“En general es una experiencia interesante la de utilizar los guantes, al principio un problema era que cogía los objetos muy violentamente y luego no los podía soltar, pero en la prueba de los conos empecé a cogerlos con más calma y la sensación mejoró, al principio también me costó moverme porque tenía objetos demasiado cerca, pero aprendí rápido como alejarlos para poder moverme. En la parte de las puertas todo era incluso más intuitivo porque no había que agarrar nada, podías abrir las puertas con los puños y mover la palanca empujándola.”*
- *“Es complicado coger y soltar objetos, aunque en principio parece más realista luego resulta más extraño cuando no funcionan las cosas bien.”*
- *“Más fácil entender como interactuar con los objetos (muy realista e intuitivo el mover objetos arrastrándolos con la mano), errores al soltar objetos y colisiones con las manos cuando los sueltas.”*

En estas opiniones se puede observar que el mayor problema que han tenido los usuarios reside en la falta de desarrollo de los guantes. Muchos sujetos afirman que les resulta más natural la interacción, aunque se frustran porque surgen errores que hacen que no resulte tan natural cómo se podría esperar. Es importante destacar que parece que los guantes producen más frustración que los mandos, lo que puede deberse, a parte del desarrollo general, a que al ser interacciones más naturales, existe una mayor exigencia con lo realista que deben ser las interacciones y produce una mayor frustración cuando estas fallan

5.4 Análisis de los resultados

Los datos de interacciones que se han recogido en las pruebas indican una clara preferencia por el uso de mandos sobre guantes en la mayoría de las interacciones (Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14). Esto puede atribuirse al bajo grado de desarrollo tecnológico que tienen en este momento los guantes hápticos que se han usado para el proyecto. Sin embargo, las interacciones como empujar puertas y palancas (Figura 5.11y Figura 5.10), muestran mejores resultados, debido al diseño intencional de potenciar las ventajas de los guantes. La interacción permitía al usuario empujar estos objetos sin la necesidad de agarrarlos, lo que ha favorecido una interacción más orgánica con este tipo de objetos al usar guantes hápticos.

En las primeras gráficas (Figura 5.4 y Figura 5.5) se puede observar como el número de interacciones con los guantes es notablemente superior al número de interacciones con mandos. Esto se debe a los problemas de bajo desarrollo que presentan tanto los guantes como el plugin²¹ que permite utilizarlos en Unreal Engine. A pesar de la flexibilidad de la implementación en los *blueprints* para corregir fallos de *SenseGlove*, se presentan interacciones imprecisas con objetos. Algunos de los problemas más persistentes era la dificultad para agarrar y soltar objetos, al perder la respuesta háptica

²¹ Software adicional que se agrega a un programa para añadir funciones específicas o mejorar su rendimiento

del guante, o al tener que ayudarte de la otra mano para soltar objetos. Esto explica que el número de interacciones con guantes sea considerablemente mayor al número de interacciones con mandos.

Se ha podido observar un suceso notable, que se ha repetido como patrón para todos los sujetos de pruebas. La dificultad para soltar objetos hacía que estos se quedaran enganchados a las manos virtuales, esto ha desencadenado en la mayoría de los usuarios de pruebas un instinto natural a agitar las manos. Intentaban imitar el comportamiento que se llevaría a cabo cuando se queda un objeto real pegado a sus manos. Como el guante no está preparado para detectar este movimiento de manos como una intención de soltar objetos, ha generado cierta frustración en los usuarios, de los cuales una parte ha asumido que no se podía agitar, y otra parte ha intentado sacudir más fuerte, porque creían que esto liberaría sus manos del objeto. Este comportamiento resulta muy interesante, ya que es un indicativo de que la interacción con guantes es suficientemente inmersiva para que el usuario que los utiliza intente replicar los comportamientos naturales que lleva a cabo en las interacciones reales con objetos. Se podría estudiar si incorporar el movimiento de sacudida de los guantes para conseguir que el objeto se suelte de las manos, pero pondría en riesgo la integridad de los guantes, ya que son muy delicados.

Cabe añadir, que se ha recordado a cada usuario antes de las pruebas que no hicieran movimientos bruscos ni sacudieran los guantes, ya que se podía poner en riesgo su integridad, porque son hardware muy caro y delicado. Aun así, la mayoría de las personas han intentado sacudir las manos una vez estaban dentro de la simulación, al recordárselo el investigador muchos alegan “no haberse dado cuenta”, lo que muestra que hay una mayor inmersión. Esto indica que guantes pueden llegar a sentirse como las manos reales, ya que se controlan con movimientos mucho más intuitivos que los mandos, y la respuesta háptica al agarrar objetos hace más inmersiva la experiencia, de tal forma que los sujetos olvidan de forma subconsciente de que están en una simulación, y que los objetos no se controlan de la misma forma que los objetos reales.

En los gráficos de las Figura 5.7 y Figura 5.9 se puede observar que los usuarios con los mandos han tendido a utilizar la mano derecha mucho más que la izquierda por lo

general. En cambio, con los guantes, la mayor parte de los sujetos de prueba han utilizado ambas manos indistintamente. Además, como se ha mencionado en el apartado 5.3.1, la diferencia entre interacciones con ambas manos es de 109, más de la mitad de la media de interacciones, mientras que con guantes es de 40, que es casi una sexta parte de las interacciones.

Esto prueba que los guantes son más intuitivos. Ya que, con mandos la interacción se siente similar a la de un ratón de ordenador o un mando de videojuegos, ambos periféricos acostumbran a los usuarios a que, si bien se pueden utilizar ambas manos en los entornos virtuales, es mejor usar la mano dominante, ya que tiene más habilidad para realizar acciones que no son las naturales e intuitivas. En el caso de los mandos es evidente esta tendencia a usar más la mano derecha, que da la ilusión de mayor control sobre el mando y los movimientos e interacciones con los objetos. En cambio, las interacciones con mano izquierda y derecha están mucho más igualadas en guantes, lo que indica que el usuario percibe las interacciones de forma intuitiva, y al ser acciones como coger, soltar y empujar, que diariamente se realizan de forma indistinta con ambas manos, esto se traslada a la realidad virtual, donde los sujetos de pruebas se han sentido más cómodos y afianzados a la hora de utilizar ambas manos para la interacción.

En los gráficos de Figura 5.10 y Figura 5.11 se observa un patrón claro de preferencia. En las interacciones que premiaban la reacción natural, como abrir puertas y rotar palancas, ha habido una clara preferencia por el uso de guantes, ya que ha llevado mucho menos tiempo a cada usuario averiguar cómo funciona la interacción, y les ha proporcionado una mejor experiencia y retroalimentación por la respuesta háptica al interactuar con estos objetos físicos. En cambio, cuando el objetivo de la prueba premiaba la precisión de agarre, los sujetos de pruebas han preferido casi de forma unánime los mandos (Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14), ya que les permitían ser mucho más precisos con los movimientos que, aunque fueran menos naturales, han facilitado la interacción frente a los guantes.

Todo esto valida parcialmente la Hipótesis 1, ya que, al ser más intuitivos de utilizar, se asegura un mejor desempeño para los usuarios que lleven a cabo estas simulaciones,

sin necesidad de que hayan tenido un entrenamiento previo, ni ningún tipo de conocimiento en el área de la realidad virtual.

Cabe añadir que esto se supone en un caso ideal, en el que el desarrollo de los guantes esté suficientemente avanzado, y haya suficientes estudios con esta tecnología, que ya presenta un gran potencial por lo intuitivo e inmersivo que resulta, y una enorme superioridad en cuanto a facilidad de uso frente a los mandos convencionales. Cabe destacar que sí, a pesar de su temprano desarrollo, ya produce tal inmersión en los usuarios que la prueban, es evidente que toda investigación mejorará la experiencia y con ello pondrá por encima a los guantes hápticos como dispositivo de interacción en realidad virtual.

Una vez expuesto todo esto, y en el paradigma de desarrollo actual y con la tecnología disponible hoy en día, queda validada también de forma parcial la Hipótesis 2, se puede observar en las Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, que a la hora de realizar movimientos precisos, como interactuar con objetos con físicas y de diversos tamaños, al tener un objetivo concreto con estos, el usuario prefiere el uso de mandos por encima de los guantes, y esto no se debe a que la interacción en sí resulte más satisfactoria, sino que los mandos ofrecen más precisión, lo que permite realizar las tareas con más agilidad, y reduce la frustración del sujeto. También se puede observar en las Figura 5.4 y Figura 5.5 que los mandos requieren muchas menos acciones para llevar a cabo las mismas tareas, lo que basa una vez más su superioridad en el control preciso y alto desarrollo que tienen los mandos.

Se puede llegar a la conclusión de que los guantes generan interacciones mucho más intuitivas y naturales, y podrían llegar a funcionar de forma óptima para el entrenamiento de profesionales en entornos de realidad virtual, pero con la precisión superior que ofrecen actualmente los mandos frente a los guantes hápticos, por el momento es preferible optar por el uso de estos hasta que la tecnología de los guantes se haya desarrollado más.

Capítulo 6 - Discusión

El presente trabajo de investigación ha abordado el desarrollo y la comparativa de interacciones físicas para la que se han utilizado guantes hápticos y mandos en un entorno de realidad virtual implementado en *Unreal Engine*. Este capítulo de discusión tiene como objetivo analizar los aspectos más relevantes del proyecto en su contexto, se han evaluado las hipótesis planteadas y destacado tanto las ventajas como las limitaciones de este.

La primera hipótesis planteada sugería que, en entornos de formación de realidad virtual, el uso de guantes hápticos en comparación con los mandos tradicionales favorecería un mejor desempeño de las prácticas adquiridas en pruebas de campo y situaciones reales. Los resultados obtenidos durante el desarrollo y las pruebas confirman parcialmente esta hipótesis. Si bien se observó una mejora en el desempeño de los usuarios al utilizar guantes hápticos en ciertas tareas específicas, no se pudo establecer una ventaja definitiva sobre los mandos en todas las situaciones evaluadas. Esto sugiere que el impacto del tipo de dispositivo de interacción puede variar según el contexto y la naturaleza de la tarea.

En relación con la segunda hipótesis, que postulaba que la experiencia general de los usuarios en las pruebas con guantes sería menos satisfactoria que con los controladores tradicionales, los resultados mostraron una tendencia mixta. Si bien algunos usuarios expresaron cierta incomodidad inicial al adaptarse a la sensación y controles de los mandos, otros reportaron una experiencia más inmersiva y realista al utilizarlos. Esta discrepancia resalta la importancia de considerar las preferencias individuales y la familiaridad del usuario con la tecnología de realidad virtual al evaluar la satisfacción del usuario.

La tercera hipótesis planteaba que el uso de guantes durante las primeras interacciones sería más intuitivo que el uso de controladores. Los hallazgos sugieren que, si bien la curva de aprendizaje inicial puede ser ligeramente más pronunciada con los guantes debido a limitaciones hardware y software de la tecnología aplicada en concreto, una vez que los usuarios se familiarizan con la retroalimentación háptica, la

experiencia tiende a volverse más intuitiva y natural. Sin embargo, es importante destacar que esta percepción puede variar entre los usuarios y puede depender de factores individuales.

En cuanto a las ventajas del proyecto, se destaca la exploración de nuevas formas de interacción en entornos de realidad virtual, lo que puede tener aplicaciones significativas en campos como la formación, la simulación y el entretenimiento. El uso de guantes hápticos permite una mayor inmersión y realismo en la experiencia del usuario, lo que puede traducirse en una mejor retención del conocimiento y una mayor motivación para participar en actividades de aprendizaje. Además, el proyecto ha contribuido al avance del conocimiento en el campo de la interacción humano-computadora, y ha proporcionado información valiosa sobre las preferencias y percepciones de los usuarios respecto a diferentes dispositivos de entrada en entornos virtuales.

Por otro lado, es importante reconocer las limitaciones del proyecto, entre las que se incluyen las restricciones de tiempo y recursos que pueden haber afectado la amplitud y la profundidad de las pruebas realizadas. Además, se identificaron áreas para futuras investigaciones, como la optimización de la retroalimentación háptica para mejorar la experiencia del usuario y la exploración de estrategias para mitigar cualquier incomodidad asociada con el uso prolongado de los guantes.

En conclusión, el presente estudio ha proporcionado una base sólida para continuar la exploración del potencial de los guantes hápticos en entornos de realidad virtual, así como para informar el diseño y la implementación de futuras aplicaciones y sistemas interactivos.

Capítulo 7 - Conclusiones y trabajo futuro

El propósito de este capítulo es presentar las conclusiones derivadas de este trabajo, basadas en la información descrita hasta el momento. Además, se establecen directrices para futuros proyectos que busquen utilizar y desarrollar aún más este trabajo.

7.1 Conclusiones del proyecto

El objetivo principal de este proyecto se centra en el estudio e investigación del desarrollo y comparación de interacciones físicas entre guantes hápticos y mandos nativos del sistema de Realidad Virtual en un entorno simulado con *Unreal Engine 5*, con la idea de ofrecer información y muestras útiles sobre sus posibles ventajas e inconvenientes. Para lograr este objetivo, se han explorado diversas herramientas y proyectos relacionados con las interacciones físicas y virtuales. Se ha utilizado el software necesario para la creación de escenarios y entornos de realidad virtual para el desarrollo y, de esta manera, se han cumplido los objetivos iniciales centrados en el diseño e implementación del proyecto de investigación.

Con el fin de evaluar adecuadamente el estudio comparativo, se han llevado a cabo pruebas con usuarios externos al proyecto, para posteriormente analizar y sacar conclusiones sobre los resultados obtenidos.

Después de haber desarrollado los escenarios de prueba y completado todos los objetivos establecidos, se han llevado a cabo los ensayos correspondientes para analizar si el uso de ambos dispositivos cumple con las hipótesis planteadas en la Sección 1.2. Gracias a la gran cantidad de sujetos de pruebas, se ha podido obtener una muestra sobre la que obtener una conclusión veraz acerca de las hipótesis.

El primer objetivo de la fase de pruebas era corroborar si la Hipótesis1 era válida. Esta hipótesis define que, el uso de los guantes hápticos frente a mandos en entornos de formación de realidad virtual favorece que el usuario presenta un mejor desempeño de las prácticas adquiridas en pruebas de campo y situaciones reales. En términos de tiempo, la media de los usuarios en terminar ambas pruebas es muy similares, y la

cantidad de tiempo máximo en completarlas ha sido ligeramente mayor para guantes que para mandos, pero no es una diferencia significativa. Hay que aclarar que según las Figura 5.10 y Figura 5.11 las acciones que premian las interacciones más naturales son mejor recibidas con guantes. De modo que estas conclusiones no validan la primera hipótesis en su totalidad.

La segunda parte de esta fase fue asegurar si se cumple la hipótesis H₂. Esta hipótesis expresa que la experiencia general que encuentran los usuarios en las pruebas con guantes es menos satisfactoria que el uso de mandos. Al fijarse en las encuestas realizadas a los usuarios involucrados, se observa que alrededor de un 85,6% mostró una preferencia por el uso de mandos en las interacciones con objetos como se observa en las Figura 5.12, Figura 5.13 y Figura 5.14 (84% para cubos y dosímetros y 89% para conos). En el caso de interacciones con el entorno, como palancas y puertas, aproximadamente un 80% prefirió el uso de guantes, como se puede observar en *Figura 5.10* y *Figura 5.11* (un 87% para puertas y un 73% para palancas), lo que valida esta hipótesis.

Por último, faltaría respaldar la tercera hipótesis: El uso de guantes en usuarios durante las primeras interacciones es más intuitivo que el uso de los controladores. Pese a que en el anterior párrafo se habla de la preferencia de los usuarios por los mandos en interacciones con objetos, se ha observado en las pruebas, que los usuarios han realizado acciones mucho más naturales con los guantes que con los mandos, como utilizar ambas manos para recoger el objeto o sacudirlas para soltar objetos. Se considera que la frustración general que han provocado los fallos en los guantes durante el transcurso de la prueba muestra que, al sentirse más natural, los usuarios sienten de una manera más inmersiva cuando una interacción falla. Es decir, los guantes tienden a ser más intuitivos de utilizar desde el principio y generan una mejor inmersión. De este modo, la hipótesis queda validada.

En conclusión, se considera que el trabajo ha logrado cumplir con los objetivos establecidos. No obstante, los resultados del proceso de evaluación revelan que, aunque algunos datos son positivos y las hipótesis se validan parcialmente, la tecnología hardware y software de los guantes hápticos *SenseGlove NOVA*, presenta una serie de

dificultades a lo hora de realizar ciertos tipos de interacciones, y puede conducir a resultados poco satisfactorios en el entorno virtual, como se ha observado en los análisis de resultados del apartado 5.4.

7.2 Trabajo futuro

El trabajo futuro de este proyecto se presenta abierto a mejoras y ampliaciones en sus funcionalidades, especialmente con la nueva versión, *SenseGlove NOVA 2.X* [76], que se encuentra actualmente en distribución. Una de las principales metas es mejorar la comodidad y la satisfacción en la interacción con los guantes. Esto permitiría a los usuarios y desarrolladores de futuras aplicaciones implementar esta tecnología con mayor flexibilidad y control sobre las interacciones.

Un aspecto crítico que considerar es el correcto funcionamiento de los guantes con una amplia variedad de tamaños de manos, dado que la detección de entrada de los guantes se basa en la tensión que proporcionan los cables. Esto puede limitar la eficacia de las interacciones para manos más pequeñas. Una posible solución sería una actualización de firmware que brinde información sobre la fuerza de tensión aplicada por los dedos que proporcione ajustes más precisos según las necesidades del usuario y el entorno.

Durante los análisis de pruebas de usuario se ha observado que hay opiniones muy dispares sobre la experiencia con los guantes hápticos, como se puede observar en las Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21. Esto sugiere que podría haber factores como el género, tamaño de manos del usuario, experiencia previa con realidad virtual y con controladores en general, edad o educación. De cara a estudios futuros sería interesante dividir a los usuarios en grupos según estos factores, para poder estudiar si realmente influyen o no en la experiencia con mandos y guantes hápticos para estas simulaciones.

Otra área de mejora importante consistiría en simplificar la incorporación de nuevas interacciones por parte de los desarrolladores. Esto se lograría mediante la provisión de herramientas y documentación accesible que permitan a los usuarios

contribuir con sus propias funcionalidades, y fomentaría así la diversidad de elementos y una experiencia más inmersiva en el entorno. Por otro lado, la extensión de *SenseGlove* presenta ciertas limitaciones. Una lógica más accesible desde el editor facilitaría la extensión e integración del software por parte de los desarrolladores. Pudiendo ofrecer una experiencia más fiable a los usuarios, con mayor retroalimentación sobre las interacciones con guantes.

La incorporación de nuevos elementos destinados a mejorar el mantenimiento y la calidad del proyecto podría implicar mejoras la accesibilidad y la introducción de funcionalidades adicionales que hagan que el entorno interactivo sea más intuitivo, eficiente y agradable de utilizar. Este aspecto es fundamental, ya que estas mejoras surgirían de las necesidades observadas en usuarios que han experimentado el entorno simulado y que no se tuvieron en cuenta durante el desarrollo de este proyecto.

En resumen, todas estas mejoras contribuirían a hacer del uso de interacciones con guantes frente a mandos una opción más inmersiva, versátil, cómoda e intuitiva para los usuarios, lo que facilitaría la realización de pruebas de realidad virtual y permitiría reducir los costes que este tipo de entornos virtuales puedan repercutir en el ámbito de la formación de profesionales. Respecto al estudio del programa, se podrían diseñar varios experimentos adicionales que se enfoquen especialmente en diferentes áreas para una evaluación más detallada. Aunque estos aspectos se alejen del estudio original, se considera que agregarían valor al resultado final.

Capítulo 8 - Contribuciones personales

8.1 Javier Muñoz Martín de la Sierra

Javier Muñoz se ha involucrado plenamente en el proyecto desde el principio, trabajando junto a sus compañeros para lograr los mejores resultados posibles. Su compromiso y dedicación han sido constantes a lo largo del desarrollo. Como resultado, estas son algunas de las tareas más relevantes en las que ha participado:

Desde el inicio del proyecto, Javier Muñoz mantuvo una comunicación constante con los tutores y estableció un grupo de trabajo sólido y eficiente. Participó activamente en las reuniones de organización del proyecto, asegurando una coordinación efectiva entre los miembros del equipo.

Participó en la exploración inicial de diferentes proyectos base de Unreal Engine, lo cual fue crucial para determinar la base del proyecto. Evaluó varias opciones hasta seleccionar el proyecto base de interacciones físicas con ratón y teclado. Durante esta fase, realizó experimentos preliminares y extensiones junto con Juan Diego y Sergio, lo que permitió una integración exitosa de todas las interacciones físicas con mandos, un esfuerzo colaborativo con Juan Diego.

La migración al proyecto de *ADARVE* fue otro hito importante. En este proceso, Javier Muñoz colaboró estrechamente con Juan Diego, Laura y Sergio, enfocándose en la transición del mapa base de físicas y en la corrección de errores.

En una etapa temprana del desarrollo, Javier Muñoz, junto con Laura y Juan Diego, analizó diversas posibilidades para implementar nueva lógica funcional en la API de *SenseGlove*. Este análisis fue fundamental para definir la dirección del proyecto. Posteriormente, Javier Muñoz y Sergio integraron los guantes hápticos en el sistema de interacciones cinemático.

Una vez los guantes hápticos fueron integrados al proyecto, Javier Muñoz junto con Sergio, incorporó el sistema de interacciones dinámico a la interacción de guantes, mejorando así la versatilidad del sistema.

Este último paso fue desafiante, especialmente debido a problemas que se han experimentado con la API de *SenseGlove*, como la llamada de interacciones que el usuario no realiza. Como resultado, hubo que hacer un análisis exhaustivo del funcionamiento de *SenseGlove* y como resultado, Javier Muñoz tuvo que reformular las *blueprints* relativas a la interacción del usuario para evitar errores y asegurar interacciones más precisas.

Además, junto con Laura, Javier Muñoz desarrolló un sistema de teletransporte que permite a los usuarios moverse sin dificultades por el entorno virtual utilizando guantes hápticos. Este sistema de teletransporte permite a los usuarios desplazarse a cualquier parte de una malla, mejorando significativamente la navegación en entornos virtuales complejos. Mientras Javier trabajaba en el sistema de teletransporte por malla, Laura desarrolló un sistema basado en anclajes, proporcionando puntos de referencia específicos que facilitan el movimiento preciso y controlado dentro del entorno virtual.

Participó activamente junto al resto del equipo en elaborar y realizar el primer plan de pruebas de usuario con alumnos de instituto. Esta prueba fue crucial para corregir y elaborar un plan de pruebas de usuario definitivo.

También participó en el diseño de los escenarios para las pruebas de usuario definitivas, en colaboración con Laura, asegurando que estos fueran adecuados para la recolección de datos significativa. Además, querían que el usuario tuviera un entorno interesante con el que interactuar, haciendo la experiencia más atractiva y estimulante, lo que a su vez mejoraría la calidad de la retroalimentación obtenida durante las pruebas.

Javier Muñoz participó activamente en múltiples pruebas de usuario, alternando su presencia con la de Juan Diego y Sergio, con el fin de asegurar que al menos uno de ellos estuviera presente junto a Laura, quien dirigió todas las sesiones de prueba.

Finalmente, la redacción de la memoria se realizó en colaboración con el resto del equipo, garantizando la cohesión y precisión de todo el trabajo y los hallazgos del proyecto.

8.2 Laura Gómez Bodego

Laura Gómez, al igual que sus compañeros, ha puesto el máximo empeño posible para sacar adelante el proyecto de forma óptima y en el tiempo estimado para ello. Con este objetivo en mente, ha realizado las siguientes tareas.

De forma principal, ha asistido a todas las reuniones bisemanales con los tutores y ha participado activamente en estas, exponiendo de forma asertiva los problemas y mostrando los avances de forma clara. Además, ha tomado un papel principal en la comunicación con los tutores, y se ha encargado de mandar los correos necesarios cuando hacía falta, tanto para pedir reuniones como para informar de avances y problemas inesperados.

Para comenzar, Laura se encargó de la instalación inicial de la aplicación *SenseCom* para la comunicación entre los guantes hápticos y el ordenador. Para ello investigó en la sección de desarrolladores de la página de *SenseGlove* y, una vez encontró el software, lo instaló en los ordenadores del proyecto y comprobó que funcionara. Además, se ha encargado de actualizar las versiones cada vez que había una nueva, para asegurar que la investigación estuviera al día con el software. También formó parte de la primera investigación sobre el software y el plugin de *SenseGlove*, junto con Javier y Juan Diego.

Además de todo esto, se ha encargado de investigar e implementar la detección de poses de las manos con los guantes. Haciendo uso de ello, ha desarrollado la mecánica del teletransporte junto con Javier. Además, ayudó en la integración del sistema de interacciones físicas con guantes en realidad virtual, apoyando a Javier y a Sergio, que se encargaron de forma principal de esta parte. También formó parte del equipo de migración del proyecto que se había creado con *SenseGlove* al proyecto de *ADARVE*, junto con Javier y Sergio.

De forma adicional, Laura participó en las pruebas iniciales con usuarios, junto con Juan Diego, Sergio y Javier. Además, se encargó de forma principal del diseño e implementación de los escenarios de las pruebas finales junto con Javier.

Además de todo esto, tomó el control en las pruebas de usuario, para ello se encargó inicialmente de buscar voluntarios, y una vez estos confirmaron su participación, dedicó parte de su tiempo de trabajo para organizarlos en días y horas concretas para la realización de las pruebas; también fue la encargada de comunicarse con ellos, tanto para asegurarse de que estuvieran disponibles en el horario propuesto como para recordarles cuándo y donde debían estar para la realización de cada prueba. Asimismo, estuvo presente durante el desarrollo de todas las pruebas, indicando a los usuarios qué y cómo debían hacer para completarlas con éxito. Durante algunas de estas pruebas también estuvieron presentes para apoyar su labor Javier, Sergio y Juan Diego.

Además de esto, Laura se encargó de realizar el análisis crítico y exhaustivo de los resultados obtenidos de las pruebas. Para ello, primero generó las gráficas sacadas de los datos de seguimiento de la aplicación, y calculó todos los valores necesarios para sacar conclusiones de ellas y explicar de forma clara que significa cada uno. También combinó estos datos con la información obtenida de la observación presencial de las pruebas y el posterior análisis de los vídeos sacados de la aplicación. Utilizando toda esta información, se ha encargado de sacar conclusiones, para comprobar si se cumplen o no las hipótesis planteadas.

Una vez finalizado este análisis, Laura se ha encargado de la redacción de la memoria junto al resto de los compañeros de investigación. Concretamente, se ha centrado en plasmar los análisis y los resultados obtenidos de las pruebas, aunque ha participado en la redacción y maquetación de más partes de esta memoria, según ha hecho falta. También se ha encargado de forma activa, junto con Sergio, Juan Diego y Javier de revisar constantemente el texto, detectando posibles errores de redacción y ortografía, modificando textos para explicarlos mejor e intentar que se plasme de forma correcta tanto la idea del estudio como lo realizado durante la implementación e investigación.

8.3 Sergio Baña Marchante

Sergio, al igual que el resto de los compañeros de su equipo, ha intentado dar lo mejor de sí en este proyecto de investigación. Desde el principio del desarrollo, ha intentado formar parte activa de este, asistiendo a prácticamente todas las reuniones bisemanales del desarrollo y comunicándose de manera locuaz y constante con sus compañeros de equipo y tutores. Esta dedicación y constancia, tanto por su parte como por parte del resto del equipo de desarrollo, ha sido crucial para mantener una buena coordinación y un flujo constante de trabajo y que el resultado de la investigación haya sido satisfactorio.

Desde una etapa temprana, Sergio se encargó junto al resto de sus compañeros de realizar una investigación previa sobre *SenseGlove* antes de empezar a desarrollar cualquier aspecto del proyecto. Esta investigación fue crucial para entender las capacidades y limitaciones de *SenseGlove*, lo cual permitió establecer unas metas realistas.

Además, hizo la primera toma de contacto del plugin de *SenseGlove* en *Unreal Engine*, programando un *blueprint* inicial para comprobar que el proyecto estaba bien configurado y que todas las características estaban funcionando correctamente, además de comprobar que la idea del proyecto era viable antes de continuar con el desarrollo de este.

Una parte fundamental en la que aportó Sergio, con la ayuda de Javier y Juan Diego, fue en la extensión del proyecto de físicas, conocido como *Physical Interaction System*, para hacerlo funcionar correctamente con la realidad virtual, lo que supuso un gran avance en el proyecto y además permitió realizar unos primeros pequeños experimentos.

Además, se hizo cargo en gran parte de la integración de *SenseGlove* como sistema de interacciones. Este proceso lo llevó a cabo con la ayuda de Javier y Laura, el cual les tomó gran parte del desarrollo del proyecto debido a los problemas descubiertos de la *API* de *SenseGlove*, así como las llamadas a supuestas interacciones que el usuario en ningún momento realiza.

Posteriormente, Sergio se encargó, de nuevo con Laura y Javier de migrar dicho sistema de interacciones con *SenseGlove* al proyecto *ADARVE*, donde se continuó el resto del desarrollo del proyecto.

Hablando de las pruebas de usuario, Sergio ayudó en el diseño y la realización de las pruebas iniciales a estudiantes de instituto, las cuales fueron determinantes para diseñar unas pruebas adecuadas y llevarlas a cabo de la manera más correcta posible.

En cuanto al resto de las pruebas de usuario, Sergio ha ayudado a su compañera Laura a realizarlas, quien ha sido la mayor contribuidora a este apartado, junto con la ayuda de Javier y Juan Diego con los que iba turnándose. Sergio se encargó en este apartado de manejar el material, tanto los guantes hápticos de *SenseGlove* como el visor *Meta Quest 2*, poniendo y quitando dicho material a los usuarios de prueba al principio y al final de esta respectivamente.

Dejando ya atrás la parte más técnica del desarrollo y las pruebas con usuarios, Sergio ha colaborado codo con codo con sus compañeros de equipo en la redacción de esta. Se ha encargado especialmente de la sección en la que se habla sobre el trabajo ya existente, el estado del arte, dedicando tiempo a buscar y leer artículos, libros y otros tipos de documentos relevantes para informarse acerca de los temas competentes tratados durante el desarrollo del proyecto y redactando los conocimientos adquiridos, citando cada artículo.

Por último, ha puesto un gran hincapié, junto al resto de sus compañeros, en la corrección y el perfeccionamiento de la memoria, detectando posibles erratas e intentando reflejar lo mejor posible las ideas y conocimientos adquiridos a lo largo del desarrollo del proyecto.

8.4 Juan Diego Mendoza Reyes

Juan Diego, al igual que los miembros del equipo, ha brindado su mayor esfuerzo en este trabajo y estuvo participando activamente durante todo el desarrollo del proyecto. Su compromiso se reflejó en su asistencia constante a las reuniones bisemanales, donde contribuyó con ideas y perspectivas valiosas en las discusiones sobre decisiones de diseño y organización de tareas. Además de su presencia en estas reuniones, Juan Diego estuvo disponible en todo momento para ofrecer soluciones prácticas y apoyo técnico al equipo de desarrollo.

Desde las primeras etapas del proyecto, Juan Diego se involucró en las investigaciones iniciales del software de SenseGlove junto a Javier y Laura. Juntos, realizaron un exhaustivo análisis para comprender el comportamiento de la tecnología y su aplicación en el proyecto. Además, Juan Diego desempeñó un papel crucial en la implementación de la plantilla de físicas, inicialmente diseñada para teclado y ratón, en colaboración con Sergio y Javier. Durante esta fase, dedicaron tiempo a desarrollar experimentos y prototipos para las interacciones con mandos, explorando nuevas posibilidades y soluciones potenciales.

A medida que el proyecto avanzaba, Juan Diego asumió una mayor responsabilidad en la implementación definitiva de las interacciones de objetos, trabajando en estrecha colaboración con su compañero Javier. Juntos, redefinieron el comportamiento de los objetos para que respondieran de manera óptima al uso de mandos, asegurando una experiencia de usuario fluida y satisfactoria. Además, lideraron la migración del prototipo de físicas al proyecto Adarve, centrando sus esfuerzos en la integración del sistema de físicas, objetos e interacciones de mandos. Durante este proceso, Juan Diego junto con el resto del equipo, trabajaron de manera cooperativa para configurar y solucionar los problemas de integración que las funcionalidades del primer prototipo habían presentado en la migración al proyecto de ADARVE.

Una vez completada la migración del proyecto, Juan Diego asumió la responsabilidad de diseñar e implementar los menús correspondientes a SenseGlove y mandos. Este trabajo no solo requirió habilidades técnicas avanzadas, sino también una

comprensión profunda de las necesidades de la herramienta y los requisitos del proyecto. Además, Juan Diego desarrolló un sistema para la creación, gestión y registro de las interacciones de los usuarios, garantizando la precisión y fiabilidad de los datos recopilados durante las pruebas.

Durante el período en que Laura fue la principal responsable de realizar las pruebas de usuario, Juan Diego brindó apoyo continuo al equipo, ofreciendo explicaciones detalladas sobre los experimentos, resolviendo problemas técnicos y facilitando la recopilación de comentarios sobre la experiencia del usuario. Su compromiso y dedicación fueron fundamentales para el éxito de estas pruebas, asegurando la calidad y relevancia de los resultados obtenidos.

Además de su contribución técnica al proyecto, Juan Diego desempeñó un papel activo en la redacción de la memoria final, ofreciendo perspectivas valiosas y recomendaciones prácticas para mejorar su contenido y estructura. Como parte de este proceso, Juan Diego fue el principal responsable de elaborar la traducción al inglés de las secciones requeridas por la normativa de la Universidad Complutense de Madrid. Por último, ha estado junto con Laura, Sergio y Javier de manera proactiva en el proceso de revisión de la memoria, detectando posibles errores ortográficos, bibliográficos y de maquetación, asegurando de esta manera que el documento final cumpliera con los estándares de calidad establecidos por la normativa.

En resumen, Juan Diego ha demostrado un compromiso excepcional con el proyecto, contribuyendo de manera significativa a todas sus etapas.

Capítulo 9 - Introduction

The training of specialized workers in controlled environments is crucial for the competent development of future professionals. Nowadays, with the growth of digitalization, industries seek to ensure proper training in relevant job roles, recreating realistic work situations in a controlled virtual environment to minimize real errors that can be more expensive and present workplace accidents [1].

More companies and institutions do prefer to instruct new professionals through simulators and virtual reality systems to reduce costs and avoid potential setbacks with tests in controlled real situations [2]. This facilitates an access to immersive training environments and improves the accuracy of the tests, effectively reflecting realistic field situations.

It is crucial not only to create interactive virtual environments for professional training but also to ensure that those with little or no experience in Virtual Reality [3] adapt as best as possible to these environments. This study focuses on this need and makes a comparison between input devices such as haptic gloves²² and conventional controllers. User tests will be conducted to identify advantages and disadvantages, aiming to optimize the learning experience and training effectiveness in these environments.

Virtual reality systems like Meta Quest [6] or HTC Vive [7] integrate headsets²³ and controllers [8] as input devices. These technologies allow the execution of applications developed in software tools such as Unreal Engine [9] and Unity [10], which provide facilities for creating functionalities, rendering, and designing scenarios. There are also non-native devices of virtual reality platforms that can be implemented for use in applications of these platforms.

²² Devices that enable users to feel and manipulate virtual objects in virtual reality environments through tactile feedback.

²³ Devices that allow users to experience immersive digital environments through stereoscopic displays and motion sensors.

In this study, one of the challenges of the ADARVE project [11] (*Virtual Reality Data Analysis for Radiological Emergency Training*) code SUBV-20/2021, funded by the Nuclear Safety Council, has been addressed, which is the interaction of haptic gloves in virtual reality environments. Although the focus of the ADARVE project is on training professionals for radiological emergencies [12], this study focuses on investigating the potential technological and methodological advances that can improve immersion and training effectiveness in VR²⁴.

This study benefits from the context provided by ADARVE and uses shared technologies and approaches, as a result an extension of project ADARVE has been developed to create virtual environments with dynamic interactions²⁵. By investigating the effectiveness of haptic gloves against virtual reality controllers, the objective is to improve the interaction and immersion of users without prior VR experience. This line of research is essential to maximize the usability and effectiveness of virtual reality platforms in various fields [13].

Overall, this work is inspired by ADARVE's objectives and applies its principles to a new context. By studying how different input devices affect the user experience, it seeks to contribute to the continuous improvement of training and education through virtual reality in the ADARVE's framework.

9.1 Motivation

Training users in real environments entails high costs and significant logistical complexity [14]. For this reason, the implementation of training in virtual reality environments is considered, with the aim of minimizing the costs and risks associated with such training. However, virtual reality systems are complex and not very accessible to the

²⁴ Abbreviation of Virtual Reality

²⁵ Interactions influenced by the game engine's physics, such as gravity or collisions.

general public. These devices do not have a user-friendly interface for new users [15]; nevertheless, haptic gloves offer a new, more intuitive, and easier way to interact.

Virtual reality has become an essential tool for training and education in various industries thanks to its ability to create safe and controlled environments, where users can learn and practice skills without the risks associated with real situations [1]. However, in order for VR to be effective, it is crucial that users can interact intuitively and naturally with these environments.

To achieve this goal, different forms of interaction will be evaluated to determine the strengths and weaknesses of each, and to conclude which may be the most effective, comfortable, and user-friendly. In particular, the study focuses on two types of interaction: through controllers and through haptic gloves. Haptic gloves, although still in development, promise a more natural interaction by allowing users to feel and manipulate virtual objects in a way that closely resembles the manipulation of real objects. On the other hand, VR controllers are more conventional and widely available in the market but may be less intuitive for inexperienced users.

Additionally, the purpose is to explore future opportunities that this new form of interaction may offer. This goal is to determine whether the use and development of applications or environments with haptic gloves facilitate the adaptation of users without previous experience and/or unfamiliar with virtual reality technology, in a more intuitive and straightforward manner than conventional methods. The utmost objective is to conclude whether the development of applications for haptic gloves is a cost-effective and appealing option that should be promoted among individuals, technology sector companies, and future research projects in universities and institutions.

For these reasons, the initiative has been taken to conduct a comparative study of user experience between haptic gloves and controllers in an interactive virtual reality testing environment developed in *Unreal Engine 5*. This study will not only allow the evaluation of the effectiveness of each type of input device but also contribute to the advancement of virtual reality technology by providing data and insights that can enhance the user experience in virtual environments.

9.2 Initial Hypothesis

Based on all the aforementioned, the main objective of this study is considered to analyze the impact of using haptic gloves against controllers on user experience. The following hypothesis is proposed:

Hypothesis 1: In virtual reality training environments, the use of haptic gloves compared to controllers promotes better performance of acquired practices in field tests and real-life situations.

Validating this hypothesis provides information about whether this recent technology meets the expectations of this research project. However, user performance and satisfaction during the use of the respective device are not the same. While both concepts are related, it is important to determine which device offers a better experience. The current state of gloves is a very novel technology, and its use is not yet standardized; therefore, a new hypothesis is proposed:

Hypothesis 2: The overall experience users encounter in tests with gloves is less satisfactory than using controllers.

However, the aim of this study is to verify that the use of gloves to interact with the environment is as intuitive as possible. This leads to proposing a third hypothesis:

Hypothesis 3: The use of gloves by users during initial interactions is more intuitive than the use of controllers.

9.3 Objectives

Below are the general objectives that outline the main goals of the project. These objectives guide its development and ensure a consistent approach throughout all stages.

- Creation of a system for comparing different interactions.

Design and develop a system that allows for the comparison and analysis of various interactions. This system must be capable of efficiently collecting data, gathering relevant evaluation metrics, and generating detailed reports that facilitate understanding the differences and similarities between the interactions studied.

- Conducting test.

Establish a testing plan to evaluate the performance and effectiveness of the interaction system. These tests should include a comparison between both types of input devices and study the behavior of test subjects within the scenario.

To effectively develop the research of this project, it has been crucial to establish clear and concise objectives that allow us to recreate a real environment. Below are some initial objectives prior to the project's development that provide a structured initial guide.

- Systematic review of haptic gloves in the current market.

Investigate and evaluate various haptic gloves available on the market to select the most suitable option.

- Analysis of the simulation engine to be used.

Examine the use of the Unreal Engine 5 simulation engine in this research and verify its technical capabilities and specific features for integrating haptic gloves into virtual reality environments.

Once the objectives have been addressed, this work seeks to demonstrate the hypotheses outlined in Section 9.2, and the following objectives are followed:

- Definition of virtual interactions with haptic gloves.

Develop a catalog of basic virtual reality interactions and their possible implementations with haptic gloves.

- Integration of haptic gloves into a virtual reality environment.

Create a prototype scenario with gloves and object interactions without motion implementation.

- Implementation of a physics system in virtual reality interaction.
Develop a series of physical interactions for each type of interactable object in the virtual reality project, preliminarily designed with controllers.
- Design and implementation of interactions with haptic gloves in virtual reality.
Define and develop the interaction methods between the user and the interactable objects to be used in user tests. Also, it will be taken into account that controller's movement system will try to emulate an interaction/gesture with the gloves, ensuring both movements offer a similar experience.

Once these objectives are achieved, the prototype software for the haptic gloves will be integrated into the physical interactions project. The objective is to always maintain a separation of user input between controllers and gloves.

- Development of a data registry to collect data from the tests.
Create classes and systems that will generate data tables from user tests, differentiating between gloves and controllers, to obtain reliable results for each experiment for comparison.
- Design two interactive scenarios for gloves and controllers.
Two identical scenarios with dynamic interactions will be created and designed for haptic gloves and controllers to conduct tests. The objective is to compare the interactions that occur with both in the same environment, ensuring that the data obtained from each test can be compared with one another.
- Execution of experimentation with a group of real users to collect data and conduct the study.
Anonymously consider the user profile so the collected data is truthful and applicable to larger samples.
- Exhaustive analysis of the data obtained in the experiments.

Process the collected data from the tests to confirm the hypothesis. Likewise, based on this conclusion, determine which interactive elements the user values most and what advantages can be found when using gloves versus controllers.

9.4 Methodology

In this section, the tools and programs used to conduct this project are addressed, as well as the coordination among team members to execute the various tasks that comprise this work.

9.4.1 Technologies and tools used

9.4.1.1 Meta Quest 2

A virtual reality headset is a device that allows users to immerse themselves in three-dimensional digital environments and provides an immersive experience by displaying images and sounds that respond to head and body movements. In this context, the *Meta Quest 2* headset [16], developed by *Meta Platforms Inc.*, has been used. Its competent hardware²⁶, lightweight and comfortable design, along with features such as hand tracking and inside-out tracking without external sensors, make it an accessible option for the project.

9.4.1.2 SenseGlove Nova

SenseGlove Nova [17] is a virtual reality controller developed by *SenseGlove Inc.* [18]. It comes in the form of a glove that tracks user movements and provides haptic feedback, allowing users to feel the density and size of virtual objects. It is designed to train technical professionals, such as aircraft mechanics and assembly line workers, in complex tasks intuitively [19]. Glove calibration is done through the *SenseCom* software [20]. This controller will be the main object of study for which interactions with objects in the virtual environment have been developed and implemented.

²⁶ The ensemble of physical and tangible components of a computer system

9.4.1.3 SenseCom

Specific software is required for the operation of haptic gloves with development tools. In this context, the *SenseCom* application, developed by *SenseGlove*, creators of the *SenseGlove Nova 1.X* and *2.X* device [17], is used. *SenseCom* allows Bluetooth pairing with the computer, as well as glove calibration and firmware²⁷ updates.

This software plays a crucial role by providing the necessary interface to properly configure and manage haptic gloves in the virtual reality and simulation environments that will be developed. Additionally, it allows the development company to incorporate updates that include improvements and bug fixes for the haptic gloves.

9.4.1.4 Unreal Engine

A game and simulation engine is a software designed to provide development, rendering, and execution facilities of interactive applications in 2D, 3D and extended reality, such as games, simulations or applications [9]. This software is used by individuals, technology sector companies, and research projects in universities and institutions [13].

To develop a virtual reality environment for comparison, *Unreal Engine 5*, developed by *Epic Games* [9], was chosen as the chosen tool due to its ability to integrate haptic gloves and its potential to create realistic virtual environments. Additionally, it offers processing power and improvements in optimization and performance for application execution. Lastly, it has a node-based *API*²⁸ [22] with extensive and well-detailed documentation, supported by the company itself and by experts in the tool.

9.4.1.5 Visual Studio

Although the *API* is native to the development engine, *Visual Studio 2022* has been used too, an integrated development environment (*IDE*) that offers functionalities to facilitate application development [23]. It includes modules designed to work with

²⁷ Software integrated into electronic devices that controls their operation.

²⁸ Application Programming Interface

various programming languages and platforms. The choice of this *IDE* is based on its native integration and specific support for the programming language used in *Unreal Engine 5* [24], ensuring an efficient development experience, especially in the research process on low-level implementation of haptic gloves. This contributes to a better understanding of the structural approach and the development of the necessary code for the work.

9.4.1.6 Scrum's Tools

For project organization and management, various applications have been used to facilitate task planning with the aim of executing them efficiently.

GitHub [25] has been used as a version control system to keep the most recent versions of the project updated and to back up development. The repository for this study is hosted there.

On the other hand, for task management, *Pivotal Tracker* [26] was used, an agile project management tool that allows planning, prioritizing, and tracking software development tasks in collaborative teams. Most tasks had a duration of two weeks, which coincided with the interval between meetings agreed with the project supervisors.

9.4.1.7 Excel

The CSV file format [27] has been used for data creation and storage, which follows a structure of data and values. CSV allows storing data in a simple and readable manner. In this data processing, *Microsoft Excel* tool has been used to clean it and various charts were created to analyze the results clearly. Additionally, means, medians, variances, and deviations were calculated to analyze the general behavior of the test users. This way, it can be determined if the results are generalizable.

9.4.1.8 OBS

For recording user tests, *OBS Studio* [28] has been used, an open-source software used for recording and live streaming multimedia content that allows capturing video and audio from various sources such as webcams, microphones, and application windows.

9.4.2 Work Plan

In this section, the tools and programs used to conduct this project are addressed, as well as the coordination among team members to execute the various tasks that comprise this work. The detailed planning can be found in Table 9.1.

Date	Completed tasks
May 2023	Original idea conceptualization, formation of the workgroup, and agreement with project supervisors.
September 2023	Work planning, technology preselection, periodic scheduling of meetings with supervisors and task initiation.
October 2023	Research and design of the initial environment prototype. First study on the state of the art.
November 2023	Implementation of the <i>NOVA</i> prototype in <i>Unreal Engine 5</i> and creation of an unfinished physics system.
December 2023	Design and prototyping of the physics system with initial glove utilities.
January 2024	Completion of the glove physics system and initial glove prototype.
February 2024	Design and implementation of databases. Development of interactions with gloves.
March 2024	Connection of data logging with glove and controller physical interactions. Design of an initial virtual environment with interactions.
April 2024	Finalization of the glove physics system. Planning and execution with the subjects involved in user testing.
May 2024	Compilation of collected data. Drafting of the project report and conclusions.
June 2024	Presentation of the project before the panel and publication of it.

Table 9.1: Work Plan.

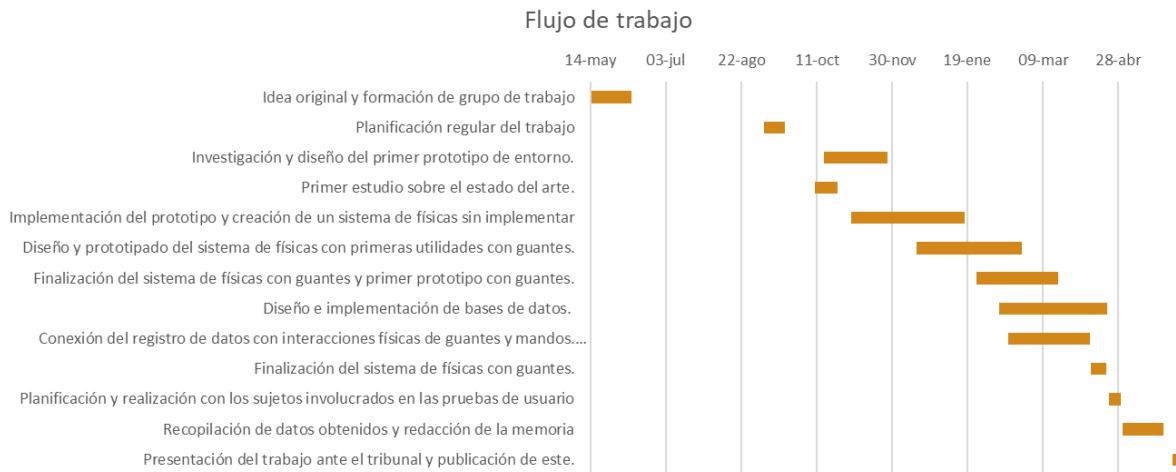


Figure 9.1: Gantt chart of the execution flow.

9.5 Document Structure

In this section, a schematic summary of the following chapters and sections of the document will be provided, offering an overview of the content and the order in which the fundamental aspects of the research will be presented.

Chapter (Capítulo 2) will conduct a state-of-the-art analysis to explore technologies that play a similar role to the one proposed in this work, besides exposing which characteristics are not fully addressed, guiding the future development of the project. This chapter investigates user experiences in this sector, such as their adaptation to virtual environments, and potential cognitive benefits.

The architecture and organization of the project are detailed in Chapter 3 (Capítulo 3). Here, the dependencies of the main project components and the class hierarchy they follow within the application framework are defined.

Chapter 4 (Capítulo 4) presents the base projects of native *Unreal Engine 5*, developed and published by the community and different companies, which have served as the basis for the development and incorporation of some functionalities into the project. Besides, it describes the elements that compose the interaction system, the implementation of object interactions, data saving, and the internal behavior of all of them.

In Chapter 5 (Capítulo 5), the evaluation of the obtained data will be broken down, as well as the method used to obtain it. The evaluation process will be included, considering the number of participating users, the experiments conducted, and their respective profiles. The results of following this evaluation process will be analyzed in this document's section.

Chapter 6 (Capítulo 6) will discuss the advantages and disadvantages based on the analyses obtained from this project. It will be contrasted with what was addressed in Section 9.2 to determine which objectives have been achieved and which ones have not been surpassed.

Chapter 10 (Capítulo 10) is the conclusion of this work, obtained through the results obtained and the resolution reached in the previous chapter. Likewise, the aspects that remain pending for future development will also be detailed.

Finally, Chapter 8 (Capítulo 8) will reflect the contributions made by the team members who have collaborated on this project.

Capítulo 10 - Conclusion and future work

The purpose of this chapter is to present the conclusions derived from this work, based on the information described up to this point. Additionally, guidelines will be established for future projects seeking to utilize and further develop this work.

10.1 Project Conclusions

The main objective of this project is focused on studying and researching the development and comparison of physical interactions between haptic gloves and native VR controllers in a simulated Unreal Engine 5 environment, with the idea of providing valuable insights into their potential advantages and disadvantages. To achieve this objective, various tools and projects related to physical and virtual interactions. The necessary software for creating VR scenarios and environments has been used for development, thus fulfilling the initial objectives centered on the design and implementation of the research project.

To rigorously evaluate the comparative study, tests have been conducted with external users, for whom the results have been analyzed and iterated upon.

After developing the test scenarios and completing all established objectives, the corresponding trials have been carried out to analyze whether the use of both devices fulfills the hypotheses outlined in Section 9.2. Thanks to the substantial number of test subjects, a sufficiently large sample has been obtained to draw a reliable conclusion about the hypotheses.

The first objective of the testing phase was to confirm whether H_1 was valid. This hypothesis states that the use of haptic gloves compared to controllers in virtual reality training environments favors better performance of acquired practices in field tests and real-life situations. In terms of time, the average time taken by users to complete both tests is remarkably similar, with the maximum time taken slightly higher for gloves than for controllers, but not significantly different. It should be clarified that according to Figura

5.10 and Figura 5.11 , actions that reward more natural interactions are better received with gloves. However, these conclusions do not fully validate the first hypothesis.

The second part of this phase was to ensure whether hypothesis H₂ is fulfilled. This hypothesis states that the overall experience users encounter in tests with gloves is less satisfactory than using controllers. Looking at the surveys conducted with the involved users, it is observed that around 85.6% showed a preference for using controllers in interactions with objects, as seen in Figura 5.11, Figura 5.12 and Figura 5.13 (84% for cubes and dosimeters and 89% for cones). Although, in the case of interactions with the environment, such as levers and doors, approximately 80% preferred the use of gloves, as it can be seen in Figura 5.10 and (87% for doors and 73% for levers), partially validating this hypothesis.

Finally, it remains to support the third hypothesis: The use of gloves by users during initial interactions is more intuitive than using controllers. Despite the previous paragraph discussing user preference for controllers in interactions with objects, users have performed much more natural actions with gloves than with controllers, such as using both hands to pick up the object or shaking hands to release objects. Taking this into account, it is considered the overall frustration caused by failures in the gloves during the test proves, the feeling is more natural, and users' experience present a more immersive situation when an interaction fails. In other words, gloves are more intuitive to use from the beginning and generate better immersion. Thus, the hypothesis is validated.

In conclusion, the work manages to fulfill the established objectives. However, the results of the evaluation process reveal that, although some data are positive and the hypotheses are partially validated, the hardware and software technology of the SenseGlove NOVA haptic gloves presents a series of difficulties when performing certain types of interactions, which can lead to unsatisfactory results in the virtual environment.

10.2 Future Work

The future work of this project is open to improvements and expansions in its functionalities, especially with the new version, SenseGlove NOVA 2.X [76], which is currently in distribution. One of the main goals is to improve comfort and satisfaction in interacting with the gloves. This would allow users and developers of future applications to implement this technology with greater flexibility and control over interactions.

A critical aspect to consider is the proper functioning of the gloves with a wide variety of hand sizes, since glove input detection is based on the tension provided by the cables. This can limit the effectiveness of interactions for smaller hands. A possible solution would be a firmware update that provides information on the tension force applied by the fingers, allowing for more precise adjustments according to user needs and the environment.

During user testing analysis, it has been observed that there are very diverse opinions about the experience with haptic gloves, as shown in Figura 5.19, Figura 5.20 and Figura 5.21. This suggests that there may be some factor influencing this experience, such as gender, hand size, previous experience with virtual reality and controllers in general, age, or education. For future studies, it would be interesting to divide users into groups according to these factors, to determine whether they really influence the experience with controllers and haptic gloves in these simulations.

Another relevant area of improvement would be to simplify the incorporation of new interactions by developers. This would be achieved by providing accessible tools and documentation that allow users to contribute their own functionalities, thus promoting diversity of elements and a more immersive experience in the environment. On the other hand, the SenseGlove extension presents certain limitations. A more accessible logic from the editor would facilitate the extension and integration of the software by developers. This would allow for a more reliable user experience, with greater feedback on interactions with gloves.

The incorporation of new elements aimed at improving the maintenance and quality of the project would imply improvements in the user interface, accessibility, and

the introduction of additional features to make the interactive environment more intuitive, efficient, and enjoyable to use. This aspect is fundamental, as these improvements would arise from the needs observed in users who have experienced the simulated environment and were not considered during the development of this project.

To summarize, all these improvements would contribute to making the use of interactions with gloves against controllers a more immersive, versatile, and intuitive option for users, facilitating the conduct of virtual reality tests and reducing the costs that such virtual environments may have on professional training. Regarding the study of the program, several additional experiments could be designed focusing specifically on different areas for a more detailed evaluation. Although these aspects may deviate from the original study, it is considered that they would add value to the outcome.

Bibliografía

- [1] PWC, «Capacitar a los colaboradores a través de Realidad Virtual,» 14 July 2023. [En línea]. Available: <https://www.pwc.com/co/es/pwc-insights/capacitar-colaboradores-realidad-virtual.html>. [Último acceso: 2024].
- [2] DiSTI, «Siemens Global Training,» 26 May 2021. [En línea]. Available: <https://disti.com/case-study/siemens-global-training/>. [Último acceso: 2024].
- [3] EBAC, «¿Qué es la realidad virtual?,» EBAC, 23 September 2023. [En línea]. Available: <https://ebac.mx/blog/realidad-virtual>. [Último acceso: 2024].
- [4] J. Perret y E. Vander Poorten, «Touching Virtual Reality: A Review of Haptic Gloves,» de *ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators*, 2018, pp. 1-5.
- [5] Y.-H. HSU, «Exploring the effect of using vibrate-type haptic glove in the VR industrial training task.,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1466238/FULLTEXT01.pdf>. [Último acceso: 2024].
- [6] M. Quest, «Página oficial de Meta Quest,» Meta, [En línea]. Available: <https://www.meta.com/es/quest/>. [Último acceso: 2024].
- [7] H. Vive, «Página oficial de Vive,» [En línea]. Available: <https://www.vive.com/eu/>. [Último acceso: 2024].
- [8] A. H. a. B. Jia, «How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives: An Overview of the Current and Potential Applications and Limitations,» 8 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9517547/>. [Último acceso: 2024].
- [9] E. Games, «Unreal Engine,» Epic Games, 2022. [En línea]. Available: <https://www2.unrealengine.com/es-ES>. [Último acceso: 2024].
- [10] Unity, «Página oficial de Unity,» [En línea]. Available: <https://unity.com/es>. [Último acceso: 2024].

- [11] Adarve, «Proyecto Adarve,» NIL research group at UCM, [En línea]. Available: <http://nil.fdi.ucm.es/?q=projects/adarve>.
- [12] C. d. S. Nuclear, «¿Qué es una emergencia radiológica?,» CSN, [En línea]. Available: <https://www.csn.es/emergencias/que-es-una-emergencia-radiologica#:~:text=Una%20emergencia%20radiol%C3%B3gica%20es%20el,poblaci%C3%B3n%20o%20el%20medio%20ambiente>. [Último acceso: 2024].
- [13] Y. G. S. L. Y. Z. W. X. J. X. Dangxiao WANG, «Haptic display for virtual reality: progress and challenges.,» April 2019. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096579619300130>. [Último acceso: 2024].
- [14] A. & B. A. & B. G. & D. P. M. & L. E. Bassanini, «Workplace Training in Europe.,» February 2007. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/5088171_Workplace_Training_in_Europe. [Último acceso: 2024].
- [15] T. N. & M. Jirina, «Overview of Controllers of User Interface for Virtual Reality.,» Julio 2022. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/360127679_Overview_of_Controllers_of_User_Interface_for_Virtual_Reality. [Último acceso: 2024].
- [16] Meta Platforms, «Meta Quest 2,» [En línea]. Available: <https://www.meta.com/es/quest/products/quest-2/>. [Último acceso: 2024].
- [17] SenseGlove, «Getting Started Guide SenseGlove Nova,» [En línea]. Available: https://www.senseglove.com/wp-content/uploads/2022/04/Nova_Manual_V0.5_BZ.pdf. [Último acceso: 2024].
- [18] SenseGlove, «Página oficial de SenseGlove,» [En línea]. Available: <https://www.senseglove.com/>.

- [19] SenseGlove, «SenseGlove for Training,» [En línea]. Available: <https://www.senseglove.com/solutions/senseglove-for-training/>. [Último acceso: 2024].
- [20] SenseCom, «Sense Glove Developer,» [En línea]. Available: <https://www.senseglove.com/developer/>.
- [21] A. Soloaga, «Unreal Engine, qué es y para qué sirve,» School, IEB, 19 July 2019. [En línea]. Available: <https://www.akademus.es/blog/emprendedores/unreal-engine-que-es-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: 2024].
- [22] Amazon Web Service, «¿Qué es una API?,» AWS, [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/api/>. [Último acceso: 2024].
- [23] Amazon Web Services, «¿Qué es un IDE?,» AWS, [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/ide/>. [Último acceso: 2024].
- [24] D. Li, «Unreal Engine Integrations Now Available in Visual Studio 2022,» Microsoft, 16 February 2023. [En línea]. Available: <https://devblogs.microsoft.com/cppblog/unreal-engine-integrations-now-available-in-visual-studio-2022/>. [Último acceso: 2024].
- [25] Github, «Acerca de GitHub y Git,» 2024. [En línea]. Available: <https://docs.github.com/es/get-started/start-your-journey/about-github-and-git>. [Último acceso: 2024].
- [26] Pivotal Tracker, «What is Pivotal Tracker?,» [En línea]. Available: <https://www.pivotaltracker.com/help/gettingstarted>. [Último acceso: 2024].
- [27] Data Base Camp, «What is a CSV file?,» 15 April 2023. [En línea]. Available: <https://databasecamp.de/en/data/csv-files>. [Último acceso: 2024].
- [28] OBS Studio, «OBS Studio,» [En línea]. Available: <https://obsproject.com/>. [Último acceso: 2024].
- [29] H. E. Lowood, «virtual reality,» 13 May 2024. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/virtual-reality>. [Último acceso: 2024].

- [30] M. I. Berkman, «History of Virtual Reality,» de *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*, Springer, 2024, pp. 873-881.
- [31] O. Bamodu y X. Ye, «Virtual reality and virtual reality system components,» *Advanced Materials Research*, vol. 765, pp. 1169,1172, 2013.
- [32] Corsair, «Hardware vs. Software: What's the Difference?,» Corsair, [En línea]. Available: <https://www.corsair.com/es/es/explorer/gamer/gaming-pcs/hardware-vs-software-whats-the-difference/>. [Último acceso: 2024].
- [33] S. Pérez, A. Muñoz, M. E. Stefanoni y D. Carbonari, «Realidad virtual, aprendizaje inmersivo y realidad aumentada:», 2021, pp. 963-968.
- [34] R. Gopel, «What is Haptics? Know about Haptics,» *Tech Generator Tools*, 2021.
- [35] R. J. Stone, «Haptic feedback: A brief history from telepresence to virtual reality,» de *International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [36] K. Salisbury, F. Conti y F. Barbagli, «Haptic rendering: introductory concepts,» *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, n° 2, pp. 24-32, 2004.
- [37] A. French y P. Torkkeli, «Mechanoreceptors,» de *Encyclopedia of Neuroscience*, Academic Press, 2009, pp. 689-695.
- [38] G. S. Giri, Y. Maddahi y K. Zareinia, «An application-based review of haptics technology,» *Robotics*, vol. 10, n° 1, 2021.
- [39] A. Michelen, «Haptics: The Future of Medicine,» *Electronics360*, 2017.
- [40] Physiopedia, «Haptics in Stroke Rehabilitation,» *Physiopedia*, s.f..
- [41] I. Bortone, M. Barsotti y D. Leonardis, «Immersive Virtual Environments and Wearable Haptic Devices in rehabilitation of children with neuromotor impairments: a single-blind randomized controlled crossover pilot study,» *J NeuroEngineering Rehabil*, vol. 17, n° 144, 2020.

- [42] Y. S. SHIN, «Stanford University x Seed: Open-Source Haptic Device for Affordable Haptics Education for All,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.seeedstudio.com/blog/2021/10/28/stanford-university-x-seeed-open-source-haptic-device-for-affordable-haptics-education-for-all/>.
- [43] Stanford, «Educational Haptics,» [En línea]. Available: <https://charm.stanford.edu/Main/EducationalHaptics>. [Último acceso: 2024].
- [44] L. Matteson, M. Jones y S. Hinojosa, «HaptX Team Final Project Report,» 2020.
- [45] A. V. Rubio, «An evaluation on the effectiveness of virtual tutorials for training emergency professionals,» December 2023. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Villar-Rubio/publication/377241460_An_evaluation_on_the_effectiveness_of_virtual_tutorials_for_training_emergency_professionals/links/659d15413c472d2e8ebfb649/An-evaluation-on-the-effectiveness-of-virtual-tut. [Último acceso: 2024].
- [46] L. P. & R. N. Micaela Maria Zucchelli, «The Fear to Move in a Crowded Environment. Poor Spatial Memory Related to Agoraphobic Disorder.,» 16 June 2021. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8235653/>. [Último acceso: 2024].
- [47] C.-S. Chan, «Virtual Reality in Architectural Design,» ResearchGate, April 1997. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/272820335_Virtual_Reality_in_Architectural_Design. [Último acceso: 2024].
- [48] E. & M. N. & S. M. & E.-S. A.-M. Ashgan, «Virtual Reality in Architecture.,» January 2023. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/366879982_Virtual_Reality_in_Architecture. [Último acceso: 2024].
- [49] M. & Z. Z. & T. Y. Zhang, «Application Research of Virtual Reality Technology in Film and Television Technology,» September 2020. [En línea]. Available:

- https://www.researchgate.net/publication/344688031_Application_Research_of_Virtual_Reality_Technology_in_Film_and_Television_Technology. [Último acceso: 2024].
- [50] D. Guttentag, «Virtual reality: Applications and implications for tourism,» October 2010. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/223816155_Virtual_reality_Applications_and_implications_for_tourism. [Último acceso: 2024].
- [51] V. & V. M. & B. F. & Š. J. & S. P. Holuša, «Virtual Reality as a Tool for Sustainable Training and Education of Employees in Industrial Enterprises,» August 2023. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/373470273_Virtual_Reality_as_a_Tool_for_Sustainable_Training_and_Education_of_Employees_in_Industrial_Enterprises. [Último acceso: 2024].
- [52] M. & A. E. Berkman, *Presence and Immersion in Virtual Reality.*, 2018.
- [53] D. C. Kerry T. Manis, «The virtual reality hardware acceptance model (VR-HAM): Extending and individuating the technology acceptance model (TAM) for virtual reality hardware,» July 2019. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0148296318304946?via%3DiHub>. [Último acceso: 2024].
- [54] L. F. & M. Ott, «A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives,» April 2015. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280566372_A_Literature_Review_on_Immersive_Virtual_Reality_in_Education_State_Of_The_Art_and_Perspectives. [Último acceso: 2024].
- [55] A. G. Peter Scarfe, «The Science Behind Virtual Reality Displays,» 5 July 2019. [En línea]. Available: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-vision-091718-014942>. [Último acceso: 2024].

- [56] N. D. Richard Held, «Telepresence, time delay, and adaptation,» Pictorial Communication in Virtual and Real Environments, 1989. [En línea]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19900013628/downloads/19900013628.pdf>. [Último acceso: 2024].
- [57] A. M. L. L. F. S. L. L. W. S. Gregory K. Tharp, «Timing considerations of helmet-mounted display performance,» 27 August 1992. [En línea]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/1666/1/Timing-considerations-of-helmet-mounted-display-performance/10.1117/12.136003.short>. [Último acceso: 2024].
- [58] R. N. & L. P. José Manuel Cimadevilla, «Application of Virtual Reality in Spatial Memory,» 23 November 2023. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10741597/#:~:text=By%20immersing%20users%20in%20realistic,with%20the%20world%20around%20them..> [Último acceso: 2024].
- [59] S. Bian, «Research on the Application of VR in Games.,» April 2023. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/369874124_Research_on_the_Application_of_VR_in_Games. [Último acceso: 2024].
- [60] G. W. & M. McGill, «Violent Video Games in Virtual Reality: Re-Evaluating the,» [En línea]. Available: https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/84502747/Wilson_McGill_CHI_PLAY_2018_Violent_video_games_in_virtual_reality_re_evaluating.pdf. [Último acceso: 2024].
- [61] J. Lanier, Dawn of the New Everything: Encounters with Reality and Virtual Reality, Henry Holt and Co, 2017.
- [62] D. Barnard, «History of VR – Timeline of Events and Tech Development,» Virtual Speech, 20 February 2023. [En línea]. Available: <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr>. [Último acceso: 2024].

- [63] Gartner, «Head-mounted Displays (HMDs),» Gartner, 2023. [En línea]. Available: [https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/head-mounted-displays-hmd#:~:text=Head-mounted%20displays%20\(HMDs\)%20are%20small%20displays%20or%20projection,on%20a%20helmet%20or%20hat..](https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/head-mounted-displays-hmd#:~:text=Head-mounted%20displays%20(HMDs)%20are%20small%20displays%20or%20projection,on%20a%20helmet%20or%20hat..) [Último acceso: 2024].
- [64] U. Garrett, «The best VR games you should be playing in 2024,» CNN, 13 February 2024. [En línea]. Available: <https://edition.cnn.com/cnn-underscored/electronics/best-vr-games>. [Último acceso: 2024].
- [65] C. Shilling, «The Evolution of Storytelling in Video Games: From Text to Virtual Reality,» Bleeding Fool, 2024. [En línea]. Available: <https://bleedingfool.com/games/the-evolution-of-storytelling-in-video-games-from-text-to-virtual-reality/>.
- [66] E. D'Armenio, «Beyond interactivity and immersion. A kinetic reconceptualization for virtual reality and video games.» December 2022. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2664329422000097#sec0007>. [Último acceso: 2024].
- [67] U-Tech Technologies, «The Future of Virtual Reality in Gaming: Trends and Predictions,» U-Tech Technologies, 2024. [En línea]. Available: <https://utech.co/blog/the-future-of-virtual-reality-in-gaming/>. [Último acceso: 2024].
- [68] SenseGlove, «E-learning Design Center – MedVR,» ELDC, [En línea]. Available: <https://www.senseglove.com/cases/e-learning-design-center-medvr/>.
- [69] SenseGlove, «Volkswagen Car Assembly Training,» [En línea]. Available: <https://www.senseglove.com/cases/volkswagen-commercial-vehicles/>.
- [70] OpenXR, Khronos Group, [En línea]. Available: <https://www.khronos.org/openxr/>. [Último acceso: 2024].
- [71] G. K. & S. S. Shiva Pedram, «Assessing the validity of VR as a training tool for medical students,» [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-023-00912-x>.

- [72] G. K. & S. S. Shiva Pedram, «Assessing the validity of VR as a training tool for medical students,» *Springer*, 12 Enero 2024.
- [73] SenseGlove, «SGBasicsDemo,» [En línea]. Available: https://dev.azure.com/SenseGlove/_git/SenseGlove-Unreal-SGBasicDemo.
- [74] Zegi, «Physical Interaction System,» Unreal Engine, 17 August 2022. [En línea]. Available: <https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/product/physical-interaction-system>. [Último acceso: 2024].
- [75] P. López, «¿Qué es un archivo CSV y para qué sirve?,» 29 June 2020. [En línea]. Available: <https://www.geeknetic.es/Archivo-CSV/que-es-y-para-que-sirve>. [Último acceso: 2024].
- [76] SenseGlove, «SenseGlove Nova 2.X,» 2024. [En línea]. Available: <https://senseglove.gitlab.io/SenseGloveDocs/nova-2.html>. [Último acceso: 2024].
- [77] Epic Games, «Types of Blueprints,» [En línea]. Available: https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/types-of-blueprints-in-unreal-engine?application_version=5.0. [Último acceso: 2024].
- [78] C. D. C. L. P. M. P. A. B. & J. M. C. Laura Tascón, «Sex Differences in Spatial Memory: Comparison of Three Tasks Using the Same Virtual Context.,» 7 June 2021. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8229883/>. [Último acceso: 2024].

Apéndice A: Diseño del plan de pruebas

OBJETIVO Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Objetivo

Evaluar la diferencia del uso de mandos frente a guantes hápticos en el sistema de físicas que se plantea.

Preguntas de investigación

- ¿El movimiento con joysticks es más intuitivo que con los guantes?
- ¿El movimiento con los guantes hápticos se integra bien, o entorpece mucho la experiencia de usuario el movimiento de teletransporte con los guantes?
- ¿Es más sencillo aprender a agarrar y soltar objetos con los botones de los mandos o con los guantes hápticos?
- ¿Mejora la experiencia general al usar guantes hápticos con respecto a los mandos?

REQUISITOS INICIALES

- Audiencia objetivo:
 - Edad: a partir de 12 años. (Recomendación de edad mínima para el uso de gafas de RV).
 - Sexo: indiferente para esta prueba.
 - Extracto sociocultural: Personas con, al menos, una educación básica, y mínimamente familiarizadas con la tecnología.
 - Nivel de experiencia con el hardware: para resultados más realistas sería necesario el mínimo de experiencia posible con el uso de gafas de realidad virtual, pero las pruebas se han hecho con cualquier experiencia con ellas. En esta prueba se va a valorar si hay diferencias entre sujetos experimentados y los que no han usado nunca la realidad virtual.
- Número de participantes: 44.

- No habrá proceso de selección, se harán las pruebas a todas las personas que se presten voluntarias para ello.
- Se realizarán dos pruebas en paralelo (unas con los guantes y otras con los mandos) para lo cual se utilizarán las gafas personales de los investigadores, el portátil que se nos ha facilitado para ello y los guantes que nos proporciona la facultad.
- Se grabará la pantalla de la prueba para posterior análisis.

DURACIÓN Y ENTORNO DE REALIZACIÓN

Las primeras pruebas se realizarán en el salón de actos el miércoles 10 de abril, a partir de las 10 de la mañana.

El resto de las pruebas se realizarán en la 3 planta de la biblioteca de la facultad de informática, y durarán entre 20 y 30 minutos por usuario.

COMPORTAMIENTO DEL INVESTIGADOR

Instrucciones generales:

- Antes de empezar la prueba se dejará claro al sujeto que no se le va a evaluar a él sino el rendimiento de este trabajo.
- Al principio de la prueba se informará al usuario del estudio que se va a realizar, que hará dos pruebas, una con mandos, y la misma con guantes, para evaluar la diferencia de interacción en cada persona.
- Se indicará un id de prueba que el usuario de pruebas pondrá al principio de ambas pruebas y el usuario pondrá en el cuestionario que rellene.
- No se contestarán preguntas durante la observación, a no ser que se vea que el sujeto de prueba está demasiado atascado.
- Los observadores se van a colocar frente al usuario a la distancia justa para no interferir en los movimientos este, fuera de la zona designada para este, delante de la pantalla del ordenador para poder ver lo que sucede en todo momento.
- Se entregará a el usuario el consentimiento informado para que lo lea y firme antes de empezar la prueba.

- Los investigadores deberán grabar la pantalla, en el video tiene que aparecer también el id de usuario y la fecha y hora de grabación.
- Primero cada usuario realizará la prueba con los mandos y después con los guantes.
- Durante la prueba se guiará al usuario.
 - Se le indicará lo que debe hacer en la primera sala:
 - Colocar todos los conos juntos en un punto concreto del escenario
 - Hacer una pirámide con los cubos
 - Separar los dispositivos blancos en dos montones según su tipo
 - Al finalizar estas tareas se indicará al usuario de pruebas que debe moverse debajo de la flecha para cambiar de sala
 - Se indicará el funcionamiento de la segunda sala:
 - Se comunicará al usuario que solo una de las puertas está abierta y que tiene que descubrir cuál es para pasar a la siguiente sala
 - Una vez pase se le dirá que debe mover las palancas que se encontrará en esta sala.
 - Se informará al usuario que va a tener que repetir este proceso durante tres pasillos más.
 - Una vez finalice la primera prueba, se le retirarán los mandos y las gafas, se informará al usuario que se va a pasar a la prueba con guantes. El investigador debe restablecer la aplicación Unreal Engine, ponerle los guantes al usuario, y calibrarlos. Una vez estén calibrados, se le pondrán las gafas y se volverá a ejecutar la prueba.
 - Una vez finalice la segunda prueba se retirarán las gafas y los guantes al usuario y se dará por finalizada la prueba.
 - Por último, se pedirá al usuario que responda a un cuestionario.

Para la prueba con mandos

- Se dejará claro al usuario que no se le va a explicar nada sobre los controles y que se le va a dejar libre en la prueba para que experimente y aprenda por su cuenta a interactuar con los mandos y el entorno.

- No se indicará al sujeto de pruebas ningún tipo de control del juego, el objetivo de esta prueba es ver si el uso de mandos es intuitivo, así que no se explicará cómo agarrar y soltar objetos ni cómo desplazarse.

Para la prueba con guantes

- Se indicará al sujeto cómo desplazarse por el escenario. Pero no se indicará como coger o soltar objetos. Además, se pedirá que no haga nada hasta que se le indique.

DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS DEL PROBADOR

Para la realización de la evaluación, se va a utilizar 2 herramientas distintas. En primer lugar, se realizará una prueba de observación, después se pedirá al sujeto de pruebas que rellene un cuestionario. Con estas dos pruebas se pretende conseguir la información necesaria para responder las preguntas de investigación y estudiar los objetivos propuestos

Herramientas utilizadas para la evaluación:

- **Observación:**

- Duración de la prueba: 20-30 minutos, hasta que acabe los dos niveles con ambos dispositivos de interacción.
- Se realizará una grabación de pantalla durante toda la prueba.
- Durante esta parte se anotarán las acciones más relevantes que se consideren que hace el usuario.

- **Cuestionario:**

Al finalizar la observación se pondrá en el ordenador que se ha utilizado el cuestionario para que lo complete en ese momento. En este se harán una serie de preguntas, primero localización, experiencia previa y nivel de estudios. Luego habrá varias secciones con preguntas de cómo ha sido el control con los mandos y con los guantes. Finalmente habrá una serie de preguntas de comparación para ver que controles prefiere el usuario para cada interacción.