

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE INFORMÁTICA



TESIS DOCTORAL

Estudio de la eficiencia de las interfaces de usuario en entornos de primera persona en realidad virtual y propuesta de mejora

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Gabriel Peñas Rodríguez

DIRIGIDA POR

Federico Peinado Gil

Nahum Álvarez Ayerza

Estudio de la Eficiencia de las Interfaces de Usuario en Entornos de Primera Persona en Realidad Virtual y Propuesta de Mejora

Gabriel Peñas Rodríguez

Doctorado en Ingeniería Informática. Facultad de Informática.
Universidad Complutense de Madrid



Tesis doctoral

01/09/2024

Directores:

Federico Peinado Gil
Nahum Álvarez Ayerza



U N I V E R S I D A D
COMPLUTENSE
M A D R I D

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS
PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

D./Dña. _____,
estudiante en el Programa de Doctorado _____,
de la Facultad de _____ de la Universidad Complutense de
Madrid, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y
titulada:

y dirigida por: _____

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Madrid, a ____ de _____ de 20__

Fdo.: _____

Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en
la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.

Agradecimientos

A todos los compañeros que me han escuchado o ayudado de alguna manera a lo largo de este camino, a todos los participantes de los experimentos por su desinteresada contribución.

Dedicatoria

Gracias a mi familia por no dejar de creer en que era capaz de alcanzar esta meta, estar ahí durante todo el proceso y no preguntar demasiado por cuánto me quedaba. A todos los que se fueron durante estos años, humanos o no, y espero volver a ver.

Resumen

En la última década hemos visto un notable crecimiento en el uso de tecnologías de Realidad Virtual tanto para entretenimiento como para ámbito profesional. El cambio de paradigma que supone el uso de este método de visualización e interacción nos invita a hacer una reflexión sobre la manera que tenemos de diseñar interfaces enfocadas en estos entornos virtuales.

Comenzaremos haciendo una revisión de conceptos que nos permitan identificar los elementos clave del diseño de interfaces de usuario en entornos virtuales 3D en primera persona. Podemos clasificar las interfaces atendiendo al nivel de integración que tienen con el propio entorno. Las diferentes alternativas que podemos implementar son: diegética, meta, espacial y no diegética.

En primer lugar vamos a analizar la eficiencia de las variantes diegética y espacial, descartando la meta por no tener lógica en primera persona, en una serie de controles básicos: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor. Con ello comprobamos la importancia de los factores humanos como la altura y los tipos de movimiento, y nos permite identificar puntos de mejora de ambas alternativas.

Con estos elementos realizamos una propuesta de interfaz de usuario que mejora la eficiencia respecto a las variantes originales, esto lo logramos haciendo ajustes atendiendo a las observaciones de la fase anterior. No solo somos capaces de mejorar la eficiencia, sino también el número de fallos gracias a un diseño sencillo y adaptable al usuario. Concluimos con unas recomendaciones para futuros diseños de interfaces de usuario en Realidad Virtual.

Palabras clave

Realidad Virtual, Interfaces de Usuario, Espacio de Trabajo, Eficiencia, Factores Humanos

Abstract

In the last decade we have seen a noticeable growth in the usage of Virtual Reality technologies, both for entertainment and professional applications. The change in design paradigm that supposes this method of visualization invites us to make a reflection about how we design interfaces focused on these virtual environments.

We are going to start doing a review of concepts that allow us to identify the key elements in user interface design for first person 3D virtual environments. We can classify the interfaces according to the level of integration they have with the environment itself. The different alternatives we can implement are diegetic, meta, spatial, and non-diegetic; though we can discard the last one because of technical limitations.

In a first phase we are going to analyze the efficiency of diegetic and spacial variants, discarding the meta for its absence of logic in first person, in a series of basic controls: button, gearbox, dial, slider and switch. With it, we probe the importance of human factors as height and movement restrictions, and allows us to identify improvements in both alternatives.

With those elements we develop a new user interface that delivers greater efficiency compared to the original variants, this is achieved doing adjustments focused on the advantages and disadvantages observed during the previous phase. Not only we are able to improve efficiency but the slips rate thanks to a simple design that adapts to the user. We conclude with some guidelines for future design of user interfaces in Virtual Reality.

Keywords

Virtual Reality, User Interfaces, Workspace, Efficiency, Human Factors

Índice

Resumen	I
Abstract	III
Índice	V
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XI
1. Introducción	1
2. Estado de la cuestión	5
2.1. Entornos virtuales	5
2.1.1. Presencia e inmersión	5
2.1.2. Realidades Digitales	8
2.1.3. Realidades digitales, inmersión y neurociencia	12
2.2. Realidad Virtual	13
2.2.1. Evolución de la Realidad Virtual	13
2.2.2. Dispositivos de Realidad Virtual	20
2.3. Interfaces de usuario	25
2.3.1. Interfaces en entornos virtuales	26
2.3.2. Antropometría y espacios de trabajo	29
2.3.3. Realidad Virtual e interfaces de usuario	33
3. Investigaciones iniciales	41

4. Hipótesis y metodología	47
4.1. Hipótesis y objetivos	47
4.2. Metodología	48
5. Primera fase: Estudio de las interfaces actuales	51
5.1. Diseño	52
5.1.1. Controles diegéticos	55
5.1.2. Controles espaciales	57
5.1.3. Flujo del experimento	59
5.2. Desarrollo	61
5.2.1. Arquitectura	62
5.2.2. Realización de las pruebas	66
5.3. Análisis de resultados	68
5.3.1. Interacción diegética	71
5.3.2. Interacción espacial	72
5.3.3. Análisis descriptivo de los controles	72
5.4. Discusión	78
6. Segunda fase: Propuesta de interfaz mixta	81
6.1. Diseño	81
6.1.1. Controles mixtos	82
6.2. Desarrollo	84
6.2.1. Flujo del experimento	85
6.2.2. Arquitectura	85
6.2.3. Realización de las pruebas	86
6.3. Análisis de resultados	88
6.3.1. Contraste con la primera fase	89
6.3.2. Contraste Diegética-Mixta	90

6.3.3. Contraste Espacial-Mixta	91
6.3.4. Análisis descriptivo de los controles	92
6.4. Recomendaciones para el diseño de interfaces en VR	98
6.5. Discusión	100
7. Conclusiones y trabajo futuro	103
Referencias	107
A. Glosario	123
B. Datos de la primera fase	127
C. Datos de la segunda fase	131
D. Ejemplos de interfaces	133
E. Figuras ampliadas de la arquitectura	137
F. Figuras adicionales del análisis	143
G. Documentación para las pruebas	147
H. Contribuciones	149
H.1. Congreso ACE 2017	149
H.2. Poster 11th World Congress of Neuroscience	149
H.3. Artículo en Neuroscience	150

Índice de tablas

4.1. Diseño muestral segmentado por sexo y propuesta.	49
5.1. Matriz del Coeficiente de correlación de Pearson entre controles. Nota: *p <0,05. **p <0,01.	68
5.2. Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control.	69
5.3. Prueba de muestras independientes por sexo. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia.	69
5.4. Datos de muestra, medias y desviación típica por variante y control.	70
5.5. Prueba de muestras independientes por variante. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia.	70
5.6. Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control diegético. . .	71
5.7. Prueba de muestras independientes diegética. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia.	71
5.8. Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control espacial. . .	72
5.9. Prueba de muestras independientes espacial. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia.	72
6.1. Gestos de cada tipo de interacción para los controles mixtos. Fuente: Propia	84
6.2. Matriz del Coeficiente de correlación de Pearson entre controles. Nota: *p <0,05. **p <0,01. Fuente: Propia	88
6.3. Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control.	89
6.4. Prueba de muestras independientes por sexo. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia. Fuente: Propia	90
6.5. Prueba ANOVA entre todas las variantes. Fuente: Propia	90

6.6. Datos de muestra, medias y desviación típica para variantes diegética y mixta.	91
6.7. Prueba de muestras independientes para variantes diegética y mixta. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia. Fuente: Propia	91
6.8. Datos de muestra, medias y desviación típica para variantes espacial y mixta.	92
6.9. Prueba de muestras independientes para variantes espacial y mixta. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia. Fuente: Propia	92
B.1. Resultados prueba espacial. n = 41	127
B.2. Resultados prueba diegética. n = 33	128
C.1. Resultados propuesta. n = 52	131

Índice de figuras

2.1. Continuo de la virtualidad	10
2.2. Cartel promocional de Sensorama	15
2.3. Diagrama de la patente del Telesphere Mask	16
2.4. Aspecto del visor para Sword of Damocles	16
2.5. Demostración del EyePhone y DataGlove	17
2.6. Recreativas en VR	18
2.7. Artículo sobre Sega VR	18
2.8. Cartel promocional de Virtual Boy	19
2.9. Visor y controladores del Meta Quest 2.	21
2.10. Visor y controladores del Meta Quest Pro.	22
2.11. Visor y controladores del Pico 4.	23
2.12. Visor Apple Vision Pro.	23
2.13. Ejemplo de interfaces diegéticas.	26
2.14. Ejemplo de interfaces meta.	27
2.15. Ejemplo de interfaces espaciales.	28
2.16. Ejemplo de interfaces no diegéticas.	28
2.17. Medidas del usuario.	32
2.18. Interfaz de menú de Beat Saber.	38
2.19. Captura de pantalla de Vacation Simulator.	39
3.1. Entorno 3D con una pequeña isla, un barco encallado y un NPC.	42
3.2. Mujer con dispositivo VR.	43
3.3. Sujeto en el experimento y vistas del entorno 3D.	45

4.1. Controladores del Meta Quest 2.	50
5.1. Vista del entorno digital de los experimentos.	53
5.2. De izquierda a derecha, vistas lateral y superior del alcance para el percentil 95 % masculino y el 5 % femenino.	56
5.3. De izquierda a derecha, vistas de los controles diegéticos: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor.	57
5.4. De izquierda a derecha, vistas de los controles espaciales: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor.	59
5.5. Diagrama de flujo de la aplicación en la primera fase.	60
5.6. Diagrama de clases relativo a la gestión de las pruebas.	64
5.7. Diagrama de clases de la jerarquía de controles.	64
5.8. Diagrama de clases de controlador con interactuables.	65
5.9. Diagrama de clases de controlador con interactuables.	67
5.10. Diagrama de caja de los tiempos del botón.	73
5.11. Diagrama de caja de los fallos del botón.	73
5.12. Diagrama de caja de los tiempos de la palanca.	74
5.13. Diagrama de caja de los fallos del palanca.	74
5.14. Diagrama de caja de los tiempos del dial.	75
5.15. Diagrama de caja de los fallos del dial.	75
5.16. Diagrama de caja de los tiempos del deslizador.	76
5.17. Diagrama de caja de los fallos del deslizador.	76
5.18. Diagrama de caja de los tiempos del interruptor.	77
5.19. Diagrama de caja de los fallos del interruptor.	77
6.1. Vistas del modelo de manos.	82
6.2. De izquierda a derecha, vistas de los controles mixtos: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor.	83

6.3.	Diagrama de flujo de la aplicación en la segunda fase. Fuente: Propia	85
6.4.	Paneles del tutorial de gestos.	86
6.5.	Diagrama de clases de la jerarquía de controles de la nueva propuesta.	87
6.6.	Diagrama de caja de los tiempos del botón.	93
6.7.	Diagrama de caja de los fallos del botón.	93
6.8.	Diagrama de caja de los tiempos de la palanca.	94
6.9.	Diagrama de caja de los fallos del palanca.	94
6.10.	Diagrama de caja de los tiempos del dial.	95
6.11.	Diagrama de caja de los fallos del dial.	95
6.12.	Diagrama de caja de los tiempos del deslizador.	96
6.13.	Diagrama de caja de los fallos del deslizador.	96
6.14.	Diagrama de caja de los tiempos del interruptor.	97
6.15.	Diagrama de caja de los fallos del interruptor.	97
D.1.	Interfaz diegética en Dead Space 3.	133
D.2.	Interfaz meta en Watchdogs 2.	134
D.3.	Interfaz espacial y no diegética en League of Legends.	134
D.4.	Interfaz no diegética en Lost Ark.	135
D.5.	Interfaz diegética en Job Simulator.	135
D.6.	Interfaz espacial en Half-Life: Alyx.	136
D.7.	Interfaz diegética en Half-Life: Alyx.	136
E.1.	Diagrama de flujo de la aplicación en la primera fase.	138
E.2.	Diagrama de clases relativo a la gestión de las pruebas.	139
E.3.	Diagrama de clases de la jerarquía de controles.	140
E.4.	Diagrama de clases de controlador con interactuables.	141
E.5.	Diagrama de flujo de la aplicación en la segunda fase.	141
E.6.	Diagrama de clases de la jerarquía de controles de la nueva propuesta.	142

F.1. Matriz con diagramas de dispersión para cada combinación de control en la primera fase.	144
F.2. Matriz con diagramas de dispersión para cada combinación de control en la segunda fase.	145

Capítulo 1

Introducción

Desde el lanzamiento del *HTC Vive* ([HTC, 2016](#)) y *Oculus Rift* ([Meta, 2016](#)) en 2016 hemos podido probar de primera mano las capacidades e interacciones posibles de una nueva generación de dispositivos de Realidad Virtual, siendo accesibles a un consumidor general gracias a su coste inferior a 800€. Tras ello, durante la última década hemos observado un notable crecimiento de este mercado ([Statista, 2022](#)) y, aunque esta tecnología no es de origen reciente ([Muñoz-Saavedra et al., 2020](#)), los últimos avances en sus características han permitido que sean capaces de proporcionarnos un mayor nivel de inmersión ([Bowman y McMahan, 2007](#)).

Como usuarios del medio desde el inicio de esta generación, hemos sido testigos de las distintas aplicaciones que se han desarrollado, así como de los distintos periféricos y accesorios que pretenden hacer de su uso una experiencia más completa. Dentro de todos los aspectos a considerar, nos ha llamado la atención el desarrollo de las interfaces de usuario, ya que hemos observado dos posicionamientos marcados: un primero opta por crear interfaces integradas dentro del mundo digital en el que se desarrollan y otras se limitan a trasladar las interfaces clásicas 2D proyectándolas en el espacio 3D.

La elección de un paradigma de interfaz no es casual ya que este habilita un diseño e interacciones que atienden a la experiencia de usuario que el diseñador pretende alcanzar ([Bollini, 2017](#)). Pero en nuestro caso hay otros elementos para tener en cuenta: estos dispositivos hacen uso de controladores que requieren que el usuario haga otros movimientos con

el cuerpo diferentes a la interacción con los periféricos como el teclado y ratón que encontramos de manera habitual. Este tipo de acciones requieren que tengamos en cuenta aspectos de ergonomía no sólo en los controles sino también en el entorno digital, para que tengan en cuenta los factores humanos de la interacción que aseguren el bienestar de los usuarios y proporcionen un rendimiento adecuado en la realización de tareas ([Wilson, 2000](#)).

Esto nos ha generado la pregunta que intentaremos responder en este trabajo, a saber: si la elección de un tipo de interfaz se encuentra marcado por la eficiencia de esta, definida como la rapidez con la que el usuario puede completar una tarea ([Interaction Design Foundation, 2020](#)), o puede ignorar este factor ciñéndose al diseño y la estética de esta ([Hallnäs y Redström, 2002](#)).

Dependiendo de los resultados de nuestro estudio, los futuros desarrolladores pueden considerarlos a la hora de decidir el diseño de su interfaz para entornos en Realidad Virtual. Por tanto, vamos a hipotetizar que las interfaces actuales no son más eficientes por sí mismas, pero podemos crear una variante que sí lo sea. Para ello vamos a estudiar el tiempo que tardan los usuarios en completar unas tareas como variable dependiente, junto con los fallos cometidos, el sexo y la altura como posibles variables independientes; estos dos últimos con la intención de comprobar si las diferencias antropométricas afectan al rendimiento. Pretendemos, con este trabajo, no solo contestar a esta pregunta sino recopilar un conjunto de buenas prácticas que permitan diseñar mejores interfaces de usuario en Realidad Virtual.

En este documento seguiremos una estructura organizada siguiendo el flujo de trabajo que nos permita alcanzar nuestros objetivos. En primer lugar ([Capítulo 2](#)) haremos una revisión bibliográfica que establezca los conceptos fundamentales del objeto de estudio, seguido por un análisis de los dispositivos existentes para determinar qué requisitos tienen y qué interacciones nos habilitan, para luego pasar a analizar trabajos que relacionen Realidad Virtual e interfaces de usuario. Esto nos permitirá formular unas hipótesis y objetivos ([Capítulo 4](#)), y determinar una metodología apropiada. Posteriormente explicaremos las investigaciones iniciales ([Capítulo 3](#)) que nos han permitido conocer el medio en profundidad

a través de la experimentación en distintos proyectos. Con ello hemos desarrollado unos experimentos (Capítulo 5) con las interfaces de usuario aplicables a entornos en Realidad Virtual en primera persona y así detectar problemas o elementos de mejora. Acto seguido desarrollamos nuestra propuesta de interfaz (Capítulo 6) atendiendo a todas las peculiaridades encontradas en la fase anterior. Con todo lo aprendido hasta el momento, realizaremos una serie de recomendaciones para el diseño de interfaces de usuario en Realidad Virtual (Capítulo 6.4). Por último, haremos una discusión de todo el trabajo realizado (Capítulo 7) donde extraeremos unas conclusiones y propondremos trabajo a futuro que se puede desarrollar gracias a los avances de nuestra investigación.

Capítulo 2

Estado de la cuestión

Para poder determinar las especificaciones de nuestra propuesta, primero debemos comprender las características que definen los entornos virtuales en las que se van a desarrollar. Igualmente es necesaria una percepción del origen y evolución de estos entornos y los dispositivos asociados, identificando las interacciones que nos permiten realizar y cómo. Al tratarse de interacción hombre-máquina, también debemos hacer una revisión de los factores humanos que determinan los diseños. Con todo esto podremos analizar cómo se realizan las interfaces de usuario para estos entornos y así poder replicarlas posteriormente en nuestros experimentos.

2.1. Entornos virtuales

En primer lugar vamos a introducir los conceptos principales que debemos tener en cuenta en la construcción de los entornos digitales para posteriormente hacer un listado de los diferentes tipos de entornos, explicando su origen y cuáles son las características que unen y diferencian a cada uno.

2.1.1. Presencia e inmersión

Antes de poder trasladar a los usuarios a un entorno digital y que realice aquellas interacciones que hemos diseñado, debemos comprender una serie de conceptos clave que van a determinar el proceso.

El primero de ellos es la *presencia*. Se trata de un concepto que hace referencia al sentido de percibir que nos encontramos en un determinado tiempo y espacio, aunque en entornos virtuales podemos entenderlo como la “sensación de estar ahí” (Barfield y III, 1995). De este término podemos encontrar otros asociados (Sheridan, 1992) como *Telepresencia*, en referencia a que el usuario se siente físicamente en un lugar remoto, o *Presencia Virtual*, definida como la inclusión del usuario dentro del entorno digital.

Por otra parte tenemos el concepto *inmersión* que podemos definir como “un estado de profunda implicación mental en el que el sujeto puede experimentar una disociación de la conciencia del mundo físico debido a un cambio en su estado de atención” (Agrawal et al., 2020). Está estrechamente relacionado con la presencia y es que requiere de esta para conseguir que el usuario no solo se sienta ahí, sino que descarte otros estímulos externos (Deborah.L, 2002). Esta complicidad con el usuario requiere que se cubran unas necesidades tecnológicas mínimas al igual que en el diseño del entorno digital donde tenga lugar la experiencia.

Encontramos también ejemplos de otros autores que han explorado este campo buscando qué elementos son necesarios para proporcionar esa sensación (Berkman y Akan, 2024; Slater y Wilbur, 1997). Podemos comprobar cómo unas características tecnológicas adecuadas son necesarias para permitir crear un entorno digital creíble y alcanzar un mayor nivel de presencia. También influyen otros elementos como una correcta representación de la presencia del usuario y la autonomía que le proporcionamos. Todo esto nos permite conseguir que el usuario alcance altos niveles de interacción.

En nuestro estudio también es importante que consideremos las implicaciones que tiene la inmersión ya que un aumento en esta sensación de presencia tiene un impacto en el rendimiento de los usuarios (Nash et al., 2000). Esto se debe a que todos estos conceptos son clave en la generación de la experiencia en entornos virtuales, por tanto, debemos tenerlos en cuenta a la hora de especificar nuestro diseño pues pueden influir en nuestros resultados.

Igualmente es necesario dejar claras las variables (el alcance de la información sensorial, el control de la relación entre los sensores y el entorno y la habilidad de modificar el entorno) que pueden determinar el grado de presencia que tenemos dentro de un entorno virtual usando mediciones físicas y evaluando su impacto en el rendimiento ([Sheridan, 1992](#)). Con esto podemos definir las propiedades ideales de la interacción con la interfaz.

La sensación de inmersión es intrínsecamente humana y, aunque hay factores físicos que la afectan, acaba recayendo sobre los usuarios finales, por eso también es necesario considerar estos factores y realizar mediciones a través de encuestas a los participantes para comprender adecuadamente cómo es su relación con el entorno digital ([Witmer y Singer, 1998](#)).

En otro estudio ([Lombard et al., 2009](#)) podemos volver a comprobar la importancia de considerar tanto las mediciones fisiológicas (conductividad de la piel, presión sanguínea, pulsaciones...) como los datos cualitativos de carácter subjetivo y así ver en detalle los distintos aspectos que pueden influir en la inmersión según el tipo de presencia (espacial, social-actor, pasiva-social, activa-social, compromiso, riqueza social, realismo social, realismo perpetuo) que queramos transmitir y el entorno donde se desarrolle.

Otros autores han buscado medir la presencia social en las interacciones en entornos virtuales con múltiples usuarios ([Biocca et al., 2003](#)), no será nuestro caso, pero si la interfaz tuviera lugar en un entorno compartido podría tener implicaciones añadidas. Aunque nuestro estudio no se centra en estos aspectos, nos demuestra la importancia que tienen estos principios en el diseño de los entornos virtuales.

En un estudio que realizamos al comienzo de esta tesis ([Peñas y Peinado, 2018](#)) fuimos testigos del impacto que tiene un entorno adecuado y el diseño de sus interacciones. El uso de dispositivos de VR nos permite recibir más información sobre la posición de las manos y cabeza del usuario, permitiendo una mejor representación de este en el entorno digital, generando una mayor sensación de presencia como hemos visto anteriormente y permitiéndonos crear nuevos tipos de interacción y experiencias (ver Anexo [H.1](#)).

La importancia de estos conceptos en distintos medios aún es estudiada recientemente (Nilsson et al., 2016), siendo especialmente relevante en medios interactivos como es el caso de los videojuegos (Brown y Cairns, 2004). Nuestro estudio beneficia a este área gracias al diseño genérico de nuestra aportación al campo de las interfaces de usuario.

2.1.2. Realidades Digitales

Nuestro estudio se va a centrar en interfaces de usuario ubicadas en *entornos virtuales* (VEs, por sus siglas en inglés). Este es el término que se utiliza de manera estandarizada para distinguirlo del mundo físico; la virtualidad no implica que lo que sucede no sea real, solo que el medio es digital. Las experiencias que vivimos en estos entornos trascienden a la existencia efímera de los mismos, ya que nos transforman y, por tanto, se convierten en algo real. Para ellos nos basamos en la evidencia científica demostrada por otros autores (Chirico y Gaggioli, 2019; Gaggioli, 2012; Lavoie et al., 2021; Markham, 1998; Trabelsi-Zoghalmi y Touzani, 2019), así como por trabajos que hemos realizado durante el desarrollo de esta tesis como veremos más adelante (Moreno-Fernández et al., 2023a,b).

En primer lugar tenemos que definir adecuadamente una serie de términos relevantes y así poder comprender adecuadamente qué características los definen y determinarán nuestro objeto de estudio. Vamos a realizar una clasificación atendiendo a la principal diferencia entre ellos: cómo se interrelacionan estos mundos digitales con el mundo físico o, visto desde el punto de vista contrario, en qué grado sustituye el mundo digital al físico.

Cuando desarrollamos un entorno digital, es importante que tengamos en consideración la sensación de presencia que proporciona al usuario. Dependiendo de la profundidad que alcance esta presencia y la riqueza de las interacciones que pueda realizar el usuario, conseguiremos un mayor o menor nivel de inmersión (Agrawal et al., 2020). Este concepto es muy importante ya que implica que el entorno sea creíble para el usuario y nos permite tener un cierto nivel de complicidad, de tal manera que los desarrolladores nos podemos tomar algunas libertades en el diseño del mundo digital, tanto en los elementos mecánicos,

estéticos y dinámicos (Hunicke et al., 2004). De esta manera podemos alcanzar nuestros objetivos propuestos en la aplicación y que el usuario no ponga en duda la veracidad de lo que experimenta por falta de coherencia con lo que él espera del entorno. Es muy importante que mantengamos un alto nivel de presencia, no solo aumentamos la credibilidad del usuario sino que nos permite que este tenga mayor concentración y sea más susceptible a cumplir nuestros objetivos. En el campo de los videojuegos, también aplicable a otros, encontramos el concepto de *flujo* que hace referencia a este estado mental (Csikszentmihalyi, 1990). Proporcionando mayor inmersión es más fácil alcanzar ese estado óptimo de concentración.

Para mantener un alto nivel de presencia necesitamos que tanto la parte tecnológica como el entorno mantengan unos mínimos técnicos y de coherencia. Los dispositivos que usemos deben responder de una manera fiel y fluida a las órdenes de los usuarios, no solo para mantener la inmersión sino para evitar problemas serios como es la *cinetosis* (*Motion Sickness* o *Simulation Sickness* en inglés) (Smyth et al., 2018). Esto se refiere a la disociación y malestar físico generado por la falta de sincronía entre los movimientos interpretados por el usuario y los ejecutados por la simulación. La importancia de esta condición ha hecho que se haya desarrollado un formulario para medir la afección (Kim et al., 2018). Igualmente podemos encontrar estudios que intentan medirla de manera empírica para identificar los generadores y así aliviar los síntomas (Chattha et al., 2020). Afortunadamente, los dispositivos actuales son capaces de ofrecer un gran nivel de inmersión, reduciendo las posibilidades de padecer esta situación (Berkman y Akan, 2024; Bowman y McMahan, 2007).

Actualmente podemos considerar una clasificación de estas realidades digitales atendiendo a su nivel de inmersión y cómo se relacionan con la realidad física (Milgram et al., 1995; Skarbez et al., 2021) como podemos ver en la Figura 2.1.

Realidad Virtual

En primer lugar, vamos a hablar del término relativo a nuestro objeto de estudio, la *Realidad Virtual* (VR, por sus siglas en inglés). La primera mención al término fue en la obra de ciencia ficción *The Judas Mandala* (Broderick, 1982); posteriormente, en 1987, de la

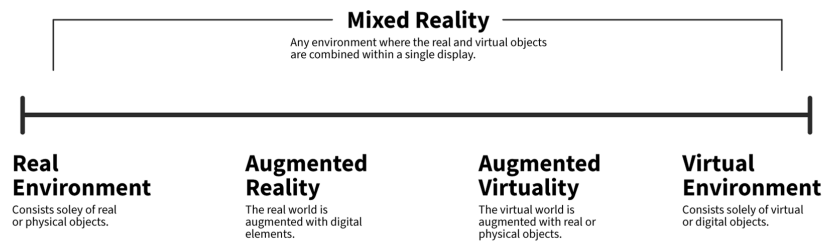


Figura 2.1: Continuo de la virtualidad. Fuente: Interaction Design Foundation (2022)

mano de Jaron Lanier (2001) la encontramos en el ámbito tecnológico. En esta alternativa trasladamos de manera completa al usuario dentro del mundo digital. Esto implica que sustituimos todos los sentidos posibles, principalmente visión y oído; y, de modo parcial, otros sentidos según nos permitan los dispositivos disponibles, como podría ser el tacto. Un ejemplo básico sería representar el mundo virtual en un monitor, cosa que puede trasladarse a usar visores específicos de esta tecnología.

Su principal limitación es la complejidad de proporcionar estímulos convincentes para ciertos sentidos, debido a falta de avances tecnológicos o porque las soluciones disponibles no proporcionan una experiencia de usuario adecuada y creíble. Un reflejo claro de ello es en el caso de la locomoción, si el usuario se desplaza en el mundo digital y esto se refleja en el físico puede salirse de la zona que hayamos definido como segura para evitar accidentes; si, por el contrario, solo lo hace en el mundo digital puede traducirse en casos de cinetosis o pérdida de inmersión según la solución adoptada.

Realidad Aumentada

A continuación, podemos encontrar la definición de *Realidad Aumentada* (AR, por sus siglas en inglés). Aquí superponemos información digital sobre el mundo físico de tal manera que complementamos a este último. Los dispositivos que proporcionan esta tecnología disponen de cámaras y sensores para captar el mundo físico y luego, mediante procesamiento

de la información y gracias a algún tipo de pantalla o visor, muestran información superpuesta. Esto es posible realizarlo con un teléfono inteligente o incluso con gafas específicas para ello. En origen, este término y sus características fueron acuñados por Thomas Caudell, un investigador de la empresa aeronáutica Boeing, en 1992 ([Caudell y Mizell, 1992](#)).

Podemos encontrar ejemplos de este uso en aplicaciones para teléfonos inteligentes. Basta con el uso de la cámara para detectar marcadores que permitan al dispositivo reconocer su entorno o incluso el uso de sensores como geolocalización, acelerómetro y giróscopo. Otro ejemplo de uso son las pantallas que disponen algunos coches en el parabrisas y que muestran información tanto del vehículo como indicaciones y señales de tráfico detectadas, todo esto manteniendo la transparencia del cristal donde se proyectan.

Realidad Mixta

En caso de querer llegar a un mayor alcance podemos combinar las dos anteriores con lo que tendríamos la *Realidad Mixta* (MR, por sus siglas en inglés). Esto nos permite que tanto el mundo digital como el físico tengan interrelación y estén conectados el uno con el otro. Requiere una combinación de tecnologías tanto para obtener información adicional del mundo físico como para hacer que este reaccione al mundo digital.

Esto requiere que el mundo físico disponga de dispositivos adicionales con los que el mundo digital pueda comunicarse y generar cambios. Como podrían ser microcontroladores que enciendan y apaguen luces o servomotores u otros actuadores que muevan mecanismos u objetos.

Realidad Extendida

Por último, vamos a introducir el término *Realidad Extendida* (XR, por sus siglas en inglés) ([Stanney et al., 2021](#)). No es una tecnología en sí misma como los anteriores, este se refiere a cualquier tecnología digital que nos permita aumentar las capacidades de la realidad física, ya sea mediante interacción o información, y engloba de manera general a los términos anteriores. Prueba de ello es que el significado de la X en las siglas se usaba a

modo de comodín dado que la R es común en los otros términos, posteriormente evolucionó al significado actual.

2.1.3. Realidades digitales, inmersión y neurociencia

El uso de estos entornos virtuales permite realizar experimentos aplicados directamente al campo de la psicología, ya que permiten simular situaciones difíciles de replicar usando los métodos previos (Loomis et al., 1999), lo que aumenta las posibilidades de investigación en dicho ámbito. Gracias al uso de estas herramientas se pueden solucionar algunos de los problemas presentes en la metodología tradicional (Blascovich et al., 2002). Y, al igual que hemos podido observar con la presencia, también encontramos autores que intentan establecer una manera de medir la inmersión (Jennett et al., 2008; Slater et al., 2009) como un elemento psicológico importante para los estudios.

Esta implicación, como otros progresos tecnológicos, también se ha visto reflejada en la cultura popular. En la película *eXistenZ* (Cronenberg, 1999) se nos plantea una Realidad Virtual donde los protagonistas participan en la prueba de un juego que incrusta de manera automática elementos del subconsciente de los participantes, haciendo continuas referencias a que esta virtualidad y el espacio físico son indistinguibles, y que la existencia es en sí misma un juego al que damos forma y nos transforma.

Podemos encontrar el testimonio del psicólogo Brennan Spiegel (2020) que menciona la oportunidad única que permiten las interacciones en entornos virtuales para que los pacientes participen de manera activa en su proceso terapéutico gracias a las acciones físicas y emocionales que tienen lugar dentro del mundo digital. Podemos encontrar un ejemplo en el uso de VR para la terapia cognitiva en pacientes que han sufrido infarto cerebral (Wiley et al., 2022), donde destacan la satisfacción del paciente, la rápida respuesta y capacidad de ajustes en tiempo real.

Gracias a la capacidad de inmersión de los entornos virtuales, especialmente en videojuegos, podemos conseguir que los usuarios sientan un compromiso personal (McMahan, 2004).

Todos estos elementos acaban asociándose con una respuesta biológica y neuronal ([Michailidis et al., 2018](#)) que demuestran su validez como herramienta y recalcan la importancia de considerar todos estos aspectos en el diseño de las experiencias.

Este alcance permite que el uso de entornos virtuales sea un método viable para la detección y terapia de distintas dolencias ([Riva et al., 1998](#)). Esto es posible gracias al impacto que tienen estos entornos en las habilidades cognitivas y funcionales de los usuarios ([Riva, 1998](#)).

Como caso particular, la VR ha sido considerada para estas aplicaciones desde que los avances tecnológicos han permitido su aplicación ([Tarr y Warren, 2002](#)). Especialmente importante por su validez metodológica y los beneficios que aporta su aplicación, además de ser una tecnología no invasiva que cada vez es más robusta y fácil de utilizar ([Bohil et al., 2011](#)).

Los estudios en este campo también destacan la importancia de una correcta representación del usuario y cómo disponemos de la posibilidad de alterar el modelo cognitivo que tiene de la realidad ([Riva et al., 2019](#)). Todos estos aspectos refuerzan la validez de la VR como instrumento experimental y su capacidad para mantener el control de la experiencia proporcionando interacciones y estímulos que generen la respuesta deseada en el diseño ([Parsons, 2015](#)).

En nuestro estudio ([Moreno-Fernández et al., 2023a](#)) hemos comprobado el alcance de la inmersión en VR analizando el comportamiento de jóvenes con historial de abuso de sustancias (ver Anexo [H.2](#)).

2.2. Realidad Virtual

2.2.1. Evolución de la Realidad Virtual

Si bien hemos visto un desarrollo notable en los últimos años, así como un considerable crecimiento ([Statista, 2022](#)), la tecnología de VR ha ido evolucionando desde mediados del siglo XX. Como muchas otras tecnologías, los principios que rigen la VR han sido imaginados

a través de la literatura de ciencia ficción. La primera mención a un dispositivo parecido la podemos hallar en el libro *Pygmalion's Spectacles* (Weinbaum, 1935), donde se mencionan unas gafas sobre las cuales encontramos la siguiente descripción:

“[...] una película que da visión y sonido [...] gusto, olfato e, incluso, tacto. [...] Estás en la historia, hablas a las sombras (personajes) y ellos te responden; y, en lugar de estar en una pantalla, la historia es sobre ti, y tú estás en ella.”

Como podemos comprobar, los detalles que aporta son incluso más avanzados de lo que hacen los principales dispositivos comerciales actuales ya que los sentidos como sabor y olfato sólo son cubiertos por algunos aparatos de corte experimental. Si bien podemos apreciar la necesidad de representación del usuario y de las características de los entornos virtuales, abarcando incluso la vertiente narrativa de los mismos. Conceptos que, como veremos más adelante, tienen mucha importancia en el desarrollo de aplicaciones que tienen lugar en entornos virtuales.

Aunque esta referencia nos parezca bastante adelantada a su tiempo, la primera representación de mundos artificiales la podemos encontrar un par de años antes dentro de la obra *The Man Who Awoke* que se publicó por partes en una revista y años más tarde se recopiló en un libro (Manning, 1975) donde se describe un futuro en el que, mediante tecnología, la gente puede programar sus sueños y vivir en ellos. Podemos encontrar otros ejemplos de esta relación entre la ficción y el desarrollo de esta tecnología en otras obras literarias más recientes, así medios audiovisuales, un claro ejemplo de esto último es *The Matrix* (Wachowski y Wachowski, 1999). Incluso un término que hemos visto alcanzar popularidad en las etapas finales del estudio, como es el *metaverso* tiene sus orígenes en otra obra de ficción llamada *Snow Crash* (Stephenson, 1992).

Nos parece relevante esta conexión con la ficción porque muestra que estos avances tecnológicos no han partido de intentar resolver una necesidad o problema existente, como sucede con otras aplicaciones de la ingeniería, sino que surgen de las visiones acumuladas

por múltiples individuos, los sueños que han proyectado y cómo han influido en su desarrollo posterior, marcando la prioridades y objetivos a alcanzar.

Si bien es en la última década cuando ha alcanzado popularidad, no es una tecnología nueva y viene evolucionando desde mediados del siglo XX (Muñoz-Saavedra et al., 2020). En los años 50, Morton Heilig publicó un ensayo sobre la necesidad de aumentar la inmersión de los espectadores de cine. Posteriormente desarrolló el dispositivo *Sensorama* (Ver Figura 2.2) que permitía visualizar de manera estereoscópica una película, aportando incluso aromas y ventiladores para aumentar la sensación. En este caso era una estructura fija en la que los espectadores tomaban asiento e impedía ver el exterior.

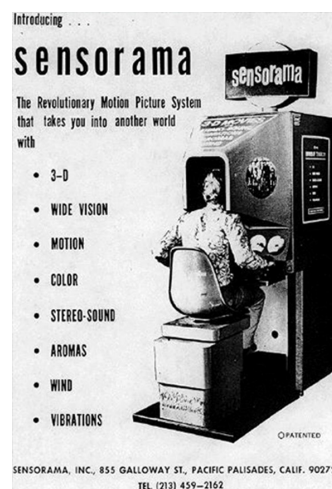


Figura 2.2: Cartel promocional de Sensorama. Fuente: Sensorama Inc.

Unos años más tarde, en 1960, también Morton Heilig (Heilig, 1957), patentó el primer dispositivo que podemos considerar como un visor para VR propiamente dicho. Lo bautizó con el nombre *Telesphere Mask* (Ver Figura 2.3). Y, aunque no llegó a tener implantación real, nos permite ver cómo se asientan los principios de diseño que siguen compartiendo los dispositivos actuales.

En 1965, Ivan Sutherland describió el dispositivo *Ultimate Display*. Consistía en un visor que mostraba una simulación hecha por computador. También incluía respuesta háptica para simular el tacto. Los usuarios podían interactuar con objetos del mundo virtual. Unos

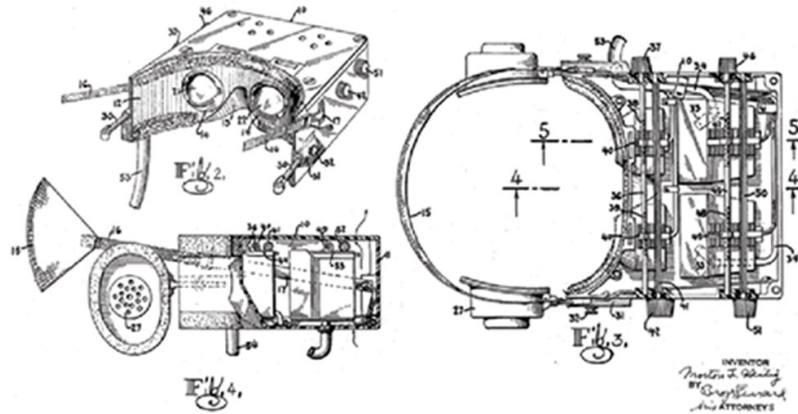


Figura 2.3: Diagrama de la patente del Telesphere Mask. Fuente: Heilig

años más tarde, en 1968, también Ivan Sutherland, pero esta vez junto con su estudiante Bob Sproull, desarrollaron *Sword of Damocles* (Ver Figura 2.4); otro dispositivo que experimentaba tanto con AR como VR con gráficos vectoriales generados mediante computador.



Figura 2.4: Aspecto del visor para *Sword of Damocles*. Fuente: Sutherland

El año siguiente, 1969, Myron Krueger desarrollo unas experiencias que denominó realidades artificiales en las que un entorno generado mediante computador reaccionaba a la gente. Dentro de sus proyectos podemos mencionar *Glowflow*, *Metaplay* y *Psychic Space*.

Su intención era que la gente pudiera comunicarse a distancia mediante computadores. Con esta experiencia desarrolló *Videoplace* en 1974, un sistema de proyecciones y cámaras que mostraba la posibilidad de trasladarse a un entorno interactivo.

A finales de la década de los 80, Jaron Lanier, fundador del Visual Programming Lab, desarrolló varios dispositivos VR como el *DataGlove* y el visor *EyePhone* (Ver Figura 2.5).



Figura 2.5: Demostración del EyePhone y DataGlove. Fuente: VPL Research

Ya en la década de los 90 empezamos a encontrar dispositivos comerciales, aunque poco extendidos debido al coste de la tecnología. Un ejemplo fue la empresa Virtuality Group que comercializó una serie de máquinas recreativas (Ver Figura 2.6) en las que la gente podía jugar con gráficos 3D estereoscópicos. Este acercamiento al público general se puede ver en la película *The Lawnmower Man* (Leonard, 1992) donde la gente considera la tecnología como algo normal estando ambientada en su época. Un dato interesante es que parte de la película está basada en los trabajos iniciales de Jaron Lanier, llegando a utilizar, incluso, parte del equipamiento de su laboratorio.

La industria del videojuego también empezó a experimentar con la tecnología de VR. La empresa Sega anunció un visor (Ver Figura 2.7) para su consola *Sega Genesis* durante el Consumer Electronics Show* de 1993. El prototipo disponía de seguimiento de la cabeza,

*<https://www.ces.tech/> Accedido: 2024-04-30



Figura 2.6: Recreativas en VR. Fuente: Virtuality Group

un par de pantallas LCD y sonido estéreo. Sin embargo, el dispositivo no llegó al mercado debido a dificultades técnicas, aunque sí se desarrollaron cuatro juegos para él.



Figura 2.7: Artículo sobre Sega VR. Fuente: Popular Science

En 1995 Nintendo lanzó al mercado el dispositivo *Virtual Boy* por 180 dólares (Ver Figura 2.8), pero que supuso un fracaso comercial. Los gráficos que podía mostrar eran solamente de color rojo sobre un fondo negro, no disponía de muchos juegos y obligaba a

estar en una postura incómoda ya que se apoyaba en una superficie en lugar de ponerse en la cabeza. Solamente duró un año en el mercado.



Figura 2.8: Cartel promocional de Virtual Boys. Fuente: Nintendo

A finales de la década de los 2000 se lanzaron al mercado los primeros teléfonos móviles inteligentes. Con su desarrollo se produjo una progresiva miniaturización y la integración de sensores clave necesarios para conocer con exactitud la ubicación y orientación del teléfono. Estos avances podemos encontrarlos en los dispositivos de VR actuales.

Un caso de éxito fue el lanzamiento de la campaña de micro mecenazgo del dispositivo *Oculus Rift* (Oculus, 2012). En 2012 se inició el proceso con una meta de 250.000 dólares, algo que se vio cumplido de sobra al alcanzar casi diez veces lo solicitado con un apoyo de 9.522 patrocinadores. Demostró el interés del público general por esta tecnología y ello vino con el apoyo de las grandes empresas. Facebook (hoy Meta) compró Oculus en 2014 por 2.000 millones de dólares (Facebook, 2014) y otras empresas, como Valve, mostraron haber estado trabajando en sus propios conceptos de dispositivos de VR desde hacía varios años (Vlachos, 2015).

2.2.2. Dispositivos de Realidad Virtual

Desde el inicio de esta tesis hemos tenido la oportunidad de presenciar el lanzamiento de una amplia variedad de estos dispositivos por varias marcas. Las características y precio varían dependiendo del mercado al que estén orientados, los enfocados a consumidor cuestan desde unos centenares de euros mientras que los profesionales pueden costar miles. Las principales diferencias entre ellos son la fidelidad gráfica, la tecnología de seguimiento y otras características opcionales como el seguimiento de ojos. El equipo básico consiste en un visor (HMD, del inglés head-mounted display) y un par de controladores. Vamos a hacer un repaso de los que han sido más notables a lo largo de nuestro desarrollo.

Un elemento que podemos destacar es que el diseño de los controladores ha ido confluendo hacia unas características comunes. En los dispositivos más recientes que disponen de mandos podemos encontrar, para cada mano, lo siguiente: un joystick, dos botones de acciones, un botón de sistema o menú, un gatillo para actuar con el índice y otro gatillo para actuar con el dedo medio o el anular (llamado de agarre).

Meta Quest 2

El dispositivo orientado al consumidor más popular ([Valve Corporation, 2022](#)) ha sido el *Meta Quest 2* ([Meta, 2020](#)), anteriormente llamado *Oculus Quest 2* (ver Figura 2.9). Consta de un HMD que utiliza tecnología de inside-out tracking ([Klein y Murray, 2007](#)) para la localización de este en el espacio gracias a cuatro cámaras integradas en la parte frontal. Proporciona una resolución de 1832 x 1920 por ojo a un máximo de 120 Hercios gracias a dos pantallas LCD proyectadas a través de dos lentes Fresnel ([Davis y Kühnlenz, 2007](#)).

Incluye dos controladores que son ubicados también por las cámaras del HMD (usando una matriz de LEDs infrarrojos para identificarlos), así como acelerómetro y giróscopo propios para complementar el seguimiento en caso de que no estén dentro del campo de visión de las cámaras; cada uno tiene un joystick, tres botones para el dedo pulgar y dos gatillos (uno para el dedo índice y el otro de agarre para el resto de los dedos). Tanto el HMD



Figura 2.9: Visor y controladores del Meta Quest 2. Fuente: Meta

como los controladores tienen seis grados de libertad (DoF, del inglés Degrees of Freedom) (Zong-Ming, 2006) para mostrar con precisión la posición y rotación de cada uno de ellos.

Es capaz de reproducir contenido de manera independiente mediante el procesador integrado o conectarlo a un PC para que este se encargue del procesamiento. Tiene varias características que se añadieron de manera posterior al lanzamiento, como la retransmisión inalámbrica desde un PC. Una de ellas es relevante para nuestro estudio, se trata de la capacidad de hacer seguimiento de las manos para interactuar con el entorno, es posible sin necesidad de accesorios adicionales ya que reutiliza las mismas cámaras que necesita para el posicionamiento del visor.

Meta Quest Pro

Continuando el éxito de su modelo anterior, Meta lanzó en octubre de 2022 (ver Figura 2.10) una versión orientada a un ámbito profesional (Meta, 2022) y que aporta mejoras notables que se han ido gestando desde el lanzamiento de *Quest 2*, aunque a un precio muy superior. Podemos destacar el uso de lentes de tipo *Pancake* (Wong et al., 2017) que reducen su peso y tamaño, el seguimiento de los mandos con cámaras integradas en los mismos para evitar la deriva en caso de no mantenerlos dentro del campo de seguimiento

del visor, la inclusión de *eye-tracking*, *face-tracking* y *body-tracking*. También permite realizar aplicaciones de realidad aumentada gracias al uso de cámaras frontales a color.



Figura 2.10: Visor y controladores del Meta Quest Pro. Fuente: Meta

Pico 4

Este dispositivo está desarrollado por la empresa Pico XR, una subsidiaria de la empresa china ByteDance, que también es propietaria de la red social TikTok[†]. Ha tenido una buena recepción y compite tanto en características como en precio con los dispositivos de Meta y por ello en poco tiempo se ha posicionado dentro de los referentes (ver Figura 2.11).

Utiliza un sistema de seguimiento inside-out, con lentes tipo Pancake, una resolución de 2160x2160 pixels por ojo a 90Hz y un campo de visión de 105°. Con esto compite en superioridad con las Meta Quest 2. También hay anunciada una versión avanzada llamada Pico 4 Business, que incorpora características como eye-tracking.

Apple Vision Pro

Durante nuestro desarrollo, Apple anunció en junio de 2023 su dispositivo llamado *Vision Pro* (Apple, 2023). Durante la presentación no se mencionó ninguna tecnología en particular,

[†]<https://www.tiktok.com/> Accedido: 2024-04-30



Figura 2.11: Visor y controladores del Pico 4. Fuente: Pico XR

pero podemos apreciar que es capaz de adaptarse a VR y AR con un dial integrado en el visor (ver Figura 2.12). Lo que sí podemos comprobar es la mención al término Computación Espacial para referirse a sus capacidades, esto hace referencia a la intención de sustituir la interacción con los computadores por versiones espaciales proyectadas en el visor. Para ello hace uso de pantallas micro-OLED (Miao et al., 2023) con una resolución superior a 4K por ojo, lo que permite hacer los textos legibles y sustituir al monitor tradicional.



Figura 2.12: Visor Apple Vision Pro. Fuente: Apple

Carece de controladores y la interacción se realiza mediante gestos con las manos gracias a su tecnología de hand-tracking (seguimiento de manos). También permite la conexión con otros periféricos de la marca para realizar tareas típicas de un ordenador de escritorio.

2.3. Interfaces de usuario

A la hora de diseñar interfaces de usuario podemos considerar los trabajos de Don Norman (2007; 2013). Una de las premisas de estos trabajos es que el buen diseño es invisible; si consultamos a un usuario será más fácil que nos diga aquello que ha detectado que funciona mal que los motivos por los que otro elemento funciona bien. Para ello debemos considerar tres conceptos:

- Posibilidades (*Affordances* en inglés): las características de un objeto que generan posibilidades de interacción entre un usuario y un objeto. Hay un debate sobre si deben ser percibidas por los usuarios o no para ser consideradas posibilidades de interacción (Masoudi et al., 2019).
- Significantes (*Signifiers* en inglés): son las pistas perceptibles que los diseñadores incluyen en las interfaces para que los usuarios descubran fácilmente qué hacer, consiste en comunicar cómo se puede interactuar.
- Retroalimentación (*Feedback* en inglés): la transmisión de información de vuelta al usuario cuando una interacción ha tenido lugar.

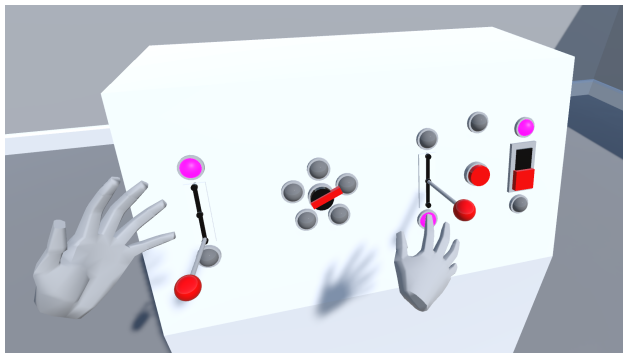
Actualmente en dispositivos digitales podemos encontrar las mismas posibilidades, significantes y retroalimentación que hace 30 años. Esto se debe a que seguimos manteniendo un diseño conceptual donde ciertos objetos mantienen una pista ornamental que era necesaria en el diseño original, aquello que se denomina *esqueumorfismo*. Un ejemplo de esto son los iconos de guardar con forma de disquete. Asociar significantes y posibilidades con algo reconocible nos permite crear analogías con las que elaborar un modelo conceptual, este diseño suele estar apoyado en cosas físicas. Un correcto diseño funciona como facilitador a la hora de adoptar ciertas tecnologías.

2.3.1. Interfaces en entornos virtuales

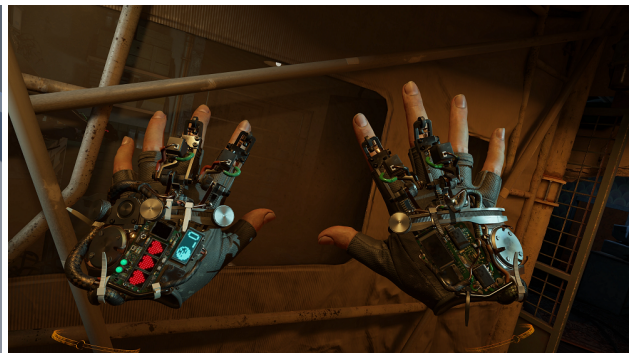
Dada nuestra familiaridad con el medio y la claridad de los ejemplos en el mismo, vamos a utilizar videojuegos (ver Anexo D) para explicar las distintas alternativas de las que disponemos a la hora de diseñar interfaces para entornos virtuales. En estos debemos aplicar los mismos principios que en aplicaciones generales y, además, el diseño tiene unas implicaciones adicionales sobre la inmersión como hemos visto anteriormente.

Podemos considerar cuatro alternativas (Cecchi, 2010; Coutaz, 2007; Ens y Irani, 2017) a la hora de crear interfaces 3D para entornos virtuales. Las clasificaremos en orden decreciente atendiendo al nivel de integración que tienen los distintos elementos que la componen con el entorno en el que se ubican. Esto no significa que unas variantes sean mejores que otras, simplemente nos sirve como guion para poder analizarlas con detenimiento.

La primera variante podemos denominarla *diegética* (Cecchi, 2010). En ella introducimos los elementos y controles de la interfaz dentro del propio entorno digital, estando integrados en él. De esta manera la interfaz es indistinguible, pero identificable, del resto del entorno, sintiéndose que la existencia de dicho elemento tiene lógica en el mundo digital en el que se desarrolla (ver Figura 2.13). Un ejemplo destacable es el videojuego *Half-Life: Alyx* (Valve Corporation, 2020) que incluye los indicadores de vida y energía dentro del traje del personaje controlado por el jugador.



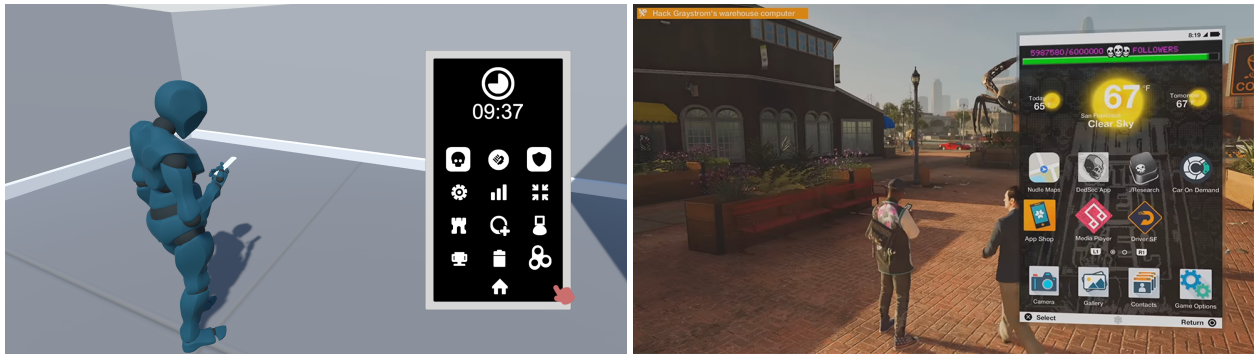
(a) Realidad virtual



(b) Half-Life: Alyx. Fuente: Valve

Figura 2.13: Ejemplo de interfaces diegéticas.

La *meta* interfaz es nuestra segunda alternativa (Coutaz, 2007). Funciona de manera similar a la diegética, pero utiliza interfaces 2D clásicas que se considerarían válidas en el mundo digital. Esto permite mantener cierto nivel de inmersión (ver Figura 2.14). En el juego *Watch Dogs 2* (Ubisoft, 2016) el personaje principal dispone de un teléfono móvil, la interfaz con la que el usuario interactúa es una visualización paralela que no existe propiamente en el espacio digital.



(a) Tercera persona

(b) Watch Dogs 2. Fuente: Ubisoft

Figura 2.14: Ejemplo de interfaces meta.

Otra variante es la *espacial* (Ens y Irani, 2017). Presentamos los elementos de la interfaz en el entorno digital 3D, pero no se consideran parte de él ni tiene sentido dentro de la lógica de dicho mundo (ver Figura 2.15). Nos permite proporcionar información adicional que complementa el entorno. Hay multitud de ejemplos sobre este tipo de interfaz en juegos que muestran estadísticas de los personajes como sería el caso de *League of Legends* (Riot Games, 2009).

La última alternativa la llamamos *no diegética* (Cecchi, 2010). Superponemos la interfaz sobre la pantalla del usuario. Por tanto, esta interfaz no existe en el mundo digital y es el usuario el único que es consciente de su existencia, esta propuesta rompe claramente la inmersión con el entorno (ver Figura 2.16). Tiene la ventaja de que nos permite diseñar unos elementos más claros, que se distingan mejor del entorno y, también, mostrar más información. Es el tipo de interfaz tradicional que nos encontramos en los entornos 2D de

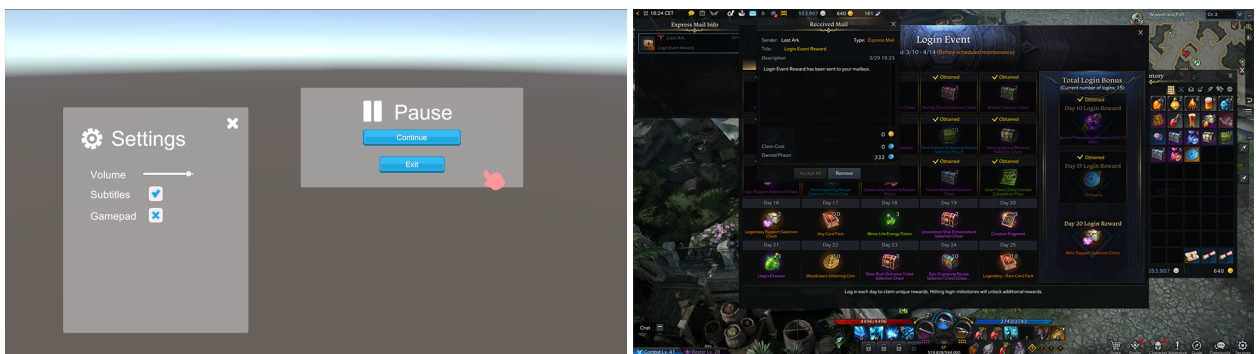


(a) Realidad virtual

(b) League of Legends. Fuente: Riot Games

Figura 2.15: Ejemplo de interfaces espaciales.

aplicaciones basadas en ventanas, y en juegos que requieren gestionar muchos elementos como es *Lost Ark* (Smilegate, 2019).



(a) Paneles y controles

(b) Lost Ark. Fuente: Smilegate

Figura 2.16: Ejemplo de interfaces no diegéticas.

Una interfaz puede estar compuesta por elementos de distintas variantes, como también podíamos observar en la Figura 2.15 con el caso del *League of Legends* combinando espacial y no diegética. El objetivo final de la interfaz completa es proporcionar toda la información de manera clara y permitir las interacciones necesarias, si bien tenemos que ser conscientes de las limitaciones que tiene nuestra elección en cuanto a usabilidad e inmersión, siendo esto último un elemento clave en ciertos escenarios como los videojuegos o simulaciones.

Cuando necesitamos diseñar una interfaz para visores planos y controladores tradicionales (como sería un monitor con teclado, ratón o una superficie táctil) tenemos muchos

ejemplos de referencia ya que han sido las plataformas objetivo durante mucho tiempo. Las aplicaciones y sistemas operativos utilizan interfaces no diegéticas ya que nos proporcionan una vista más limpia y organizada. También podemos encontrar este tipo de interfaz en otras aplicaciones como los videojuegos. Tenemos que recordar que las interacciones disponibles son aquellas permitidas por los controladores mencionados anteriormente.

2.3.2. Antropometría y espacios de trabajo

Para el correcto diseño de un espacio de trabajo es necesario un estudio de las medidas y proporciones del cuerpo humano, la disciplina que se encarga de esto se denomina *antropometría* (Norton y Olds, 1996). Es un campo con una larga trayectoria de estudios y multitud de investigaciones, incluso sin ser los primeros ejemplos, podemos encontrar evidencias de artículos en el siglo XIX (Hitchcock, 1887; Topinard, 1881).

La importancia de este campo se demuestra ya que ha seguido siendo relevante por su relación con muchas otras disciplinas como la psicología y la evolución humana, un ejemplo de esta continuidad lo podemos encontrar a mediados del siglo XX (Montagu y Brožek, 1960) con un manual para realizar correctamente estas mediciones.

Distintos autores han identificado la importancia de estas medidas humanas para el diseño de espacios de trabajo. Muestra de ello son los trabajos de los años 50 que estudian la distribución del espacio y los movimientos cuando el trabajo en oficinas se hacía más común (Dempster et al., 1959). En esta publicación se analizan las posturas y alcance de sujetos sentados, haciendo recomendaciones para la mejora en los diseños.

A la vista de estos trabajos nació el término *Factores Humanos* (Licht et al., 1989), que hace referencia a comprender y gestionar las capacidades, limitaciones y otras características tanto individuales como generales en el diseño de cualquier elemento con el que vaya a interactuar un humano. Asociado a este concepto también tenemos la *Ergonomía* (Wilson, 2000), que se define como la comprensión de comportamiento y rendimiento humano en su interacción con sistemas técnicos.

Otros autores han comprobado su importancia para el correcto diseño de espacios de trabajo y entornos y la necesidad de tomar conciencia de estos (McCormick, 1957). En este estudio podemos encontrar cómo se cambia el enfoque para que no solo se realicen diseños generales sino que también se adapten a los usuarios.

Más recientemente vemos ejemplos de la importancia de la antropometría en el diseño de espacios de trabajo en el ámbito doméstico e industrial (Nicholson, 1991). Esta relación necesaria entre las medidas humanas y el diseño tiene implicaciones no solo en la efectividad a la hora de realizar tareas, sino también en la salud y el bienestar de los usuarios de estos espacios.

La importancia de esta relación se sigue viendo ejemplificada con la creación de un manual que añade los dispositivos por computador dentro de los elementos a considerar en el diseño de espacios de trabajo (Pheasant y Haslegrave, 2018). Aquí podemos ver cómo se hace una revisión técnica del campo, introduciendo detalles específicos de la interacción con computadores (HCI) en distintas edades y atendiendo a la diversidad en el diseño ergonómico de espacios.

Posteriormente se ha ampliado el alcance de los requisitos de diseño para incluir las limitaciones de las personas con discapacidad (Nowak, 1989), teniendo en cuenta el reto aún mayor que representa debido al aumento en la diversidad de situaciones a las que atender, pero introduciendo aspectos de responsabilidad social en el diseño. Esto es algo que podemos comprobar con ejemplos claros en urbanismo y en distintos servicios públicos como el transporte.

Sin embargo, si dejamos que toda la responsabilidad recaiga del lado de la persona encargada de diseñar el espacio puede complicar mucho su tarea. También podemos permitir a los usuarios adaptar el entorno a su gusto, así como educarles sobre ergonomía para que mejoren las condiciones cuando hacen uso de este (Robertson et al., 2008), generando una comunicación bidireccional entre los usuarios y el diseñador.

Esta formación a los usuarios es especialmente beneficiosa si tenemos en cuenta los efectos que tienen en la salud la ergonomía y las mejoras en el diseño de espacios de trabajo ya que han seguido siendo objeto de estudio (Fernandez, 1995), ya sea sentado o realizando trabajos manuales. Recalcando la importancia que estos factores tienen de cara a evitar lesiones, aumentar la productividad y el bienestar de los usuarios.

Aunque esto no solo tiene que ver con las posturas, el entorno de trabajo en sí mismo puede producir estrés y tener un impacto en el rendimiento de los usuarios (Vischer, 2007). Se muestra una relación entre el comportamiento de los usuarios y las características físicas del entorno. Más recientemente la ergonomía también ha empezado a considerar otros elementos como la experiencia de usuario (Tosi, 2020).

Incluso elementos que podríamos considerar secundarios, como la decoración, forman parte de esta ecuación (Stone y English, 1998), haciendo patente que hasta el más mínimo detalle tiene importancia en nuestros diseños. Por tanto, debemos tener en cuenta elementos como el color y otros elementos visuales ya que tienen un impacto en el rendimiento de los usuarios.

Esta relación entre la antropometría y el diseño de espacios de trabajo, junto con sus implicaciones ergonómicas, ha demostrado ser un elemento clave. Para ello, distintos autores, han redactado manuales de diseño que aúnan estos conceptos. Podemos mencionar el trabajo de Corlett y Clark como una muestra de estos esfuerzos (Corlett y Clark, 1995).

A la hora de diseñar espacios de trabajo que requieran interacción manual debemos tener en cuenta una serie de conceptos principales (Mital y Faard, 1990) que pueden hacer uso de una combinación de medidas corporales. Estos van a determinar el tamaño y las formas de nuestros experimentos.

En primer lugar vamos a mencionar el *alcance* (ver Figura 2.17), que hace referencia a la distancia a la que puede llegar a alcanzar el usuario, limitándose al contacto con un elemento con la punta de los dedos de la mano extendiendo el brazo. Derivado de este tenemos el

alcance de agarre funcional que, como indica el nombre, se refiere a la distancia a la que el usuario puede agarrar y operar con fuerza hacia él.

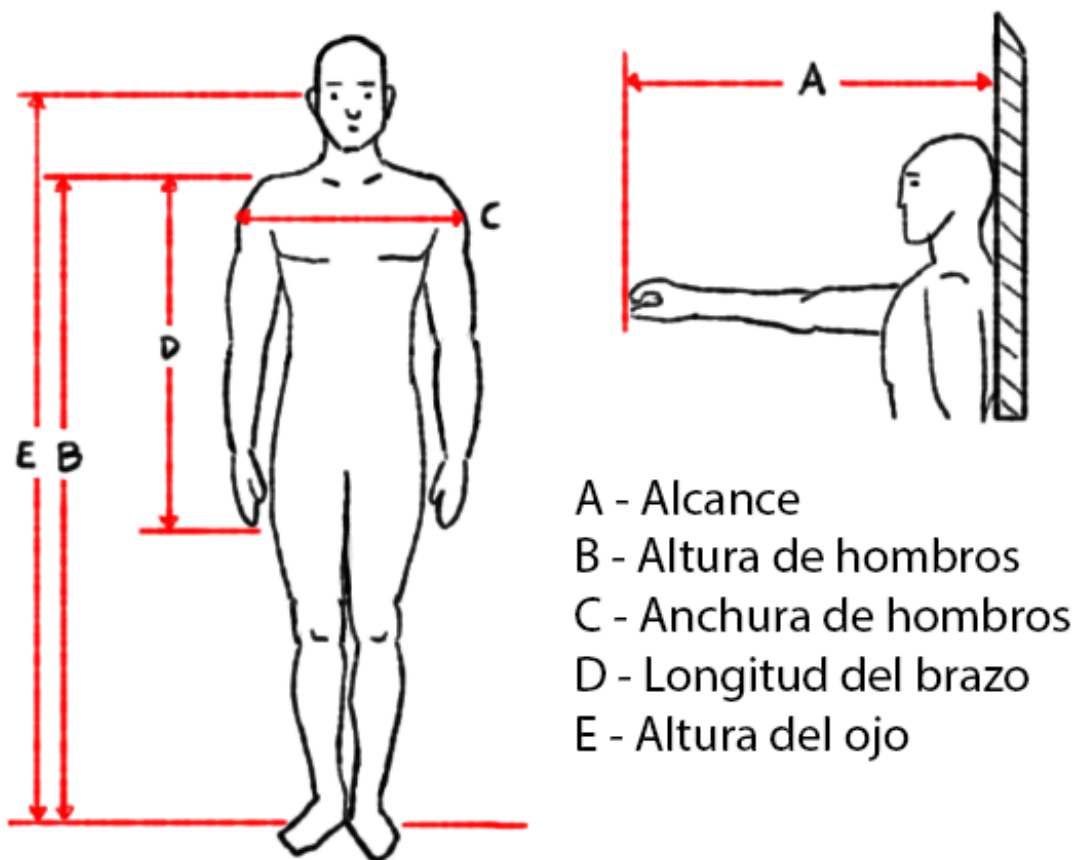


Figura 2.17: Medidas del usuario.

Estos términos dependen a su vez de otras medidas del usuario. La primera de ellas es la *altura de hombros (acromial)*, definida como la distancia desde el suelo a los hombros en posición erguida. También es importante la *anchura de hombros (bideltoide)* que marca la distancia máxima entre las partes más salientes de los músculos deltoides. Y, por último, la *longitud del brazo* que va desde la parte externa del hombro hasta el final de los dedos.

Hay otros conceptos que también son importantes para nuestro estudio, en este caso relacionados con el sentido de la vista. El *campo de visión* que hace referencia al volumen que puede observar el usuario, su altura y anchura dependen de la morfología particular del ojo y la profundidad se verá afectada por las condiciones de visión del usuario. Igualmente

podemos hablar de la *línea de visión*, es una línea imaginaria que marca la dirección en la que están orientados los ojos, puede afectar al campo de visión en determinadas posiciones por oclusión con la propia morfología de la cara del usuario. Ambos dependerán a su vez de la *altura del ojo* que va desde el suelo hasta el centro del ojo.

2.3.3. Realidad Virtual e interfaces de usuario

Por último nos vamos a centrar específicamente en nuestro objeto de estudio, revisando publicaciones que traten temas específicos de VR y sus implicaciones para un correcto diseño de interfaces de usuario, su control y sus interacciones.

Podemos ver que la búsqueda de una taxonomía para interfaces de usuario ha sido estudiada desde los primeros momentos en los que la VR era tecnológicamente accesible (Coomans y Timmermans, 1997). Gracias a esto podemos identificar claramente los medios físicos, modalidades de representación y la semántica del diálogo HCI (del inglés Human Computer Interaction, interacción persona-ordenador).

Más recientemente, podemos encontrar un trabajo muy útil que establece una taxonomía de interfaces de usuario tridimensionales (Dachselt y Hübner, 2007) que nos permite aclarar qué elementos debemos tener en cuenta en el proceso de diseño que realizaremos posteriormente. Los autores introducen nuevos criterios a considerar: la intención de uso, la apariencia y estructura, su ubicación, el modo de invocarse y su disponibilidad, la interacción, la usabilidad y, por último, su capacidad de combinación. Además crean una taxonomía atendiendo a la estructura con la que se representan.

Las peculiaridades de los entornos virtuales en VR suponen un cambio de paradigma respecto a los principios que damos por sentados en el diseño de interfaces clásicas 2D. Como muestra de ello podemos encontrar las declaraciones de Steve Watt, director creativo del estudio de desarrollo nDreams, que expresó la necesidad de adaptar el diseño general a VR en una entrevista al portal GameIndustry.biz afirmando en sus declaraciones que “Las

plantillas y supuestos que tienes basados en el diseño tradicional de juegos no funcionan de la misma manera cuando se trata de VR” (Dealessandri, 2020).

Ya hemos podido ver que la VR no es un campo nuevo y, gracias a ello, podemos encontrar ejemplos de estudios que intentan evaluar la usabilidad de interfaces usando esta tecnología (Sutcliffe y Kaur, 2000), donde encontramos interesante la manera en que sus autores hicieron la evaluación y el proceso de diseño y pulido de la interfaz. Podemos aplicar sus modelos de interacción para la exploración y navegación así como de respuesta del usuario al sistema.

De hecho, estudios previos han descompuesto y modelado el proceso de diseño de interfaces en VR (Tanriverdi y Jacob, 2001), comparando las características de estas con las interfaces convencionales. Con ello generan un modelo de arquitectura multicomponente que permite segmentar el proceso de diseño en elementos con un objetivo bien definido y acotado.

Igualmente, podemos encontrar estudios sobre interacción e interfaces en entornos virtuales que se enfocan en las mejoras que supone una interacción diegética y más natural usando gestos (O’Hagan et al., 2002). Aunque se centre en el reconocimiento de los gestos con una cámara, establece los gestos básicos: mano abierta, puño, agarre, apuntado y pinza. Este conjunto nos aporta ideas para implementar nuestra propuesta.

Otros autores también han sido conscientes de que un correcto diseño puede tener implicaciones en la eficiencia y eficacia, un ejemplo de esto es un experimento relacionado con el nuestro en el que comprueban los tiempos de completar unas tareas dependiendo de la distribución de los controles dentro de la interfaz (Santos et al., 2017). Tiene diferencias significativas con nuestro trabajo, únicamente utilizaban controles de tipo botón en una interfaz espacial y con una muestra pequeña. Otra diferencia es el enfoque que citan en su trabajo, su objetivo es comparar tiempos entre distribuciones, no diferentes implementaciones de interfaz ni una variedad de controles.

En otro estudio similar al nuestro podemos encontrar un análisis sobre el confort y la eficiencia de interfaces diegéticas y espaciales ([Bowman y Wingrave, 2001](#)). En este caso solo cubre el uso de controles de tipo botón. Además requiere que el usuario disponga de unos controladores adicionales creados expresamente para el estudio y está más enfocado en la usabilidad de dichos controladores que en la propia interfaz digital.

Aunque no en Realidad Virtual, otros autores han evaluado el impacto que tienen en la inmersión las diferentes implementaciones de interfaz ([Iacovides et al., 2015](#)). Concluyen que eliminar elementos no diegéticos beneficia a la inmersión ya que el entorno es más coherente con el modelo mental de la realidad. Nuestro estudio puede complementar estos descubrimientos al aportar detalles adicionales y así permitir a los diseñadores hacer una elección que se adecúe de manera ideal a sus intenciones.

Relacionado con esta necesidad de crear interfaces óptimas tenemos un estudio acerca de la eficiencia de la interfaz a la hora de comunicar información en VR ([Marre et al., 2021](#)). Las conclusiones nos muestran el efecto positivo de las interfaces diegéticas en el rendimiento de usuarios noveles, pero perjudicando a la experiencia subjetiva, comprendida como la sensación de presencia y disfrute.

Incluso tenemos un ejemplo centrado en las implicaciones que tienen las variantes diegética y espacial en términos de presencia y experiencia a la hora de mostrar la vida del jugador ([Köhle et al., 2021](#)). La interfaz no diegética es preferida en situaciones que requieren una rápida legibilidad y comprensión como son los juegos multijugador, mientras que los usuarios prefieren la variante diegética en situaciones más calmadas ya que genera mayor inmersión.

Un equipo de autores tiene un par de publicaciones relacionadas en las que evalúan la eficacia de la inmersión mediante una aproximación cuantitativa ([Salomoni et al., 2016](#))([Salomoni et al., 2017](#)). Concluyen en la necesidad de seguir investigando sobre las distintas variantes de interfaces en VR y destacan una preferencia de los usuarios por la variante

diegética en términos de inmersión, sensación de presencia, usabilidad y menos afección por cinetosis.

Podemos encontrar más muestras de esta relación entre inmersión e interfaces en otro trabajo ([Lindeman et al., 1999](#)), este es relevante para nuestro desarrollo debido a las implicaciones que tiene la apariencia del espacio de trabajo en el rendimiento, como ya hemos visto anteriormente. Muestra de ello es la preferencia de los usuarios por elementos de interfaz que ocupan el mismo campo de visión que los objetos con los que están interactuando. Igualmente recalcan la importancia de añadir una respuesta háptica en la manipulación de la interfaz.

El uso de gestos también es el germen de trabajos que quieren evaluar la usabilidad utilizando otras aproximaciones de control ([Cabral et al., 2005](#)). Los experimentos muestran que el tiempo necesario para completar tareas es considerablemente mayor que usando controles tradicionales como el ratón y también la causa de fatiga incluso en periodos cortos de tiempo, aunque tiene sus ventajas al ser una interacción más natural. Nos parece interesante para el diseño de nuestro trabajo, pero queremos limitarnos al uso de controles básicos que permita su uso en la mayor cantidad de dispositivos posibles.

Otros autores también han probado métodos de interacción alternativos como hand-tracking ([Bachmann et al., 2018](#)). Esta tecnología muestra ciertas limitaciones en cuanto a las condiciones de iluminación necesarias y oclusiones, pero con sensores más modernos y otras técnicas se pueden mitigar estos efectos. Sin embargo muestra cómo este tipo de interacción es factible y fácil de comprender por los usuarios debido a la familiaridad con dispositivos como tabletas y teléfonos inteligentes.

En otro estudio ([Falcao et al., 2015](#)) se observan resultados similares, comprobando que la interacción mediante este método supone un mayor esfuerzo y requiere más tiempo para realizar las mismas tareas. Entre los problemas encontrados está la fatiga y que los controladores tradicionales proporcionan una mejor respuesta en su uso.

En ambos casos requerimos de hardware específico y limita el alcance de nuestros descubrimientos a únicamente los HMD que dispongan de esta tecnología o el uso de hardware adicional que puede interferir en la experiencia de usuario.

Para una mejor experiencia en VR debemos considerar varios elementos clave: el medio, la inmersión, la respuesta, la interactividad y los participantes ([Muhanna, 2015](#)). Es particularmente importante un correcto diseño de la interacción con los controladores disponibles y el entorno.

Nos será de gran utilidad para nuestra propuesta un artículo donde se resumen qué gestos que se pueden realizar con distintos tipos de controles físicos ([Li et al., 2019](#)). En sus conclusiones podemos ver cómo estos pueden contribuir a mejorar la inmersión e interacción en VR. Una combinación adecuada puede contribuir a mejorar los resultados de nuestra propuesta.

Este beneficio de implementar interacción basada en gestos se puede encontrar en otro trabajo ([Manghisi et al., 2018](#)). Los autores demuestran que permite una interacción más natural, haciendo que esta sea más disfrutable, pero una vez más vemos que conlleva el coste de generar fatiga debido a los constantes movimientos requeridos. Esta fatiga es un elemento que debemos tener en cuenta en el diseño de nuestros experimentos, especialmente en la aproximación diegética ya que va a requerir que el usuario replique los movimientos como haría en el mundo físico.

Como hemos reflejado anteriormente, durante la búsqueda bibliográfica disponemos de varios estudios sobre la importancia del diseño de la interfaz de usuario por sus implicaciones en la inmersión. Sin embargo, solo hemos podido encontrar uno que investigue, de alguna manera, la eficiencia de la propia interfaz. Esto refuerza nuestra pregunta y la necesidad de profundizar en estos aspectos.

El proceso de diseño cambia si lo que queremos es implementar una interfaz en VR. Tanto la variante diegética como la meta y la espacial pueden funcionar de igual modo. Ahora, como estamos inmersos en el entorno virtual, tanto el HMD como los controladores

tienen presencia en él ya que representan al usuario. Podemos tocar e interactuar, usando las características que nos permitan los dispositivos, de una manera similar al mundo físico. Las interfaces no diegéticas nos suponen un mayor problema. Debido al funcionamiento estereoscópico del HMD, no podemos superponerlas sobre el visor como haríamos en un monitor ya que no se visualizan adecuadamente. La única alternativa que nos queda es dibujarlas dentro del mundo virtual lo que las convierte, por definición, en espaciales.

La interacción con interfaces en VR se puede realizar de muchas formas. Podemos optar por hacer la adaptación más simple que consiste en replicar el comportamiento de los visores planos, esto significa recrear un cursor y acciones para su interacción (Ver Figura 2.18). Un ejemplo lo podríamos encontrar si pensamos en un puntero láser virtual para seleccionar los controles y pulsaciones de gatillo del controlador para ejecutar la interacción.



Figura 2.18: Interfaz de menú de Beat Saber. Fuente: Beat Games

Si pensamos en un paso más avanzado, podemos considerar una combinación del tacto en el entorno virtual junto con pulsaciones de todos los gatillos y botones de los que dispone el controlador. Por ejemplo, tocar un objeto y pulsar el gatillo del dedo índice para agarrar un objeto (Ver Figura 2.19). Esto no es difícil de conseguir si le damos una presencia virtual al controlador mediante un modelo 3D sencillo o, incluso, una mano animada según las interacciones del usuario. Podemos también usar la tecnología de seguimiento de manos

de tal manera que estas se representen de una manera realista en el entorno digital, sin embargo, perderemos la posibilidad de proporcionar respuesta háptica sin usar dispositivos adicionales.



Figura 2.19: Captura de pantalla de Vacation Simulator. Fuente: Owlchemy Labs

Como usuarios del medio, hemos visto ejemplos de multitud de implementaciones siguiendo estas variantes. Gracias a haber probado estos juegos y experiencias, y haciendo una observación reflexiva, es como nos surgió la pregunta que pretendemos responder: si la elección de un tipo de interfaz satisface a una función práctica o si, por el contrario, se basa solo en una decisión estética. Atendiendo a los resultados, los desarrolladores podemos tener en consideración estas implicaciones de cara al diseño de futuras interfaces para entornos de Realidad Virtual.

Capítulo 3

Investigaciones iniciales

Para poder fundamentar adecuadamente nuestros experimentos necesitamos un primer trabajo de exploración que nos permita distinguir adecuadamente las interacciones y tipos de interfaces existentes. Comenzamos con una extensa documentación y prueba de distintas experiencias y videojuegos en VR para anotar distintas aproximaciones a las interfaces de usuario y las interacciones con ella y el entorno. De esta manera podemos identificar una serie de prácticas habituales que nos ayuden a diseñar nuestros siguientes experimentos.

Nuestro primer estudio ([Peñas y Peinado, 2018](#)) nos permite definir los requisitos básicos para el desarrollo posterior. Por un lado tenemos los aspectos más técnicos que tienen implicaciones en el confort de los usuarios. Lo más importante es mantener una tasa *FPS* (del inglés frames per second, fotogramas por segundo) adecuada para minimizar posibles casos de cinetosis. Gracias a la revisión de los distintos dispositivos podemos marcar como objetivo un mínimo de 72FPS, siendo lo ideal alcanzar una tasa igual o superior a 90FPS. También nos ayuda a elegir un entorno para realizar el desarrollo que tenga un amplio soporte de dispositivos. Desde un aspecto de diseño podemos determinar cómo realizar una representación del usuario suficiente y creíble, nos basta con representar las manos con una posición y rotación adecuadas. Con un dispositivo básico no podemos representar un avatar de cuerpo completo del usuario ya que no tenemos información de localización sobre todas las articulaciones; los algoritmos de cinemática inversa, ante estas variables, pueden ofrecer múltiples soluciones, no sólo la real.

A partir de 2016 se lanzaron al mercado una nueva ola de dispositivos de VR orientados a consumidor, esto generó un notable aumento en el número de usuarios de este medio. Varios de dichos dispositivos incluyen, además del visor, un par de controladores cuya localización es recreada en el entorno digital. La conjunción de estos elementos nos permite disponer, de manera habitual, de una información que hasta ahora desconocíamos: la posición y rotación de la cabeza y manos de los usuarios.

Con esta nueva información planteamos un nuevo tipo de interacción en entornos virtuales basada en la detección de ciertos gestos de lenguaje no verbal de los usuarios. Esta clasificación la realizamos mediante una red neuronal de tres capas (18, 30 y 3 neuronas respectivamente) que nos permite detectar tres poses: neutral, agresiva y defensiva.

Partiendo de esta base creamos un entorno digital con un personaje no jugador que reacciona dependiendo de la pose del usuario. También expresa las emociones básicas en la conversación que tiene con el jugador.

Gracias a este tipo de interacción permitimos a los desarrolladores disponer de una información adicional que permita a los entornos virtuales reaccionar no solo a las órdenes de los usuarios sino a cómo se encuentran en ese momento; pudiendo, con ello, realizar ajustes que incrementen la usabilidad, la inmersión y la aceptación de aquello que les presentamos.



Figura 3.1: Entorno usado para el experimento del congreso ACE 17.

Durante la participación en el proyecto *La intervención de la mujer en el espacio construido en el medio rural: Propuestas de cambio para Cifuentes (Guadalajara)* (Díaz y Peñas, 2019) realizamos una reconstrucción en VR de varias ubicaciones del pueblo con el objetivo de visualizar mejoras urbanísticas realizadas por las mujeres que habitan dicha localidad. Al ser una ubicación rural y al no haber población joven tienen poca experiencia con las últimas tecnologías, esto nos permite poner a prueba lo aprendido en el anterior estudio. Para alcanzar nuestro objetivo, implementamos una representación básica mediante un modelo de manos virtuales simplificado; igualmente toda la interfaz e interacciones son de tipo diegético para facilitar la comprensión mediante el uso de objetos conocidos como es el caso de introducir un disco en un lector para seleccionar la ubicación a la que se quieren desplazar.



Figura 3.2: Habitante de Cifuentes experimentando las propuestas en VR.

Por último podemos destacar la investigación en el campo de la neurociencia sobre situaciones de estrés (Moreno-Fernández et al., 2023a). Aquí es necesario un alto grado de inmersión para que los participantes reaccionen de manera adecuada a los distintos estímulos que les presentamos y así obtener unas mediciones fisiológicas que sean adecuadas para su análisis. Dada la experiencia previa y la base documental, elegimos realizar una interfaz puramente diegética. Sin embargo, los investigadores también necesitan hacer uso del dispositivo de VR para ciertas situaciones como podrían ser elegir una determinada prueba o

reiniciar el experimento. En estos casos vemos que la elección de este tipo de interfaz dificulta la claridad de los distintos elementos y tiene una percepción subjetiva de entorpecer las acciones de gestión. Por ello hemos optado por diferenciar las interfaces de usuario y de investigador, siendo diegética en el primer caso y espacial en el segundo. Una vez realizados estos cambios los investigadores valoran positivamente la nueva interfaz. Esto refuerza nuestra pregunta inicial sobre la necesidad de evaluar la eficiencia de las interfaces en VR.

Las capacidades inmersivas de la VR nos permiten recrear entornos que generen estrés de manera controlada. Este tipo de situaciones son las que suelen precipitar reacciones drásticas en los usuarios como sería el consumo de sustancias.

En nuestro estudio recreamos un escenario basado en una plataforma elevada en forma de cruz (EPM) que se utiliza ampliamente en modelos del estudio de ansiedad. Esto nos permite analizar el comportamiento y otras respuestas fisiológicas de los usuarios para medir el nivel de estrés en diferentes momentos del experimento.

El experimento ubica a los usuarios en una plataforma a gran altura entre edificios con forma de cruz. Dos de los brazos disponen de paredes de protección y los otros están abiertos al vacío. Durante la primera fase permitimos al usuario explorar el entorno. Luego le forzamos a interactuar de manera diegética con varios elementos para que visite las zonas abiertas. Por último introducimos otros elementos para generar estrés, en este caso serpientes que navegan por la plataforma.

Dividiendo la muestra en varios grupos, atendiendo al tipo de sustancias que consumen los sujetos del experimento, y un grupo de control podemos analizar cómo responden de diferente manera a la situación que creamos.

El análisis de comportamiento nos muestra como los grupos con un uso problemático de sustancias se adentran menos veces en las secciones más estresantes de la plataforma y pasan menos tiempo en ellas.

Los datos fisiológicos también nos aportan información al mostrar que estos grupos tardan más en recuperarse de estas situaciones respecto al grupo de control. Podemos verlo tanto en la actividad electrodérmica como en las respuestas hormonales.

Los resultados sugieren diferencias que pueden ser utilizadas para detectar individuos en riesgo de adicción. También nos pueden ayudar a desarrollar estrategias de detección gracias a la capacidad que tiene la VR para generar inmersión, respuestas emocionales, cognitivas y fisiológicas en los usuarios.

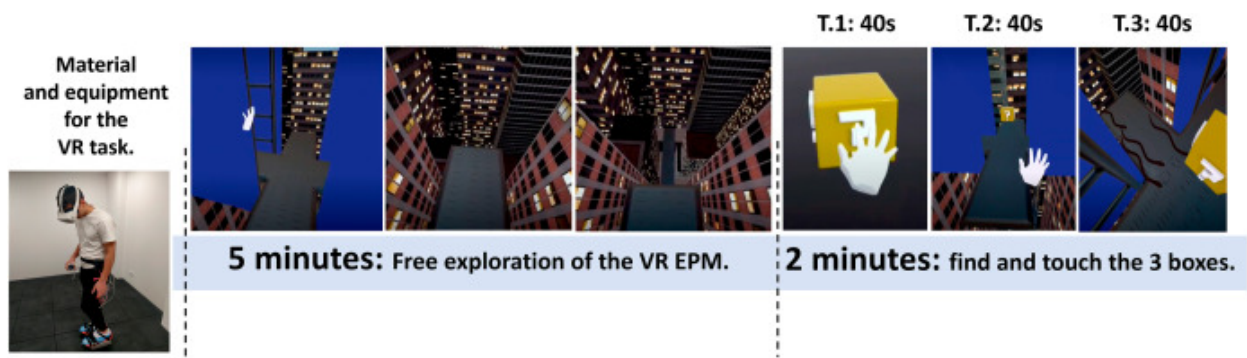


Figura 3.3: Sujeto en el experimento y vistas del entorno 3D.

Capítulo 4

Hipótesis y metodología

Una vez hemos realizado la revisión bibliográfica y el marco teórico donde definimos los principales conceptos que vamos a manejar, podemos pasar a elaborar los propósitos de nuestro trabajo así como describir el proceso que vamos a seguir para alcanzarlos.

4.1. Hipótesis y objetivos

Para este trabajo nos proponemos alcanzar una serie de objetivos específicos como parte de nuestra contribución.

- Identificar las limitaciones de interacción de los dispositivos de Realidad Virtual actuales orientados al consumidor no profesional.
- Comprobar experimentalmente la importancia de los Factores Humanos en el diseño de interfaces de usuario, principalmente desde un punto de medidas fisiológicas.
- Analizar las interfaces diegéticas y espaciales en entornos de Realidad Virtual para extraer las ventajas e inconvenientes de las propuestas.
- Elaborar una propuesta de interfaz que permita corroborar los hallazgos anteriores.
- Proponer una serie de recomendaciones que optimicen futuros diseños de interfaces en Realidad Virtual.

Para el desarrollo de esta tesis tendremos en cuenta la representación e interacción de las distintas alternativas de diseño de interfaces de usuario disponibles para un entorno de Realidad Virtual en primera persona. Por ello vamos a contrastar las siguientes hipótesis:

- Las variantes de interfaces de usuario actuales en entornos de Realidad Virtual en primera persona (diegética y espacial) son indistinguibles en términos de eficiencia, entendida como el tiempo que se tarda en completar una tarea, y su elección puede proceder de otros factores como podrían ser la inmersión, la estética o la facilidad de implementación.
- Esta eficiencia no se ve afectada por el sexo del usuario, independientemente del género percibido, aunque sí podría mostrar diferencias por ciertas medidas fisiológicas independientes del mismo.
- Es posible implementar una interfaz más eficiente para Realidad Virtual combinando el uso de gestos básicos y los mejores rasgos, así como evitando los principales defectos, de las interfaces diegéticas y espaciales.

4.2. Metodología

Para alcanzar los dos primeros objetivos nos vamos a sustentar en la revisión bibliográfica que nos aporta los conceptos clave para tener en cuenta seguido de una serie de aplicaciones prácticas que nos permiten ver cómo se trasladan esos conceptos a casos reales.

El trabajo que vamos a desarrollar tiene una naturaleza de tipo experimental, por tanto, hemos decidido utilizar una metodología cuantitativa de cara a la obtención y análisis de datos. Hemos diseñado un experimento comparativo ($n=126$) entre sujetos ([Lazar et al., 2017](#)) en el que dividiremos la muestra entre tres grupos, atendiendo al tipo de variante de interfaz que van a probar, para comparar si hay diferencias estadísticas entre ellas (ver [Tabla 4.1](#)).

Implementación	Femenino	Masculino	Suma
Diegético	13	28	41
Espacial	13	20	33
Propuesta	14	38	52
Suma	40	86	126

Tabla 4.1: Diseño muestral segmentado por sexo y propuesta.

Hemos organizado el desarrollo del experimento en dos fases marcadas por los objetivos a alcanzar, esto nos permitirá recabar información para identificar mejoras para implementarlas posteriormente en la segunda fase. En la primera formamos dos grupos, un primero ($n=41$) que ha probado la variante diegética mientras que un segundo grupo ($n=33$) experimentó con la alternativa espacial. Hemos elegido estas dos variantes ya que son las únicas viables en un entorno de Realidad Virtual en primera persona. En la segunda fase, el tercer grupo ($n=52$) probó nuestra propuesta de interfaz mixta. Para poder comprobar la coherencia de las implementaciones, cualquier resultado parcial (un usuario que no realice el experimento completo) o con algún dato incorrecto ha sido descartado en el estudio. Los sujetos solo han realizado un tipo de experimento por lo que los resultados de estos son independientes.

En lo relativo al diseño muestral, el tipo de selección que hemos llevado a cabo ha sido no probabilístico por “bola de nieve”, garantizando cuotas por sexo para realizar una segmentación analítica. En la muestra se observan diferencias entre el número de sujetos masculinos y femeninos debido a que se presentaron más voluntarios del primer grupo. Respecto a la selección de los usuarios en cada grupo lo decidimos de manera aleatoria para cada sesión. Los sujetos reclutados tienen un perfil heterogéneo; podemos encontrar desde individuos sin experiencia en Realidad Virtual a usuarios activos. El rango de edad cubre de los 18 a los 40 años (media= 26.8).

Queremos destacar que nuestra intención de intentar alcanzar unas cuotas por sexo es para que podamos comprobar si hay diferencias estadísticas debidas a ello o a la fisiología, para poder contrastar nuestra segunda hipótesis; en ningún caso pretendemos introducir

el concepto de género en nuestro estudio, aunque podría ser algo a considerar en trabajos futuros.

Aunque hemos desarrollado todas las alternativas para que sean compatibles con cualquier dispositivo de Realidad Virtual con controladores para ambas manos, en todas las sesiones hemos utilizado el dispositivo Meta Quest 2 debido a que era el que teníamos a nuestra disposición y cumple con los requisitos para nuestra prueba (Ver Figura 4.1). Aprovechando la presencialidad de las pruebas, en todas las sesiones hemos estado supervisando la correcta realización de estas, explicando los procedimientos, dando indicaciones básicas y asegurándonos de que los sujetos proporcionaban correctamente la información requerida para la investigación.



Figura 4.1: Controladores del Meta Quest 2. Fuente: Meta

Capítulo 5

Primera fase: Estudio de las interfaces actuales

Para que podamos implementar una interfaz lo más eficiente posible, primero debemos contrastar las variantes diegética y espacial para poder ver cuáles son las ventajas y desventajas de estas. Como hemos visto anteriormente, en las distintas aplicaciones de VR podemos encontrar ejemplos de cualquiera de ellas. Recordemos, igualmente, que estas variantes son las únicas que tienen sentido en un entorno VR en primera persona. La variante meta significaría abstraer los propios objetos que estamos manipulando y la no diegética no es posible representarla técnicamente usando un dispositivo VR. Con ello vamos a contrastar si a la hora de elegir el diseño podemos descartar la eficiencia como un factor para tener en cuenta, haciendo que nuestra elección se deba a otros factores como la estética, la inmersión o la facilidad de la implementación.

Para ello vamos a analizar, primeramente, los requisitos del entorno, el espacio de trabajo y las distintas interfaces que vamos a implementar. Una vez definidas las características del diseño pasaremos a explicar el proceso que seguirán los experimentos y con ello poder elaborar una arquitectura de la aplicación que nos permitirá mostrar los experimentos a los sujetos de prueba, y que esta pueda realizarse con la menor intervención posible por nuestra parte, limitándose a dar unas breves instrucciones y supervisar el proceso.

En último lugar, continuaremos con un análisis detallado de los resultados obtenidos que nos permitirá obtener la información necesaria para distinguir posibles errores en el diseño y otras mejoras no consideradas en esta primera fase. Todo esto nos permitirá, idealmente, elaborar una nueva propuesta mixta que obtenga mejores resultados que las originales.

5.1. Diseño

El diseño del espacio de trabajo es un elemento clave del experimento. Ambos tipos de interfaz deben estar en igualdad de condiciones para poder contrastar los datos adecuadamente, para ello usaremos el mismo espacio de trabajo. Obtener suficiente información antropométrica es un trabajo demasiado laborioso y se escapa del objeto de nuestro estudio. Mientras hacíamos la búsqueda sobre bibliografía relacionada con nuestra investigación, encontramos un documento del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América ([Department of Defense of the United States of America, 2020](#)). En esta publicación podemos acceder a una considerable cantidad de medidas recogidas en distintos informes (NATICK/TR-15/007, NATICK/TR-16/013, AFRL-RH-WP-TR-2014-0113, NATICK/TR-13/018 y DOD-HDBK-743) medido de manera manual en los más antiguos y usando un escáner 3D en los más recientes, sumando una muestra de 13690 individuos del personal de todas las ramas de las fuerzas armadas, y guías para el diseño de controles y espacios de trabajo. Está redactado con mucha atención al detalle y, por el cuidado con el que se explica la información contenida, ha sido nuestra principal referencia para el diseño de nuestros experimentos.

Teniendo en cuenta las implicaciones que tiene el diseño del espacio de trabajo en la inmersión y otros aspectos psicológicos del usuario, hemos diseñado el entorno para las pruebas de una manera neutra y aséptica para no distraer la atención (ver Figura 5.1). El espacio es una sala de ocho metros de ancho y largo y dos metros y medio de alto. Esto nos permite tener suficiente amplitud para que los usuarios realicen nuestras pruebas, así como para evitar generar una sensación de agobio debido a un espacio reducido. El usuario estará

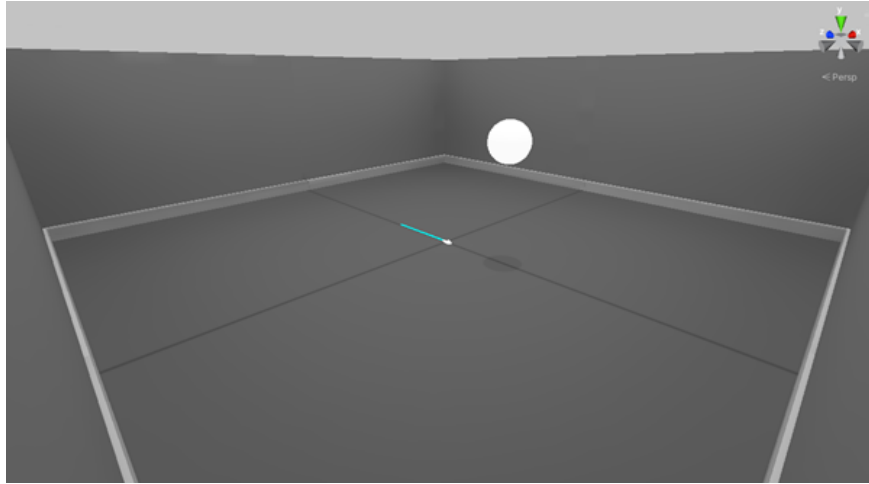


Figura 5.1: Vista del entorno digital de los experimentos.

ubicado en el centro de la sala y las pruebas aparecerán automáticamente en la posición diseñada frente a él. El suelo y las paredes son de un color gris claro, teniendo marcado el centro de la sala con unas líneas ligeramente más oscuras para ayudar al usuario a ubicarse. El techo está pintado con un color blanco. Hemos decidido incorporar un sutil ruido blanco de fondo para aislar de posibles sonidos externos sin que distraiga la atención.

Las dimensiones de nuestro entorno virtual no tienen por qué coincidir con las del entorno físico. Esto no nos supone un problema ya que los usuarios no necesitarán desplazarse por él. Aun así es importante mantener despejados los alrededores de posibles obstáculos o interferencias, por lo que las pruebas se realizarán en una sala cerrada para mantener las condiciones idóneas. Teniendo en cuenta el alcance máximo, como veremos más adelante, nos bastará con dejar un radio de 1,5 metros alrededor de la posición central.

Esta fase consta de dos experimentos independientes para mostrar a distintos sujetos de prueba. Aunque cada experimento enfoca una variante diferente, tienen características comunes. Por ejemplo, la única manera de interactuar con los controles es usar el gatillo del controlador, esta decisión la hemos tomado al ser el tipo de interacción observada en distintas aplicaciones de VR y que, además, es posible en los distintos dispositivos contemplados. Como queremos que la prueba esté lo menos sesgada posible, vamos a permitir que esta

acción se pueda realizar con cualquiera de los mandos en cualquier momento. Así será independiente de si los usuarios son zurdos, diestros o ambidiestros.

Para la toma de datos demográficos, pedimos que el usuario introduzca su altura poniéndose un controlador encima de la cabeza y pulsando el gatillo del controlador elegido; esto simplifica la toma de medidas introduciendo un error inferior a 2cm. Por último, solicitamos que registre su sexo; pulsando el gatillo izquierdo para el masculino y el derecho para el femenino. Esta información se realizará bajo nuestra supervisión para asegurarnos de que es introducida correctamente.

Hemos elegido un conjunto de controles básicos a implementar en ambas variantes: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor. Hemos seleccionado estos controles tras hacer un análisis de distintas interfaces de usuarios de videojuegos que tenemos en propiedad y otros que podemos encontrar en la página Game UI Database*. La implementación dependerá de la naturaleza de la prueba, que explicaremos posteriormente. Debido a las restricciones de espacio que nos proponen las guías de diseño de cada control y del banco de trabajo, que veremos más adelante, cada prueba tiene un número distinto de controles disponibles. La lista de controles y su cantidad es la siguiente:

- Botón (7): un único elemento con interacción directa.
- Palanca (3): requiere traslación de un elemento en el plano del control siguiendo unas guías.
- Dial (4): requiere rotación de un elemento en el eje normal al control.
- Deslizador (7): requiere traslación de un elemento en el eje longitudinal al control.
- Interruptor (7): similar al botón, pero con dos opciones de las cuales sólo puede estar activa una.

*<https://www.gameuidatabase.com/> Accedido: 2024-04-30

También hemos considerado importante la elección de colores. Hemos decidido seguir las guías de diseño ya citado ([Department of Defense of the United States of America, 2020](#)) para cada uno de los elementos clave. Usaremos colores grises o blancos para el entorno y elementos con los que no podemos interactuar. El color negro será para los bordes y estructuras necesarias en los controles. Cualquier elemento con el que se pueda interactuar estará coloreado en rojo. Junto a cada control, o las posiciones válidas del mismo, hay una luz para indicar las órdenes de la prueba y las interacciones del usuario con distintos colores. Estas luces tendrán color gris cuando estén apagadas, cian para indicar la acción realizada por el usuario y magenta para resaltar la orden actual dentro de una prueba. Enseñamos al usuario el código de colores durante un tutorial inicial y un paso de pruebas.

5.1.1. Controles diegéticos

Hemos diseñado el espacio de trabajo para realizar estas pruebas siguiendo las indicaciones del manual que hemos mencionado anteriormente ([Department of Defense of the United States of America, 2020](#)). Para ello hemos preparado un banco de trabajo en el que se colocarán los distintos controles. Este permite tener alcance suficiente a una amplia variedad de usuarios, desde el percentil 5 de la población femenina hasta el 95 de la masculina de la muestra presente en la guía. Aunque la población de nuestra muestra pueda no tener la misma distribución que la del manual, consideramos que es lo suficientemente amplia para nuestras pruebas ya que incluye una muestra de miles de individuos de distintas disciplinas y puede ser representativa de la población general.

El resultado de los cálculos, teniendo en cuenta las distintas medidas antropométricas como la altura y alcance, es una estructura de 1,535 metros de alto, 1,2 metros de ancho y 0,166 metros de fondo, posicionado a 0,5 metros del usuario (ver Figura 5.2).

Otro aspecto que debemos tener en cuenta en nuestros cálculos es la línea de visión de los usuarios, estrechamente relacionada con la altura. Aunque podamos ver la estructura completamente, la mejor posición para el centro del tablero es que esté quince grados por

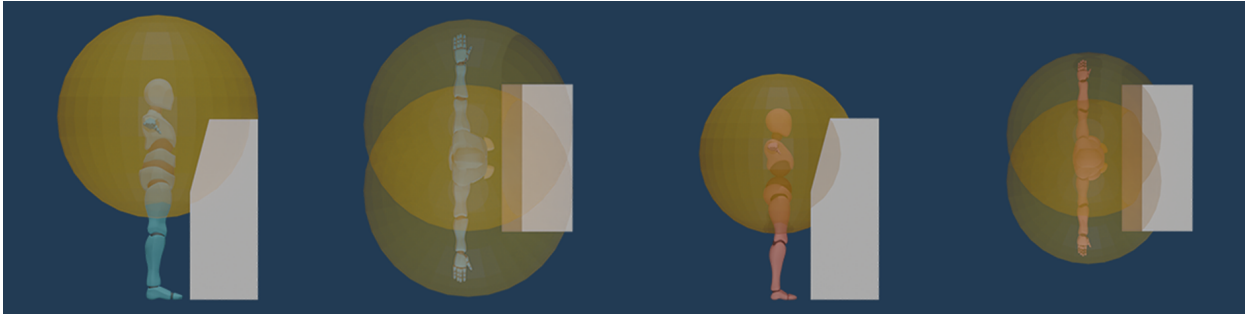


Figura 5.2: De izquierda a derecha, vistas lateral y superior del alcance para el percentil 95 % masculino y el 5 % femenino.

debajo de la línea horizontal del ojo. Aunque no es necesario, permitimos a los usuarios moverse libremente, el alcance y línea de visión pueden alterarse, dentro de unos límites de seguridad, a su voluntad. Esto permite a los usuarios posicionarse en la ubicación más cómoda que consideren.

Necesitamos que el usuario tenga sensación de presencia para que pueda interactuar correctamente, cada controlador está representado con una esfera blanca de diez centímetros de diámetro. Podemos clasificar cada control (ver Figura 5.3) en dos grupos, dependiendo del estado del controlador antes de interactuar con ellos. Los primeros (D1) requieren que el usuario pulse primero el gatillo y luego toque mientras que los segundos (D2) actúan al contrario, primero tocando y luego apretando el gatillo. Esta categorización se debe a la naturaleza de los controles y su necesidad de tener constancia de la presencia del usuario antes del contacto o después. Por ejemplo, si el botón funcionase como D2 no podríamos realizar una interacción empujando sino que sería instantánea y, de esta manera, no se comportaría como esperamos de ese control en la realidad física; además, este modo evita que hagamos interacciones accidentales por simple contacto.

- Botón (D1): para interactuar con este control debemos acercar la esfera del controlador y apretar dos centímetros para activarlo.



Figura 5.3: De izquierda a derecha, vistas de los controles diegéticos: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor.

- Palanca (D2): una vez activado sigue la posición del controlador sin salirse de los canales que sirven de guía. Si soltamos el gatillo se ubicará automáticamente en el punto de ancla más cercano.
- Dial (D2): cuando interactuamos con este control debemos girar la muñeca para trasladar ese giro al mango. Si soltamos el gatillo se ajustará al punto de ancla más próximo.
- Deslizador (D2): funciona como la palanca, pero solo en una guía vertical. El mango del control es más fino.
- Interruptor (D1): es una versión simplificada del botón, únicamente necesitamos tocar la posición que sobresale para interactuar.

5.1.2. Controles espaciales

Como ya hemos mencionado anteriormente, nuestra intención es que ambas variantes estén en igualdad de condiciones, esto incluye el entorno, código de colores, tipo de comportamiento y tamaños de los controles. Para ello, la variante espacial debe ocupar el mismo campo de visión, así como que todos los controles tengan el mismo tamaño a la vista que en la implementación diegética. Del mismo modo el usuario debe poder interactuar sin tener movimientos limitados ni realizar acciones que sean más complejas que en la variante diegética.

Al tratarse de una proyección en un plano dentro del entorno 3D de una interfaz clásica 2D, basta con hacer una regla de tres para obtener el tamaño proporcional para cada uno de los elementos a considerar. Para mantener esta coherencia vamos a proyectar la interfaz a 2 metros del lugar donde estará el usuario, y centrada a 1,25 metros sobre el suelo. De acuerdo con las medidas antropométricas, que hemos mencionado anteriormente, cualquier usuario podrá extender sus brazos sin llegar a tocar nunca el panel; de esta manera estaremos reforzando la interacción espacial. Los resultados de cálculos trigonométricos las distintas restricciones nos muestran que el panel contenedor de la interfaz debe medir 4,8 metros de ancho y 2,48 metros de alto.

La manera de seleccionar, en este caso, será una réplica de aquella que hemos observado en una variedad de aplicaciones como algunas que hemos mencionado anteriormente. Consiste en lo que podríamos llamar un puntero que proyectaremos desde el controlador hasta el lugar donde interseccione con la interfaz, estando representado por una línea continua en todo su recorrido. Cuando el extremo lejano al mando, del rayo que se proyecta, colisione con el panel el rayo se hará visible, permitiendo a los usuarios saber con precisión dónde están apuntando.

Para interactuar hemos optado por una adaptación de las interfaces clásicas que sería el clic del ratón, en este caso pulsando el gatillo del dedo índice. La variante diegética y espacial comparten la misma manera de interactuar y así evitamos mayores diferencias.

En esta implementación, como en la diegética, podemos clasificar los controles (ver Figura 5.4) dependiendo del tipo de interacción. Vamos a llamar E1 a aquel control que solo necesite un clic para interactuar y E2 al control que necesite que el usuario mantenga pulsado el gatillo mientras mueve el puntero para que la interacción siga teniendo efecto. Esto se justifica igualmente por la naturaleza de los controles, E2 nos permite arrastrar elementos de la interfaz dentro de unos límites definidos.

- Botón (E1): apuntar al control y pulsar el gatillo.



Figura 5.4: De izquierda a derecha, vistas de los controles espaciales: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor.

- Palanca (E2): apuntar al mango del control, pulsar el gatillo y mantenerlo pulsado mientras se mueve el controlador. Seguirá al puntero limitado a los canales. Se fijará al punto de anclaje más cercano si el usuario suelta el gatillo.
- Dial (E2): apuntar al mango del control, pulsar el gatillo y mantenerlo pulsado mientras se mueve el controlador. Si movemos el puntero alrededor del control, el dial girará. Se fijará al punto de anclaje más cercano si el usuario suelta el gatillo.
- Deslizador (E2): similar a la palanca, pero únicamente con movimiento vertical.
- Interruptor (E1): el funcionamiento es como el de un botón que tiene dos posiciones de contacto, una encima de la otra.

5.1.3. Flujo del experimento

Antes de comenzar el experimento le explicamos de manera oral a cada sujeto de la prueba el objetivo y procedimiento que vamos a seguir, leyendo el contenido redactado en la hoja informativa y, como requisito para poder continuar, debe firmar un consentimiento informado (ver Anexo G).

Cuando lancemos la aplicación, cuyo ejecutable dependerá de la variante de interfaz a comprobar, siempre seguirá el mismo flujo. En primer lugar, mostramos un tutorial para enseñar al usuario cómo se interactúa con la interfaz y el flujo de las pruebas. Entonces, para cada control, hay una secuencia de dos pasos: primero, el usuario tiene la oportunidad

de probar el control sin órdenes ni límite de intentos y segundo, cuando comprenden el funcionamiento avanzan al siguiente paso que es hacer la prueba cronometrada.

Para avanzar en cada uno de los pasos del experimento, el usuario debe interactuar con una esfera que se encuentra flotando a su espalda. Esto evita interacciones accidentales y la diferencia de las interfaces de usuario que vamos a analizar. Durante el tutorial inicial explicamos la ubicación y funcionamiento de este elemento.

Cada prueba presenta una secuencia aleatoria de órdenes para interactuar con un control del banco cada vez, hasta que no introduzcan la selección correcta la prueba no muestra el siguiente control de la secuencia. La orden resalta el estado final de un control, mediante una luz indicadora, para que el usuario interactúe con él y lo ajuste. Cuando ha completado las pruebas para todos los controles, registraremos los datos de altura y sexo siguiendo el proceso indicado en el diseño (ver Figura 5.5).

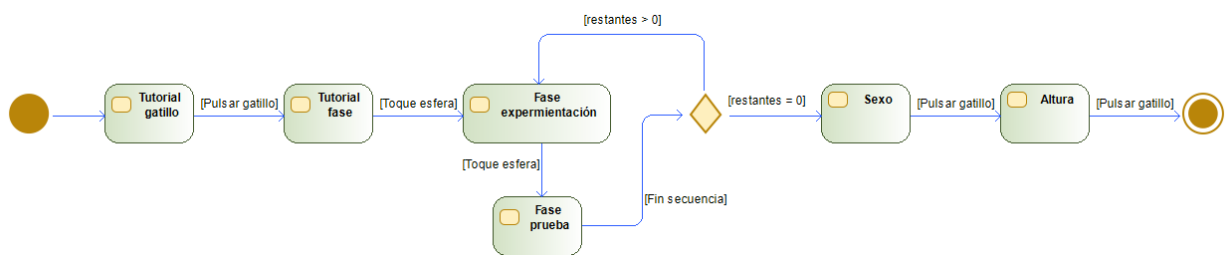


Figura 5.5: Diagrama de flujo de la aplicación en la primera fase. Fuente: Propia

Nos vamos a centrar en medir la eficiencia de cada variante, para ello vamos a cronometrar el tiempo que lleva cada prueba de un control, sin contar con la fase de experimentación; así como el número de fallos (Lewis y Norman, 1995) acumulados. La manera en la que mediremos la altura no es exacta, pero es lo suficientemente aproximada ya que nos da un margen de error de dos centímetros.

Aunque el flujo de la aplicación está pensado para fomentar el autoaprendizaje y autonomía del usuario, vamos a supervisar los experimentos, dando a los usuarios información solamente si no entienden el funcionamiento de un control y para asegurarnos que completan

el experimento correctamente. Igualmente, tendremos cuidado de que envíen la información demográfica sin errores ya que esto invalidaría la prueba.

5.2. Desarrollo

Dada nuestra familiaridad con la herramienta, hemos decidido desarrollar nuestro experimento en Unity Engine[†]. Este entorno de desarrollo integrado nos permite crear videojuegos y otras aplicaciones gracias a la programación de código propio usando el lenguaje C#[‡]. Igualmente se encarga de la compatibilidad con varios dispositivos de VR (OpenXR y Meta Quest entre otros) y plataformas por lo que simplifica el despliegue reduciendo las limitaciones que pudiéramos tener a la hora de disponer de hardware para realizar nuestras pruebas.

Aunque dispone de un sistema de interfaces propio que no se ajusta a nuestros requisitos, mediante este lenguaje de programación, y una amplia librería de funciones y funcionalidades disponibles, podemos programar interfaces con comportamientos diferentes a los ofrecidos por Unity reutilizando parte del proceso. Durante el desarrollo de esta tesis hemos visto como los creadores de la herramienta han contribuido con el añadido de mejoras orientadas a XR. De estas mejoras, destacamos algunas que nos han sido más útiles como la ubicación en el entorno digital, la configuración de entrada del usuario y mecanismos de interacción genéricos con elementos digitales.

Otra ventaja de usar este entorno es que nos proporciona la posibilidad de usar una librería propia para la captura de información llamada Unity Analytics[§]. Aunque hay una serie de eventos predefinidos, también nos permite enviar eventos registrados en ejecución mediante la llamada a la función `CustomEvent`, proporcionándole como argumentos el nombre del evento y los valores que queremos almacenar. Estos datos se envían automáticamente a una base de datos, propiedad de la empresa Unity Technologies, que se puede consultar

[†]<https://www.unity.com> Accedido: 2024-04-30

[‡]<https://learn.microsoft.com/dotnet/csharp/> Accedido: 2024-04-30

[§]<https://unity.com/products/unity-analytics> Accedido: 2024-04-30

accediendo al portal web del servicio donde podemos ver estadísticas básicas y filtrar ciertos datos. En ese mismo portal podemos hacer una descarga en formato hoja de cálculo para que los procesemos posteriormente en el software a nuestra elección.

5.2.1. Arquitectura

En primer lugar nos hemos ceñido a la arquitectura interna de Unity, pero, al tratarse de unos mismos controles con diferentes implementaciones, hemos desarrollado una arquitectura que nos permita, mediante herencia de clases, mantener una estructura común para la gestión de las pruebas, independientemente de la naturaleza de estas. Esto nos permitirá simplificar para esta primera fase, así como la implementación de nuevas propuestas más adelante sin tener que modificar la estructura principal de la aplicación. De esta manera podremos depurar y corregir errores de programación una sola vez para todas las variantes. Las únicas entidades diferenciadas serán los propios controles, como explicaremos más adelante.

En primer lugar, es necesario que exponamos ciertas definiciones de arquitectura relativas al uso de Unity para el desarrollo. Este entorno propone una arquitectura denominada “por componentes” (Vohera et al., 2021), lo que significa que hay unos objetos o entidades que funcionan como agregadores de comportamientos. En nuestro caso se trata de la clase `GameObject`, que actúa como contenedor, y que se utiliza para todos los objetos que vaya a existir en una escena de juego. De cara a los componentes, podemos utilizar los suministrados por la herramienta, pero si queremos crear nuestros propios comportamientos para agregarlos a un `GameObject` debemos hacerlo derivando de la clase abstracta `MonoBehaviour`. Una peculiaridad es que un `GameObject` debe residir en una escena, si bien podemos crear plantillas llamadas `Prefabs` dentro de los recursos del juego para poder crear copias en tiempo de ejecución. Con esto podemos crear patrones para los bancos de trabajo y los distintos controles sin tener que asignarlos inicialmente en la escena sino que lo hacemos en el momento en que se carga una de las pruebas.

Otro elemento importante es el denominado `ScriptableObject`. En este caso, crear una clase derivada de esta nos permite crear un archivo en los recursos del proyecto que sirve principalmente como almacén de información, pero que también puede tener cierto comportamiento. Se puede utilizar para tener una colección de parámetros con los que luego configurar un `GameObject`, como es nuestro caso, aunque también permite usarlo como intermediario para comunicación entre objetos independientemente de la escena actual.

Una vez aclaradas estas definiciones relativas al motor Unity podemos abordar la explicación de la arquitectura general separándola en dos apartados. Siendo el primero el relativo a la gestión de las pruebas y el segundo sobre los distintos controles y la interacción con ellos.

Gestión de las pruebas

En la escena hemos ubicado un `GameObject` con el componente propio `TestManager` cuya función es cargar el experimento diagético o espacial según lo tengamos configurado en el proyecto (ver Figura 5.6). La información del conjunto de prueba se ubica dentro de un `ScriptableObject` que contiene el lugar donde ubicar el banco de trabajo y su orientación, así como las distintas pruebas a realizar y la cantidad de controles contenidos en cada una, longitud de secuencia y `Prefab` del control que se utiliza. Con esta configuración se crea una copia del `Prefab` del banco de trabajo y se rellena con lo indicado en la clase `TestSetup` de la prueba actual. Con él se crea también un `GameObject` con el componente `Test` que se encargará de gestionar el registro de los tiempos y fallos de la prueba gracias a la comunicación que tiene con el componente derivado de `ControlBase` que tendrán todos los `Prefabs` de los controles de ambas propuestas.

Controles e interacción

El componente `ControlBase` es el que gestiona la interacción del usuario, se trata de una clase abstracta para permitir generalización en los distintos métodos (ver Figura 5.7). De ella derivan `VRControllerBase` y `UIControllerBase` que implementan comportamientos

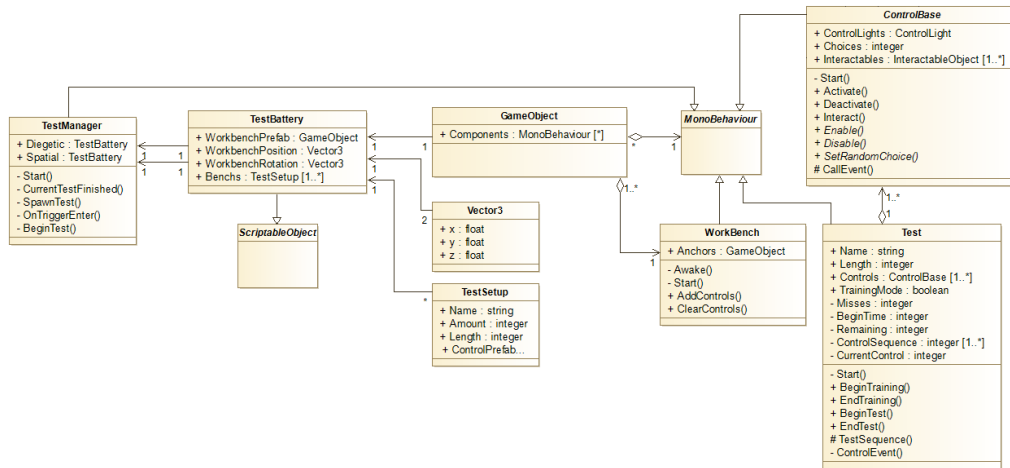


Figura 5.6: Diagrama de clases relativo a la gestión de las pruebas. Fuente: Propia

propios que comparten los controles de las propuestas diagética y espacial respectivamente. Elegimos esta nomenclatura para identificar si la implementación era completamente propia (diagético) o utilizaba parte del sistema de interfaces de usuario incluido en Unity.

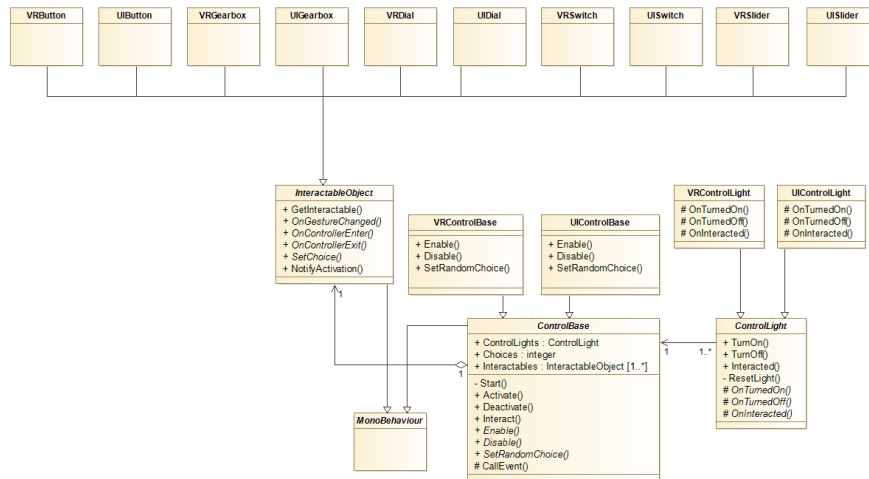


Figura 5.7: Diagrama de clases de la jerarquía de controles. Fuente: Propia

A la hora de transmitir órdenes y resultados nos es necesario crear unos Prefabs con las luces en ambas variantes. Para ello creamos un componente **ControlLight** junto con sus implementaciones específicas **VRControlLight** y **UIControlLight** que se encargarán de

gestionar la retroalimentación visual en la interacción con los controles y la transmisión del siguiente control activado en la secuencia de la prueba, siguiendo el código de colores especificado en el diseño.

Cada control hace uso de un conjunto de `InteractableObject` cuyo número y tipo son dependientes, como siempre, del control y la propuesta. Estos serán objetos incluidos dentro del control y tendrán una representación visual que corresponde con las partes del control con las que se pueda interactuar. Por ejemplo: en la palanca diagética, el pomo que el usuario puede agarrar es su `InteractableObject`.

Por último, vamos a definir el modo que tiene el usuario de comunicarse con los objetos interactivables de la escena (ver Figura 5.8). Habrá un `GameObject` que hará un seguimiento en tiempo real de la posición y rotación de los controladores. Dicho objeto tendrá asignado el componente `VRController` que se encargará de gestionar la interacción del usuario con los distintos botones y gatillos del controlador del dispositivo de VR. Este componente deriva del incluido en Unity llamado `XRController`, pero nos aporta mayor control sobre la información recibida del controlador.

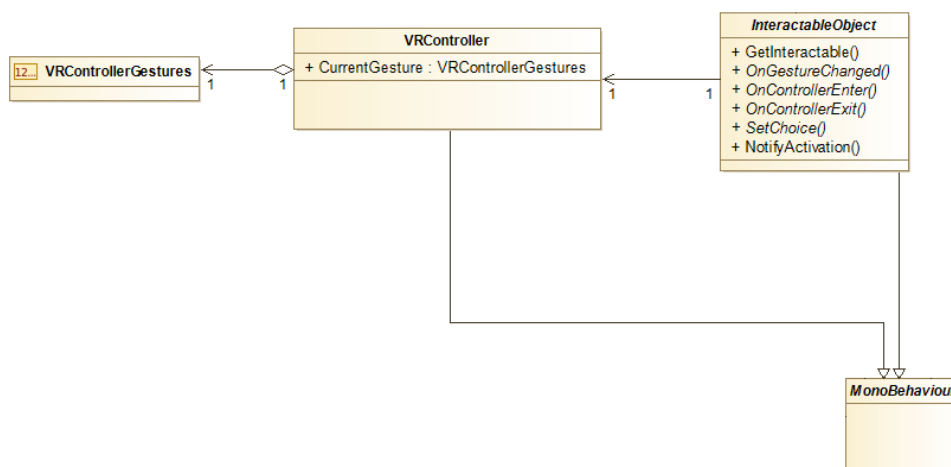


Figura 5.8: Diagrama de clases de controlador con interactivables. Fuente: Propia

Esta información recibida es crucial ya que, dependiendo de la combinación de controles físicos con los que el usuario ha interactuado, asignará un gesto dentro de aquellos definidos

en el enumerado `VRControllerGestures`. Los gestos válidos para interactuar van asignados en cada control de tal manera que cuando el usuario ejecute una combinación notificará, si lo hay, al interactuable con el que esté en rango.

El sistema de gestos es clave para el funcionamiento, dado que si el gesto es uno de los válidos procederá a realizar la acción correspondiente a la interacción y si, por el contrario, no se encuentra dentro de los permitidos, pasará a deseleccionar el interactuable. En esta fase inicial dispondremos de un único gesto consistente en apretar el gatillo del controlador, pero nos permite expandirlo para el desarrollo posterior.

Podemos comprender mejor el funcionamiento del método de interacción si observamos una posible secuencia de uso de uno de los controles (ver Figura 5.9).

En primer lugar, el usuario debe seleccionar un interactuable. A continuación, ejecuta un gesto que es notificado a dicho interactuable, si es el adecuado para dicho control notificará al control en el que se ubique este elemento para que ilumine la luz correspondiente dando retroalimentación de lo sucedido al usuario. Por último, deselecciona el control. La secuencia no tiene por qué completarse, el usuario puede seleccionar un interactuable y deseccionarlo sin llegar a operar con él.

5.2.2. Realización de las pruebas

Nuestra intención inicial fue plantear el desarrollo de las pruebas para que las realizaran los usuarios de manera remota usando sus propios dispositivos, con esto pretendíamos facilitar la recogida de datos. Sin embargo, nos enfrentamos a varios problemas. Por un lado la falta de muestra debida a la disponibilidad de dispositivos y alcance de la convocatoria, pero también la cantidad de resultados parciales o erróneos. Por ello, decidimos realizar sesiones presenciales de los experimentos en cuanto las condiciones sanitarias nos lo permitieron, algo que retrasó nuestra planificación inicial.

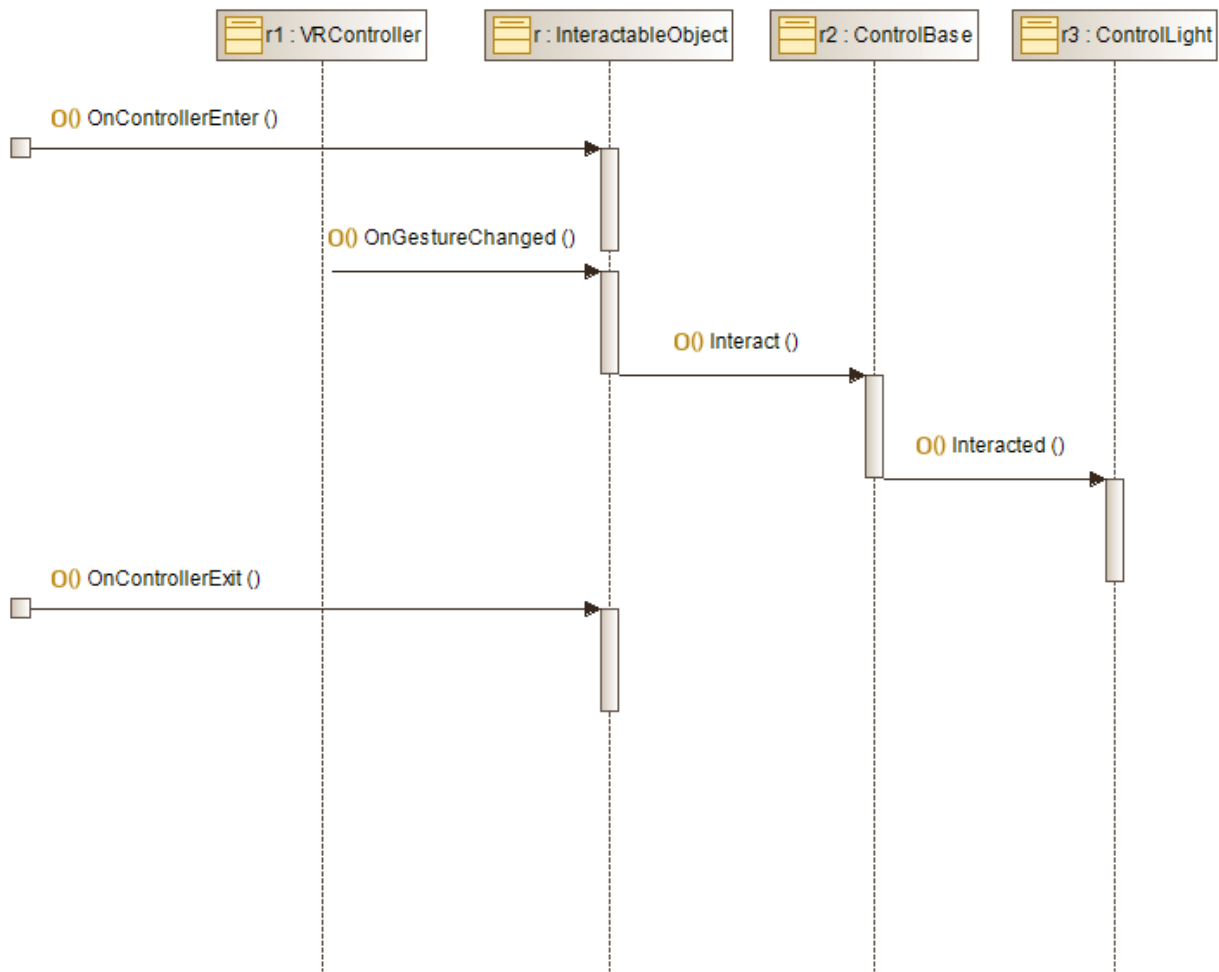


Figura 5.9: Diagrama de clases de controlador con interactivables. Fuente: Propia

Aprovechando la relación profesional con la Universidad Francisco de Vitoria (Madrid, España) colaboramos con la sociedad de alumnos de videojuegos Level Up¹ para que aumentara la difusión de las sesiones y, así, captar a más sujetos de prueba. Estas estuvieron abiertas a cualquiera que quisiera participar, habilitamos un registro previo, pero la participación era posible con solo acudir a la prueba. Estas sesiones tuvieron lugar en un laboratorio del campus de la Universidad Francisco de Vitoria en días distintos para la variante diegética y la alternativa espacial.

¹<https://www.ufv.es/la-universidad/sociedades-y-clubes/levelup-videojuegos/> Accedido: 2024-04-30

5.3. Análisis de resultados

Para poder realizar el análisis de los datos obtenidos nos hemos decantado por utilizar la herramienta R[¶], en particular mediante el IDE RStudio^{**}. Los principales motivos de esta elección son que ambos programas son gratuitos y que se utilizan en el entorno del cálculo estadístico. Podemos importar el conjunto de datos directamente desde la descarga de Unity Analytics, realizar los análisis con el modelo estadístico correspondiente y generar gráficos para visualizar los resultados. El uso de RStudio no es obligatorio, pero lo recomendamos ya que simplifica el tratamiento de los datos, y la gestión del historial de operaciones y gráficos.

En primer lugar realizaremos un análisis exploratorio mediante una matriz de dispersión (ver Anexos F.1) para cada combinación de controles y altura. El objetivo principal es observar posibles asociaciones entre los tiempos de interacción de los usuarios y el tipo de interacción. Podemos afirmar estadísticamente que existen correlaciones significativamente positivas entre los tiempos de duración de las pruebas de cada control (ver Tabla 5.1). Esto significa que si un sujeto tarda mucho en realizar una prueba igualmente le llevará más tiempo completar las de los demás controles, demostrando la coherencia de los resultados.

	Altura	Botón	Palanca	Dial	Deslizador	Interruptor
Altura	1	-0,114	-0,096	-0,021	-0,249*	-0,163
Botón	-0,114	1	0,385**	0,342**	0,481**	0,582**
Palanca	-0,096	0,385**	1	0,617**	0,378**	0,265*
Dial	-0,021	0,342**	0,617**	1	0,525**	0,304**
Deslizador	-0,249*	0,481**	0,378**	0,525**	1	0,516**
Interruptor	-0,163	0,582**	0,265*	0,304**	0,516**	1

Tabla 5.1: Matriz del Coeficiente de correlación de Pearson entre controles. Nota: *p < 0,05. **p < 0,01.

Al mismo tiempo, en la fase descriptiva de los datos, hemos verificado la posible existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de ejecución de los cinco controles y el sexo del usuario (ver Tabla 5.2).

¶ <https://www.r-project.org/> Accedido: 2024-04-30

** <https://posit.co/products/open-source/rstudio/> Accedido: 2024-04-30

Control	Sexo	N	Media	Desviación típica
Botón	Femenino	26	11,48968	7,83205
	Masculino	48	9,54020	3,12420
Palanca	Femenino	26	19,40365	6,49410
	Masculino	48	18,12562	3,76968
Dial	Femenino	26	16,72560	8,82735
	Masculino	48	17,45045	7,82160
Deslizador	Femenino	26	10,60306	3,27309
	Masculino	48	10,93895	3,00452
Interruptor	Femenino	26	9,99074	6,58019
	Masculino	48	9,03384	4,03967

Tabla 5.2: Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control.

Para comprobar diferencias hemos realizado una prueba de Levene que nos confirme si ambos grupos a comparar, masculino y femenino, tienen varianza equivalente (homocedasticidad o igualdad de varianzas). Dado que todos los p-valores son mayores a 0,05 no podemos rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad (ver Tabla 5.3). Con los datos que hemos recopilado para el T-test (T de Student) de muestras independientes no hay diferencias estadísticamente significativas entre el tiempo de la prueba y el sexo de los participantes ($p\text{-valor} > 0,05$) para ningún control.

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	0,233	1,94948	-1,32282	5,22168
Palanca	0,287	1,27802	-1,09605	3,65211
Dial	0,717	-0,72446	-4,69754	3,24862
Deslizador	0,658	-0,33588	-1,84088	1,16911
Interruptor	0,441	0,95690	-1,50332	3,41711

Tabla 5.3: Prueba de muestras independientes por sexo. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia.

Aunque el sexo no parece ser una variable que muestre unas diferencias significativas durante la interacción, si comparamos el rendimiento atendiendo al tipo de interacción diagética o espacial (ver Tabla 5.4), encontramos diferencias significativas en el control dial, seguramente por el diseño de interacción planteado.

Control	Tipo	N	Media	Desviación típica
Botón	Diegético	41	10,03901	5,81495
	Espacial	33	10,45641	4,67920
Palanca	Diegético	41	18,69009	5,65589
	Espacial	33	18,43123	3,82827
Dial	Diegético	41	19,38462	9,88311
	Espacial	33	14,47660	3,89219
Deslizador	Diegético	41	11,12806	3,40337
	Espacial	33	10,43935	2,63401
Interruptor	Diegético	41	8,80194	5,63401
	Espacial	33	10,07589	4,20450

Tabla 5.4: Datos de muestra, medias y desviación típica por variante y control.

A la vista de los datos parece existir una diferencias en los tiempos. Para confirmar la sospecha, realizamos un T-test de muestras independientes después de confirmar la igualdad de varianzas (homocedasticidad) para comparar ambos grupos (diegético and espacial). Dado que el resultado de la prueba de T de Student muestra un p-valor=0,009 (ver Tabla 5.5), podemos confirmar que hay diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de duración del control dial y el tipo de interfaz. Vemos que hay una diferencia en el tiempo medio de casi cinco segundos (4,90s) a favor de la interacción espacial (14,48s) comparada con la diegética (19,38s).

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	0,739	-0,41739	-2,90694	2,07216
Palanca	0,823	0,25885	-2,03861	2,55631
Dial	0,009	4,90796	1,26688	8,54903
Deslizador	0,343	0,68863	-0,74976	2,12702
Interruptor	0,284	-1,27401	-3,62772	1,07969

Tabla 5.5: Prueba de muestras independientes por variante. T-test para igualdad de medias. Nota: 95% de intervalo de confianza de la diferencia.

La baja incidencia en la cantidad de fallos en las pruebas no nos permite realizar ningún análisis estadístico por sí mismo, aunque posteriormente realizaremos un análisis descriptivo

para localizar los controles y variantes con mayores casos y poder postular unas posibles causas gracias a las observaciones realizadas durante la supervisión de los experimentos.

5.3.1. Interacción diegética

Si comprobamos los datos segmentados para este tipo de interacción y sexo (ver Tabla 5.6), no encontramos ninguna diferencia estadísticamente significativa entre la duración de las pruebas y el sexo. Esto lo hemos realizado mediante un T-test de muestras independientes ($p\text{-valor} > 0,05$) (ver Tabla 5.7).

Control	Sexo	N	Media	Desviación típica
Botón	Femenino	13	11,86516	9,17369
	Masculino	28	9,19116	3,21562
Palanca	Femenino	13	19,41781	8,73121
	Masculino	28	18,35223	3,62438
Dial	Femenino	13	18,97579	11,64170
	Masculino	28	19,57444	9,18434
Deslizador	Femenino	13	10,63725	3,55219
	Masculino	28	11,35593	3,37373
Interruptor	Femenino	13	9,35495	8,41671
	Masculino	28	8,54519	3,91401

Tabla 5.6: Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control diegético.

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	0,325	-2,67400	-2,96065	8,30865
Palanca	0,581	1,06559	-2,80746	4,93863
Dial	0,859	-0,598646	-7,39045	6,19316
Deslizador	0,536	-0,71868	-3,04686	1,60951
Interruptor	0,674	0,80976	-3,05447	4,67400

Tabla 5.7: Prueba de muestras independientes diegética. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia.

5.3.2. Interacción espacial

En este caso (ver Tabla 5.8), al igual que en la variante diegética, no podemos encontrar diferencias significativas según el sexo. Si hacemos un nuevo T-test de muestras independientes (ver Tabla 5.9) podemos comprobar todos los p-valores son mayores a 0,05 por lo que no podemos rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad.

Control	Sexo	N	Media	Desviación típica
Botón	Femenino	13	11,11420	6,58267
	Masculino	20	10,02885	3,00331
Palanca	Femenino	13	19,38948	3,40979
	Masculino	20	17,80837	4,03775
Dial	Femenino	13	14,47619	3,98016
	Masculino	20	14,47687	3,93816
Deslizador	Femenino	13	10,56887	3,11424
	Masculino	20	10,35517	2,35390
Interruptor	Femenino	13	10,62653	4,29991
	Masculino	20	9,71796	4,21349

Tabla 5.8: Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control espacial.

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	0,524	1,08535	-2,34602	4,51671
Palanca	0,253	1,58111	-1,18505	4,34727
Dial	1,000	-0,00068	-2,87401	2,87265
Deslizador	0,824	0,21370	-1,72923	2,15663
Interruptor	0,553	0,90857	-2,17742	3,99456

Tabla 5.9: Prueba de muestras independientes espacial. T-test para igualdad de medias. Nota: 95% de intervalo de confianza de la diferencia.

5.3.3. Análisis descriptivo de los controles

Una vez concluido el análisis estadístico de los datos, pasaremos a hacer una exploración descriptiva de los controles para poder contrastar de una manera visual los hallazgos.

Botón

En el caso del botón podemos comprobar (ver Figura 5.10) se comportan de una manera similar, aunque hay algo más de dispersión en el caso del control diegético.

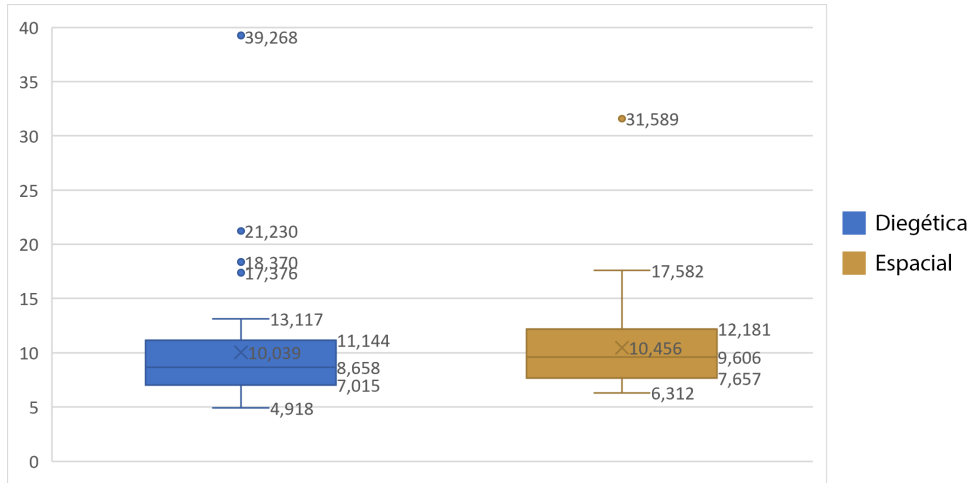


Figura 5.10: Diagrama de caja de los tiempos del botón.

La comparación de fallos entre ambas propuestas (ver Figura 5.11) nos muestra que hay una mayor incidencia en el control espacial.

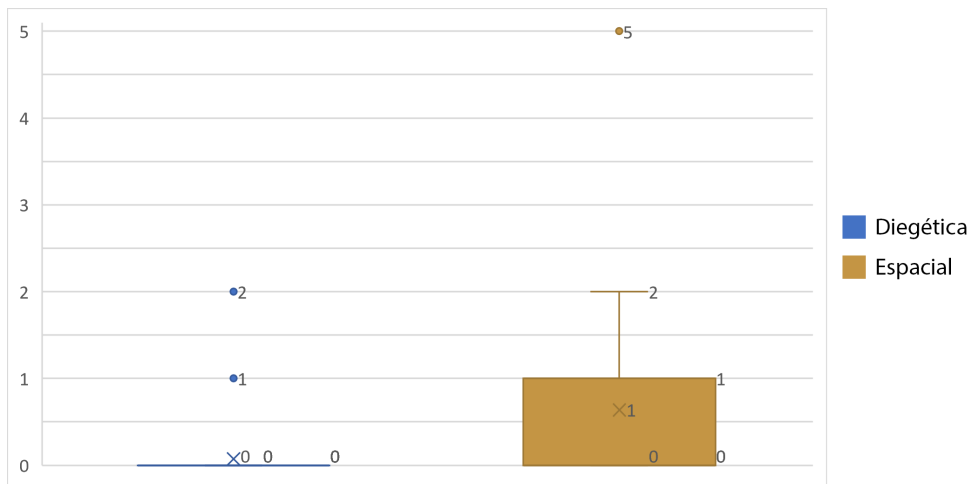


Figura 5.11: Diagrama de caja de los fallos del botón.

Palanca

Este control muestra un rendimiento muy similar en ambos casos (ver Figura 5.12). Podemos ver un dato extremo en el caso del control diegético que se trata de un sujeto que tardó mucho en todas las pruebas.

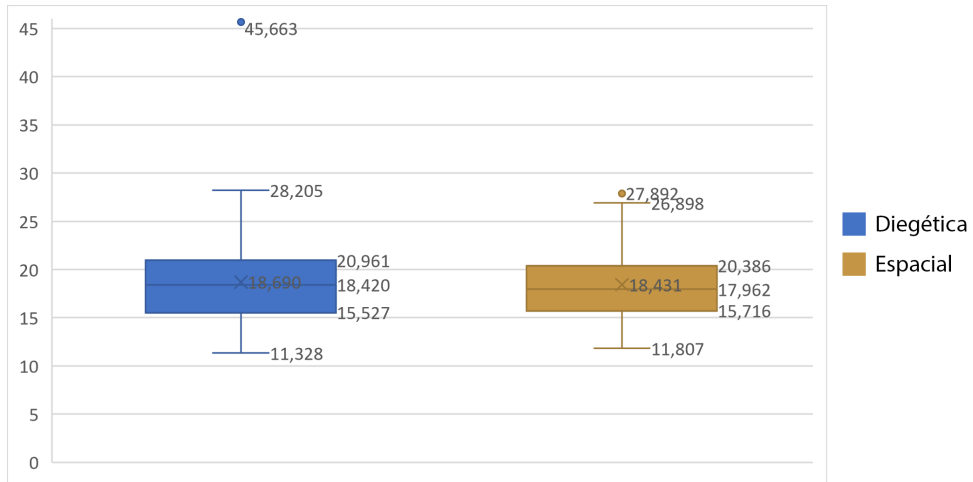


Figura 5.12: Diagrama de caja de los tiempos de la palanca.

Los fallos en ambas variantes de este control podemos considerarlos inexistentes.

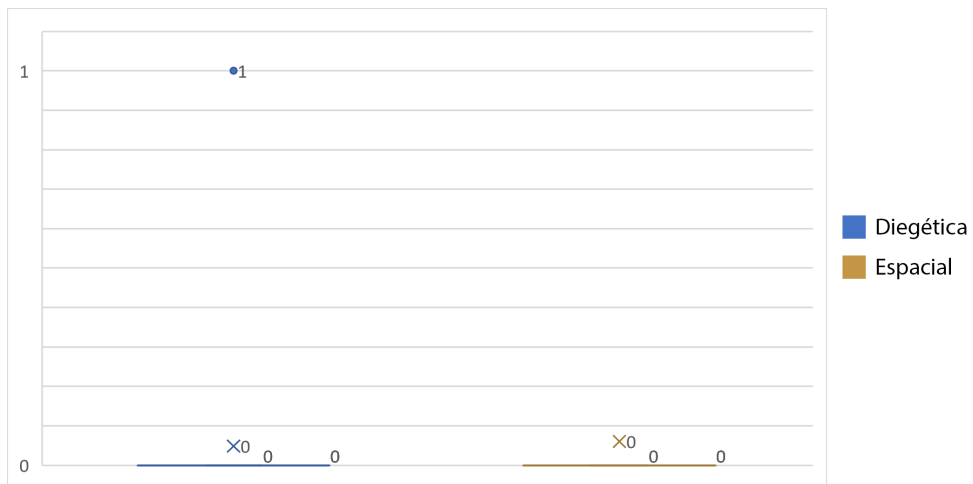


Figura 5.13: Diagrama de caja de los fallos del palanca.

Dial

Aquí pudimos encontrar unas diferencias significativas entre ambos controles (ver Figura 5.14). Si bien el extremo inferior es similar en las dos variantes, el control diegético muestra peor eficiencia en los resultados.

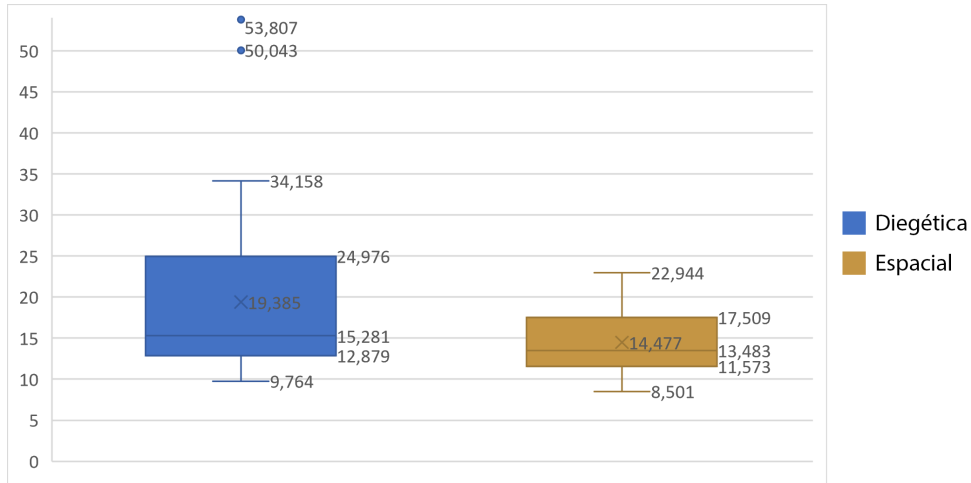


Figura 5.14: Diagrama de caja de los tiempos del dial.

Vemos que la diferencia que hemos detectado en los tiempos también tiene una incidencia en los fallos, siendo superior en el caso diegético y prácticamente inexistente en el espacial.

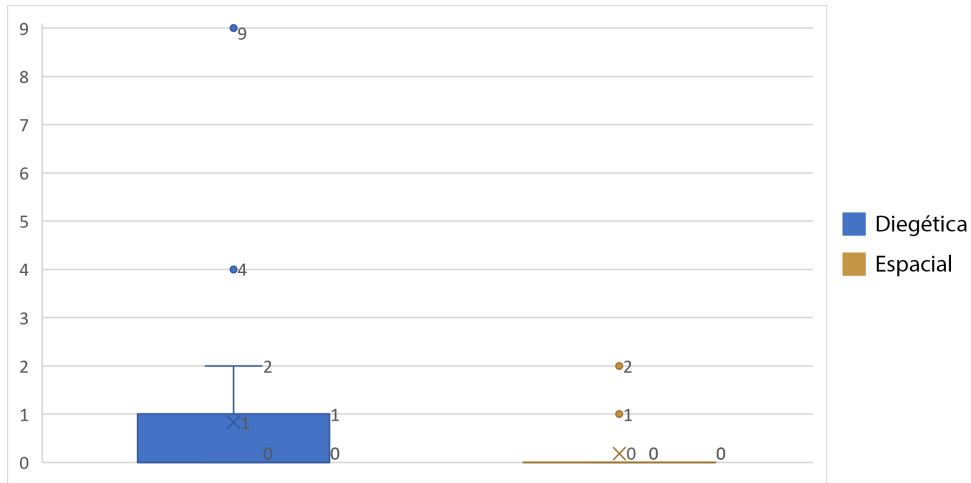


Figura 5.15: Diagrama de caja de los fallos del dial.

Deslizador

Al igual que sucedía con la palanca, este control se comporta de manera similar (ver Figura 5.16). Aun así podemos apreciar una dispersión más marcada en el caso del control diegético.

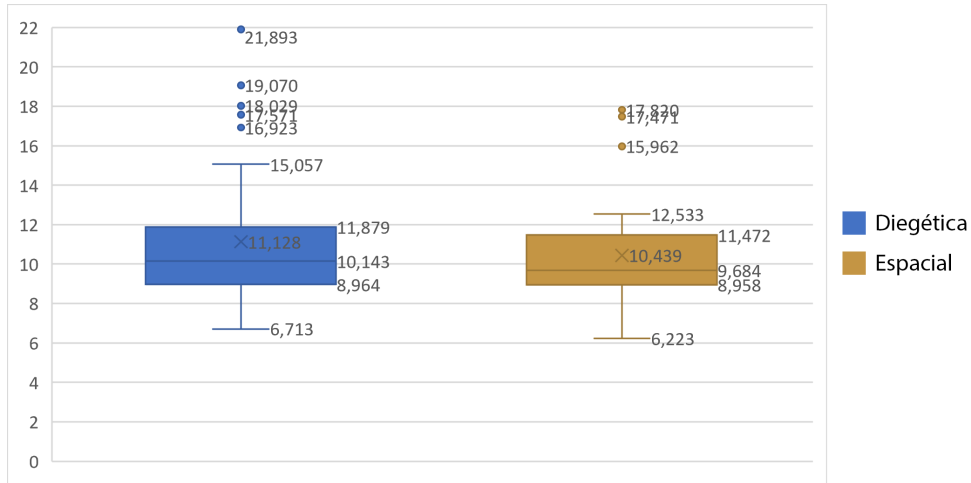


Figura 5.16: Diagrama de caja de los tiempos del deslizador.

En este caso ambas implementaciones muestran una incidencia de fallos que podemos ignorar ya que no aporta información (ver Figura 5.17).

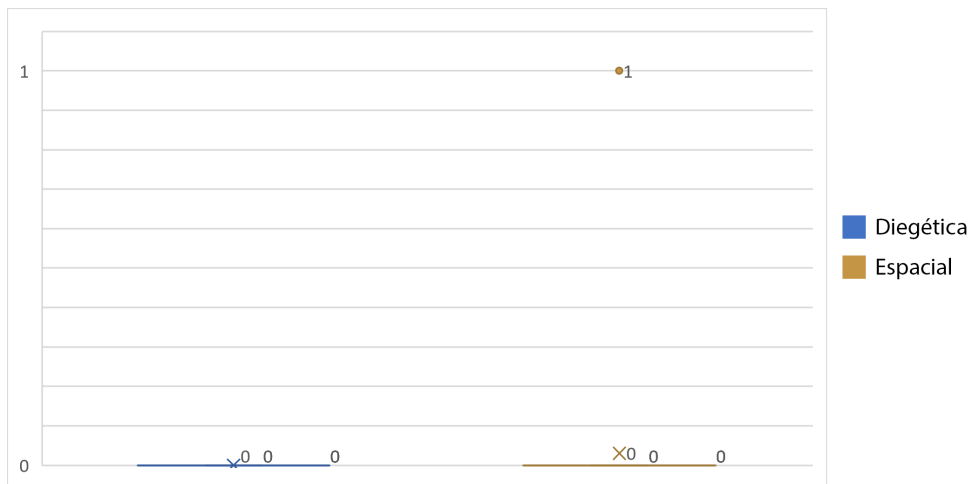


Figura 5.17: Diagrama de caja de los fallos del deslizador.

Interruptor

Este último control muestra datos muy similares (ver Figura 5.18). Aunque no se encontraron diferencias estadísticas, también podemos apreciar que los resultados del control diegético son ligeramente mejores que la variante espacial.

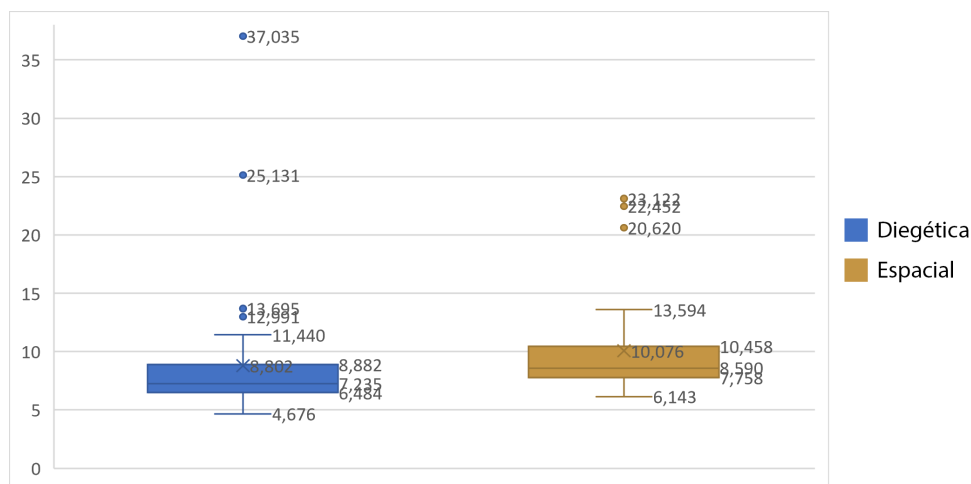


Figura 5.18: Diagrama de caja de los tiempos del interruptor.

Aunque en general las dos variantes son iguales (ver Figura 5.19), hay un par de casos extremos en el caso diegético.

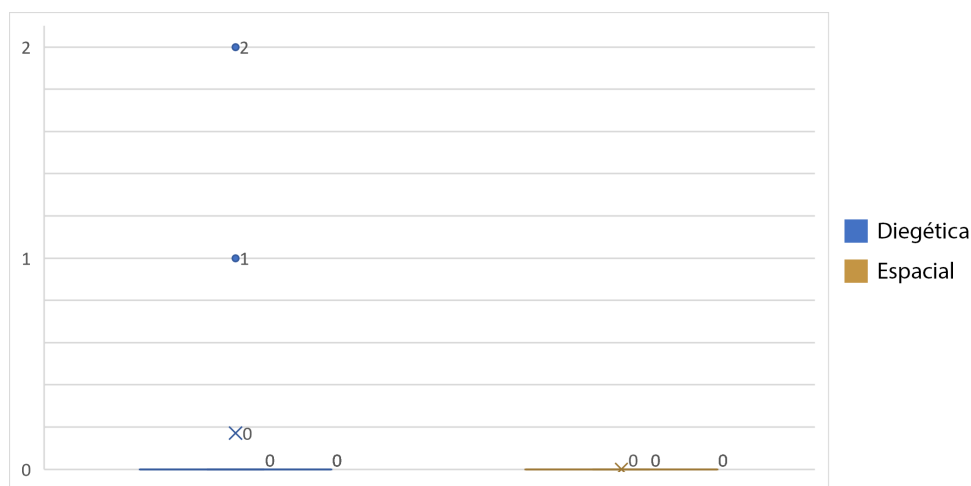


Figura 5.19: Diagrama de caja de los fallos del interruptor.

5.4. Discusión

Durante esta fase hemos conseguido una muestra lo bastante grande como para realizar un análisis estadístico, pero la representación del sexo femenino no ha sido lo suficientemente amplia como para permitirnos obtener conclusiones sólidas con este parámetro. Gracias al proceso diseñado sería posible replicar el experimento para obtener una mayor cantidad de muestras con este sexo y así poder resolver las dudas. Sin embargo, los datos existentes nos indican que las posibles relaciones existentes dependen de la altura del usuario principalmente y no al sexo de este.

Aunque en términos generales hemos comprobado que hay uniformidad entre las variantes, controles, sexo y altura; debemos destacar algunos casos particulares para aventurarnos a sugerir posibles causas de las diferencias.

En el primer caso, los resultados nos muestran que el control dial en su variante espacial tiene una ventaja significativa respecto al diegético, creemos que esto puede ser debido a la implementación. El primero requiere que el usuario apunte e interactúe, siguiendo la posición del puntero, aunque este salga del control. El segundo intenta, dada su naturaleza, asemejarse más a la realidad física y necesita que el usuario interactúe y gire la muñeca hasta la posición indicada. Este giro es un movimiento más restrictivo desde un punto de vista ergonómico que el movimiento permitido por todo el brazo en el apunte. Debido a esto, los usuarios realizan varios movimientos parciales del control hasta llegar al objetivo. Esto se refleja en una mayor incidencia de fallos debidos a estas posiciones intermedias antes de llegar a la final. Por tanto, esta manera de interactuar, aunque parta de la búsqueda de un mayor realismo, genera una clara desventaja y deberá tenerse en cuenta para la siguiente fase.

Otro dato que nos gustaría destacar es que el control deslizador diegético muestra una ventaja para personas de mayor estatura, no siendo así en el caso espacial. Es posible que los usuarios más altos tienen una mejor visión del banco de trabajo o que el alcance de los controles es más rápido teniendo en cuenta que la altura del tablero es igual para todos

los usuarios. Esto no sucede en la variante espacial ya que se proyecta en la distancia y es posible visualizarlo completamente independientemente de la altura del usuario. Debemos tener en cuenta también este caso de cara a la próxima implementación.

Por otro lado, parece que podemos descartar el sexo como una variable para tener en cuenta. Todos los resultados nos muestran que no hay relación entre este y los tiempos. Aunque hay diferencias antropométricas entre el sexo femenino y el masculino, estas suelen ser debidas a la altura y el resto de las medidas que aplican en nuestro diseño son proporcionales a ella.

Resumiendo lo visto en este capítulo, hemos comprobado que no hay diferencias significativas entre las variantes diegética y espacial para ningún control salvo el dial, caso que ya hemos analizado. Estos resultados nos demuestran que la elección de un tipo de interfaz u otro no atiende a factores de eficiencia. Esto significa que la decisión queda a la elección de los diseñadores, que deben tener en cuenta otros factores como es la inmersión que alcance cada variante, respondiendo a nuestra pregunta inicial.

Capítulo 6

Segunda fase: Propuesta de interfaz mixta

Una vez hemos contrastado las variantes diegética y espacial, podemos iniciar el planteamiento de una interfaz teniendo en cuenta los resultados a los que hemos llegado con los datos obtenidos y aquello que hemos observado durante los experimentos de la fase anterior. Estas implican realizar ajustes con la altura del usuario y revisar el tipo de movimientos que tendrá que realizar el usuario para interactuar con los controles. Con esto realizaremos un diseño buscando las características de cada control que ofrecían mejores resultados en la primera fase, eligiendo un estilo espacial para facilitar la lectura y lo implementaremos usando la arquitectura que desarrollamos anteriormente.

6.1. Diseño

Al igual que hicimos anteriormente, para limitar posibles condicionantes, el entorno de trabajo, la estética y los sonidos, serán los mismos que los utilizados para las variantes diegética y espacial. Igualmente usaremos el mismo conjunto de controles adaptando su comportamiento a nuestra propuesta generada. Basaremos la mecánica en la variante diegética y la estética en la espacial. Ambas decisiones están basadas en los comentarios recibidos durante las pruebas, así como la observación de la fase de experimentación. Debido a esto, vamos a denominar a esta variante como mixta para diferenciarla de las anteriores.

La única diferencia notable respecto a la fase previa es la representación de los controles del usuario. En esta ocasión hemos optado por utilizar un modelo simplificado de manos (ver Figura 6.1) lo que nos permitirá reflejar los gestos que el usuario pueda realizar.



Figura 6.1: Vistas del modelo de manos.

6.1.1. Controles mixtos

De cara al espacio de trabajo hemos decidido diseñarlo de modo similar al diegético en cuanto a la posición y tamaños. Sin embargo, atendiendo a los resultados que hemos visto, vamos a ajustar la altura del banco de tal manera que se ajuste a la altura del usuario. Con esto intentamos conseguir que, en todos los casos, el ángulo que forma el tablero sea el óptimo. Así deberíamos anular la diferencia que observamos en el control de tipo interruptor de la variante diegética.

Otra mejora que vamos a desarrollar en esta segunda fase es la inclusión de una mayor variedad de estímulos de respuesta en las interacciones. Esto también podría beneficiar en términos de accesibilidad aunque no lo vamos a comprobar en este estudio. Los códigos de colores permanecerán sin alteraciones ya que no observamos que los sujetos de prueba tuvieran ninguna dificultad a la hora de asimilar las asociaciones. Por un lado, vamos a añadir efectos de sonido breves para indicar cuándo se ha acertado o fallado a la hora de interactuar con un control. En caso de acierto habrá un sonido agudo y en caso de fallo será un sonido grave. También vamos a incluir vibración háptica para indicar cuándo se está interactuando con un control. La vibración tendrá dos amplitudes y frecuencias diferentes atendiendo a si se está en contacto con el control o si se ha completado una interacción.

Nuestros controles mixtos (ver Figura 6.2) serían muy similares a los espaciales, pero con una mayor percepción tridimensional como sucede en el caso diegético, con el que comparte también la manera de ubicarlo en el entorno digital.



Figura 6.2: De izquierda a derecha, vistas de los controles mixtos: botón, palanca, dial, deslizador e interruptor. Fuente: Propia

Siguiendo con las mejoras, vamos a incluir unos gestos básicos para que la interacción no se realice únicamente con el gatillo. Hemos descartado la opción del seguimiento de manos ya que perderíamos la posibilidad de enviar estímulos hápticos y tampoco está disponible en todos los dispositivos. Por tanto, seguimos optando por utilizar los controladores básicos de tal manera que los usuarios no requieran dispositivos adicionales para las mejoras.

En esta ocasión, la presencia de los controladores en el entorno digital será a través de un modelo 3D de unas manos estilizadas. Los gestos usan los dos gatillos principales que incluyen los controladores estándar. Consideraremos cuatro gestos básicos que se reflejarán en ellas y que irán asociados a los controles físicos disponibles en los controladores del visor:

- Mano abierta: el usuario sostiene el controlador, pero no aprieta los controles.
- Apuntar: el usuario aprieta únicamente el gatillo de agarre.
- Pinzar: el usuario aprieta únicamente el gatillo del dedo índice.
- Agarrar: el usuario aprieta ambos gatillos simultáneamente.

En esta propuesta vamos a hacer que podamos interactuar con cada control de dos maneras distintas y usando gestos diferenciados para cada una de ellas (ver Tabla 6.1). La primera forma (M1) ejecuta la interacción mientras la mano esté tocando el control. La segunda manera (M2) mantiene la interacción con el control, aunque la mano se aleje de este siempre que se esté efectuando un gesto bloqueante. Para cada control tiene asignados unos gestos en cada modo de interacción.

Control	M1	M2
Botón	Mano abierta, Apuntar	—
Palanca	Mano abierta, Apuntar	Pinzar, Agarrar
Dial	Mano abierta, Apuntar	Pinzar, Agarrar
Deslizador	Mano abierta, Apuntar	Pinzar, Agarrar
Interruptor	Mano abierta, Apuntar	—

Tabla 6.1: Gestos de cada tipo de interacción para los controles mixtos. Fuente: Propia

6.2. Desarrollo

Ya planteamos el desarrollo inicial teniendo en cuenta que en una segunda fase añadiríamos una nueva variante. Esto nos va a permitir expandir el proyecto sin tener que realizar cambios en profundidad sobre su funcionamiento. Esto lo vemos ya que, como resultado de la aplicación de los experimentos, nos ha demostrado que es capaz de proporcionarnos los requisitos necesarios tanto para la implementación de controles como para la obtención de los datos para su posterior estudio.

Al igual que en la primera fase, únicamente vamos a medir la eficiencia de esta nueva variante, cronometrando el tiempo que tarda el usuario en resolver la prueba de cada control (sin tener en cuenta la paso de experimentación) y el número de fallos acumulados. Los procedimientos para realizar la medición de altura y el registro del sexo del sujeto de pruebas serán los mismos que en la primera fase para mantener la coherencia de los datos y no introducir nuevas variables que no podamos contrastar.

6.2.1. Flujo del experimento

Con el fin de reutilizar la mayor cantidad de elementos de la implementación de la primera fase seguiremos un procedimiento basado en el anterior (ver Figura 6.3). En esta ocasión necesitamos introducir un cambio para poder enseñar al usuario los gestos disponibles durante la fase de tutorial. Esto se debe a que inicialmente habilitábamos un solo gesto para la interacción con los elementos y ahora habrá cuatro, como hemos explicado anteriormente.

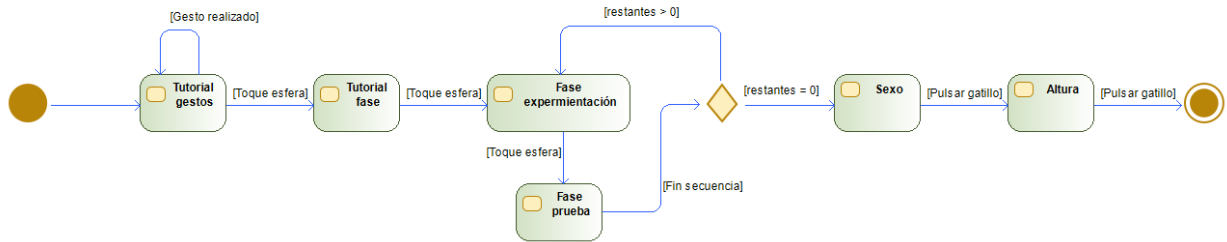


Figura 6.3: Diagrama de flujo de la aplicación en la segunda fase. Fuente: Propia

Mostraremos al usuario una serie de paneles (ver Figura 6.4) donde indicamos qué controles físicos debe accionar para realizar cada gesto. Para avanzar con el tutorial debe realizar correctamente el gesto que se le indica. Una vez mostrados todos los gestos vamos a reforzar el aprendizaje y, de manera similar a los controles, le mostramos un panel con un resumen de todos para que experimente y se familiarice con ellos y posteriormente, como en el flujo original, le indicamos que debe tocar la esfera que se encuentra detrás de él para continuar.

6.2.2. Arquitectura

Realizamos el planteamiento de arquitectura de la primera fase para que fuera flexible. Esto nos ha permitido evitar cambios notables en las especificaciones de la aplicación (ver Figura 6.5). Las modificaciones que hemos desarrollado se limitan a realizar las implementaciones específicas de la propuesta para el `ControlBase` e `InteractableObject`.

El resto de la arquitectura se mantiene. Nuestro componente `VRController` sigue encargándose de la gestión del reconocimiento de gestos, pero en esta ocasión hemos incluido un

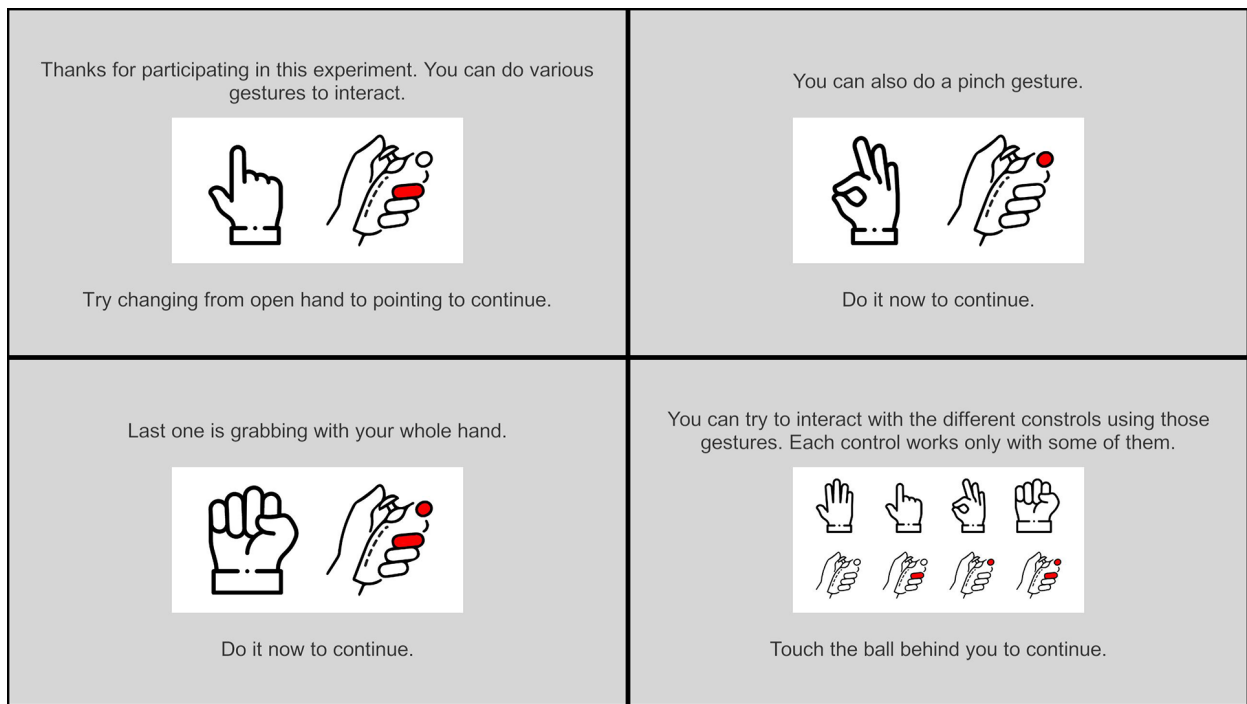


Figura 6.4: Paneles del tutorial de gestos.

enumerado `VRControllerGestures` que incluirá la totalidad de los gestos especificados en el nuevo diseño. Con ello podemos comunicar desde el controlador a los interactivables cuál es el gesto que el usuario está realizando y también especificar en dichos interactivables qué gestos consideramos aceptables para iniciar, mantener y terminar la interacción.

6.2.3. Realización de las pruebas

En el momento de realizar esta segunda fase, y dada la buena experiencia que tuvimos durante los primeros experimentos, seguiremos realizando una supervisión de estos en esta fase, en lugar de ser un experimento que realiza de manera autónoma el sujeto de prueba. Tomamos esta decisión ya que valoramos de manera positiva la reducción del tiempo de aprendizaje en caso de dudas por parte del sujeto y la importancia en la corrección de los datos demográficos dado que en la primera fase tuvieron relevancia en algunos resultados.

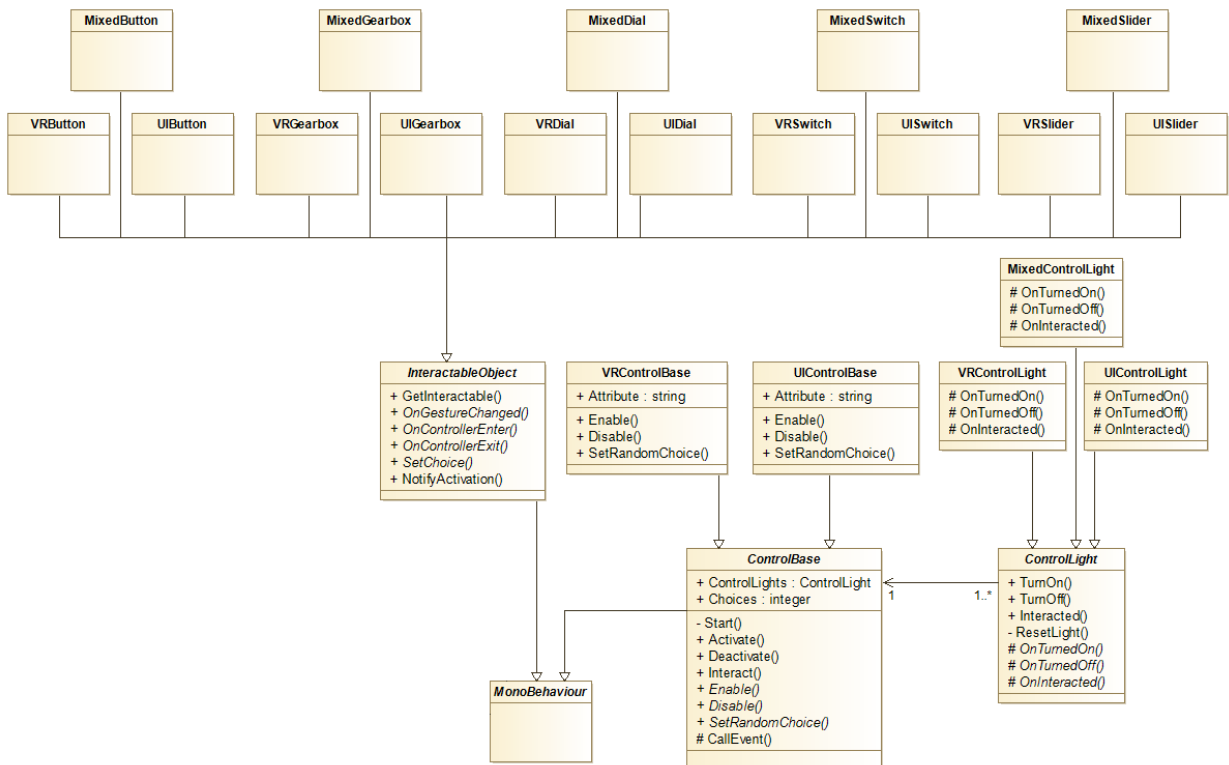


Figura 6.5: Diagrama de clases de la jerarquía de controles de la nueva propuesta.

Dado que obtuvimos suficientes sujetos de prueba en la primera fase, decidimos plantear la segunda fase siguiendo los mismos procedimientos para la obtención de sujetos de prueba y la colaboración con la Universidad Francisco de Vitoria para proporcionar un espacio adecuado en el que realizar el experimento. Realizamos este segundo ensayo en una única sesión para todos los sujetos de prueba. Aunque la muestra no es superior a la suma de los otros dos, sí es mayor que cualquiera de ellos, por lo que no consideramos necesario realizar futuras sesiones. También debemos notar que los sujetos de esta prueba no participaron en ninguna de las anteriores.

6.3. Análisis de resultados

Al igual que hicimos con los experimentos de la primera fase, vamos a seguir el mismo proceso de análisis y así poder contrastar cada apartado de los resultados con igual detalle.

En primer lugar, vamos a realizar una matriz de dispersión para comprobar de manera visual si pudiera haber asociación entre los tiempos de interacción de los usuarios y su altura (ver Anexo F.2). En esta ocasión apreciamos que no parece haber ningún tipo de relación, al contrario de lo que observamos en la anterior fase, por lo que, de momento, parece que hemos resuelto uno de los problemas de diseño originales.

Si realizamos un estudio del coeficiente de correlación de Pearson (ver Tabla 6.2) con los datos de esta fase podemos, una vez más, afirmar estadísticamente que existen correlaciones estadísticamente significativas directas entre los tiempos de duración de las pruebas de cada control. Por lo que los sujetos que tardan más tiempo en realizar una prueba de un control también tardan en realizar las pruebas de los otros controles de la misma variante, demostrando la coherencia de los resultados. Para todas las pruebas y test realizados hemos comprobado los supuestos de normalidad mediante prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

	Altura	Botón	Palanca	Dial	Deslizador	Interruptor
Altura	1	0,075	-0,071	-0,029	-0,181	-0,045
Botón	0,075	1	0,516**	0,529**	0,303*	0,502**
Palanca	-0,071	0,516**	1	0,717**	0,452**	0,560**
Dial	-0,029	0,529**	0,717**	1	0,567**	0,594**
Deslizador	-0,181	0,303*	0,452**	0,567**	1	0,409**
Interruptor	-0,045	0,502**	0,560**	0,594**	0,409**	1

Tabla 6.2: Matriz del Coeficiente de correlación de Pearson entre controles. Nota: *p <0,05. **p <0,01. Fuente: Propia

También podemos comprobar que no encontramos ninguna relación entre la altura de los sujetos y los tiempos (p-valor>0,05), por lo que los cambios introducidos en el diseño del banco de trabajo solucionan la discrepancia que veíamos en la primera fase con el control deslizador. Esto confirma mediante un análisis estadístico los indicios que apreciábamos en

la matriz de dispersión. Nuestra propuesta muestra resultados coherentes entre todos los controles independientemente de la altura de los sujetos.

Al mismo tiempo, en la fase descriptiva de los datos, hemos verificado la posible existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de ejecución de los cinco controles y el sexo del usuario (ver Tabla 6.3). Para comprobar esto hemos realizado una prueba de Levene que nos permite confirmar si ambos grupos a comparar, masculino y femenino, tienen varianzas equivalente (homocedasticidad o igualdad de varianzas). Dado que todos los p-valores son mayores a 0,05 no podemos rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad. Con los datos que hemos recopilado para T-test de muestras independientes no hay diferencias estadísticamente significativas entre el tiempo de la prueba y el sexo de los participantes (p-valor > 0,05) para ningún control (ver Tabla 6.4).

Control	Sexo	N	Media	Desviación típica
Botón	Femenino	14	6,89717	2,40830
	Masculino	38	6,45453	1,93489
Palanca	Femenino	14	17,04726	2,57429
	Masculino	38	15,455557	4,61361
Dial	Femenino	14	10,20658	3,18484
	Masculino	38	9,18165	3,41255
Deslizador	Femenino	14	7,16822	1,58161
	Masculino	38	6,83799	1,80136
Interruptor	Femenino	14	6,81373	2,13222
	Masculino	38	5,84037	1,77062

Tabla 6.3: Datos de muestra, medias y desviación típica por sexo y control.

6.3.1. Contraste con la primera fase

Debemos comprobar si la variante propuesta supone una mejora frente a las implementaciones originales. Realizamos una prueba ANOVA de un factor (ver Tabla 6.5), constatando la normalidad de los datos (p-valor > 0.01; prueba de normalidad de Shapiro-Wilk), para determinar si hay diferencias significativas entre las variantes (como variables dependientes asociadas con variables sociodemográficas como independientes). Podemos comprobar que

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	0,497	0,44265	-0,85624	1,74153
Palanca	0,125	1,59169	-0,46059	3,64398
Dial	0,333	1,02493	-1,08176	3,13162
Deslizador	0,548	0,33023	-0,76674	1,42721
Interruptor	0,102	0,97336	-0,20178	2,14851

Tabla 6.4: Prueba de muestras independientes por sexo. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia. Fuente: Propia

la significancia en todos los controles es menor a 0,05 por lo que debemos contrastar uno a uno cada control entre las variantes de la primera fase y la mixta para determinar su impacto.

Control	F	Significancia
Botón	11,122	<0,001
Palanca	5,163	0,007
Dial	28,106	<0,001
Deslizador	34,579	<0,001
Interruptor	10,831	<0,001

Tabla 6.5: Prueba ANOVA entre todas las variantes. Fuente: Propia

6.3.2. Contraste Diegética-Mixta

En primer lugar vamos a comparar los controles de las variantes diegética y mixta (ver Tabla 6.6). Si hacemos un análisis descriptivo de los datos, podemos apreciar diferencias notables en todos los controles.

Siguiendo el mismo procedimiento, realizamos un T-test de muestras independientes atendiendo a los grupos en cuestión (ver Tabla 6.7). Vemos que los p-valores son menores a 0,05 en todos los casos, confirmando que hay diferencias significativas entre las variantes diegética y mixta para cada uno de los controles implementados. Esto se ve reforzado si observamos que todas las diferencias de medias son positivas.

Control	Variante	N	Media	Desviación típica
Botón	Diegética	41	10,03901	5,81495
	Mixta	52	6,57370	2,05762
Palanca	Diegética	41	18,69010	5,65589
	Mixta	52	15,88410	4,19998
Dial	Diegética	41	19,38462	9,88311
	Mixta	52	9,45760	3,35335
Deslizador	Diegética	41	11,12806	3,40337
	Mixta	52	6,92690	1,73599
Interruptor	Diegética	41	8,80194	5,63369
	Mixta	52	6,10243	1,90353

Tabla 6.6: Datos de muestra, medias y desviación típica para variantes diegética y mixta.

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	<0,001	3,46531	1,74294	5,18768
Palanca	0,010	2,80599	0,69668	4,91530
Dial	<0,001	9,92703	7,01595	12,83810
Deslizador	<0,001	4,20115	3,12087	5,28143
Interruptor	0,002	2,96651	1,04099	4,35803

Tabla 6.7: Prueba de muestras independientes para variantes diegética y mixta. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia. Fuente: Propia

6.3.3. Contraste Espacial-Mixta

Aunque ya hemos visto diferencias con la variante diegética, esto no impide que pueda haberlas también con la espacial. Para comprobarlo, procedemos a comparar las variantes espacial y mixta (ver Tabla 6.8). Una vez más, el análisis descriptivo parece mostrar la existencia de diferencias también entre estas variantes.

Procedemos con un análisis en profundidad mediante un T-test de muestras independientes (ver Tabla 6.9). Igualmente nos muestra que todos los p-valores son menores a 0,05 por lo que también hay diferencias significativas entre variante espacial y diegética, sustentado también por una diferencia de medias positiva.

Control	Variante	N	Media	Desviación típica
Botón	Espacial	33	10,45641	4,67920
	Mixta	52	6,57370	2,05762
Palanca	Espacial	33	18,43123	3,82827
	Mixta	52	15,88410	4,19998
Dial	Espacial	33	14,47660	3,89219
	Mixta	52	9,45760	3,35335
Deslizador	Espacial	33	10,43936	2,63402
	Mixta	52	6,92690	1,73599
Interruptor	Espacial	33	10,07589	4,20450
	Mixta	52	6,10243	1,90353

Tabla 6.8: Datos de muestra, medias y desviación típica para variantes espacial y mixta.

Control	Significancia (bilateral)	Media de la diferencia	Inferior	Superior
Botón	<0,001	3,88271	2,41169	5,35373
Palanca	0,005	2,54713	0,78315	4,31111
Dial	<0,001	5,01900	3,37564	6,66236
Deslizador	<0,001	3,51245	2,47211	4,55280
Interruptor	<0,001	3,97346	2,64236	5,30455

Tabla 6.9: Prueba de muestras independientes para variantes espacial y mixta. T-test para igualdad de medias. Nota: 95 % de intervalo de confianza de la diferencia. Fuente: Propia

6.3.4. Análisis descriptivo de los controles

Por último haremos una exploración descriptiva mediante diagramas de caja.

Botón

Podemos observar una mejora general en los tiempos y menor varianza (ver Figura 6.6).

Si bien teníamos poco espacio de mejora respecto a la variante diegética, sí apreciamos diferencia con la espacial (ver Figura 6.7).

Palanca

En este control también vemos mejoras respecto a las variantes originales. Aunque los casos extremos peores se mantienen, los mejores se ven beneficiados (ver Figura 6.8).

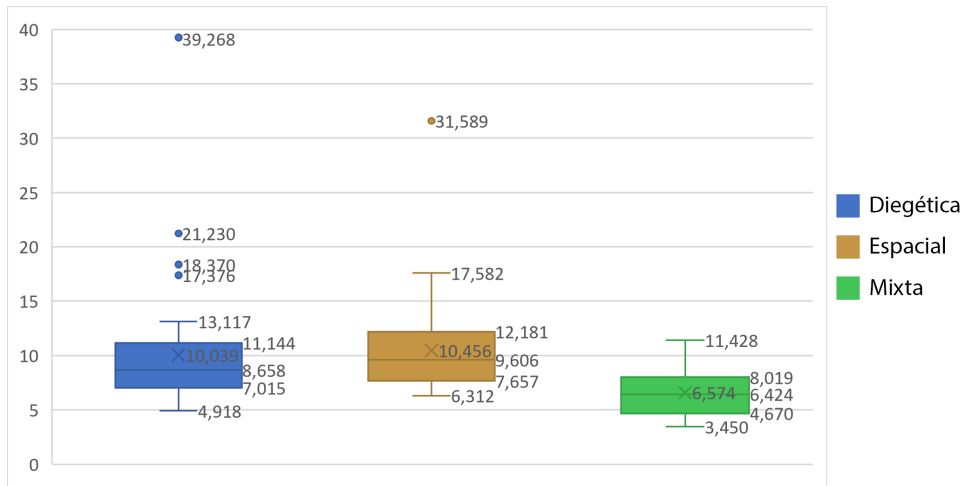


Figura 6.6: Diagrama de caja de los tiempos del botón. Fuente: Propia

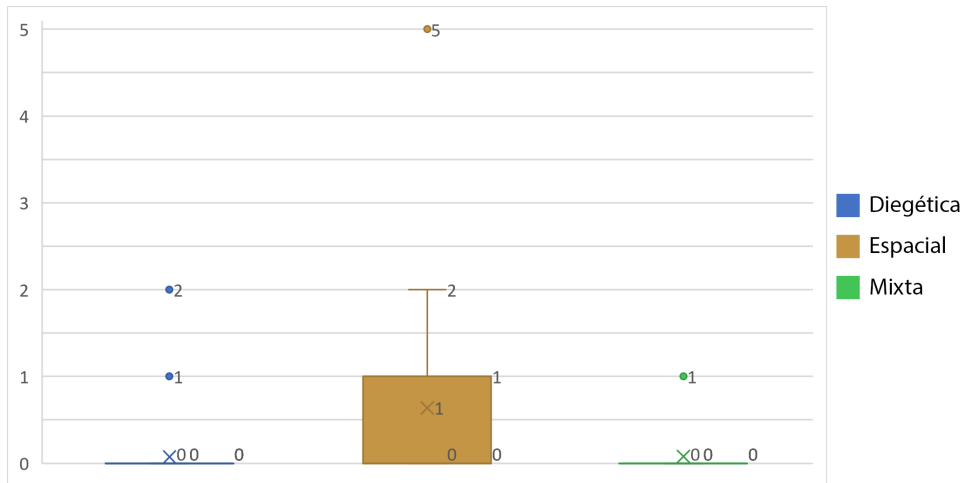


Figura 6.7: Diagrama de caja de los fallos del botón. Fuente: Propia

Los fallos muestran buenos resultados, aunque la variante espacial parece ser ligeramente mejor (ver Figura 6.9).

Dial

Aquí apreciamos una mejora notable respecto a las variantes de la primera fase (ver Figura 6.10). Tanto la varianza como los casos extremos reflejan las ventajas de esta implementación.

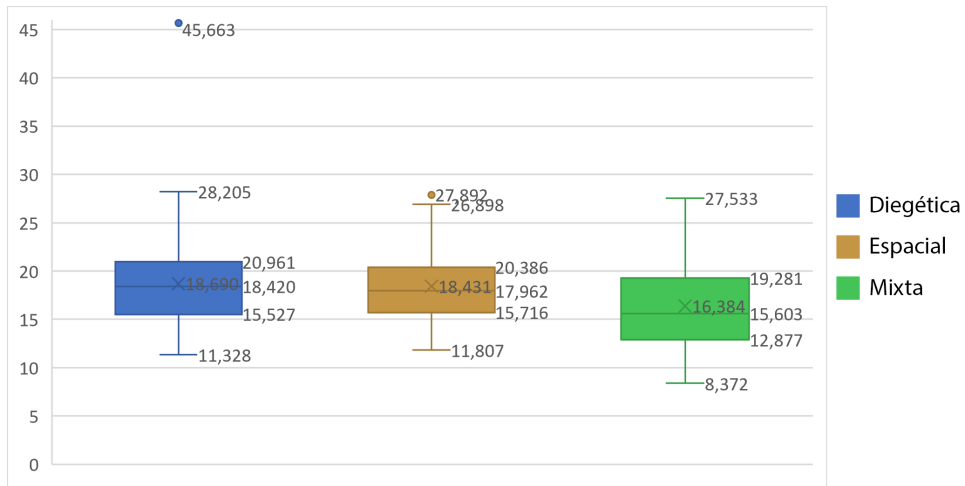


Figura 6.8: Diagrama de caja de los tiempos de la palanca. Fuente: Propia

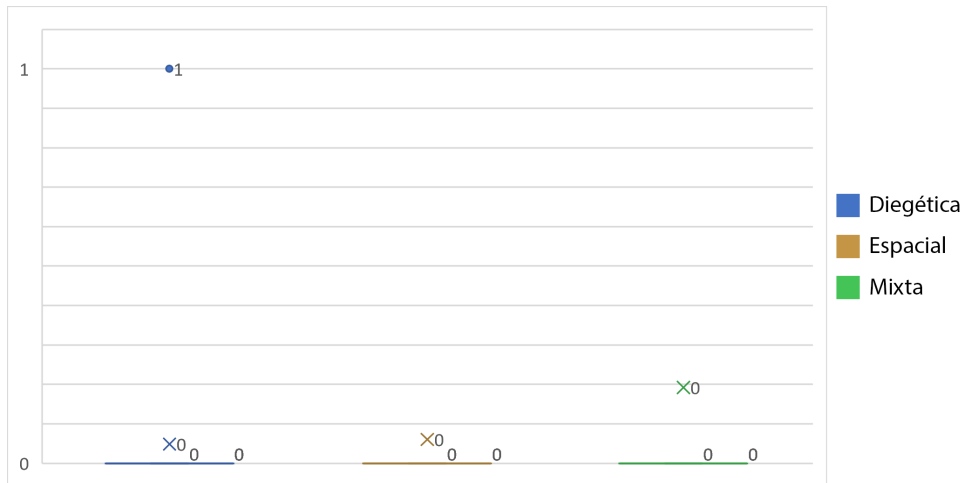


Figura 6.9: Diagrama de caja de los fallos del palanca. Fuente: Propia

Los fallos únicamente igualan el mejor caso anterior (ver Figura 6.11), fruto del poco margen de mejora.

Deslizador

Podemos ver a simple vista otra caso de control que mejora de manera sustancial (ver Figura 6.12). Podemos destacar como han desaparecido los valores atípicos en nuestros resultados.

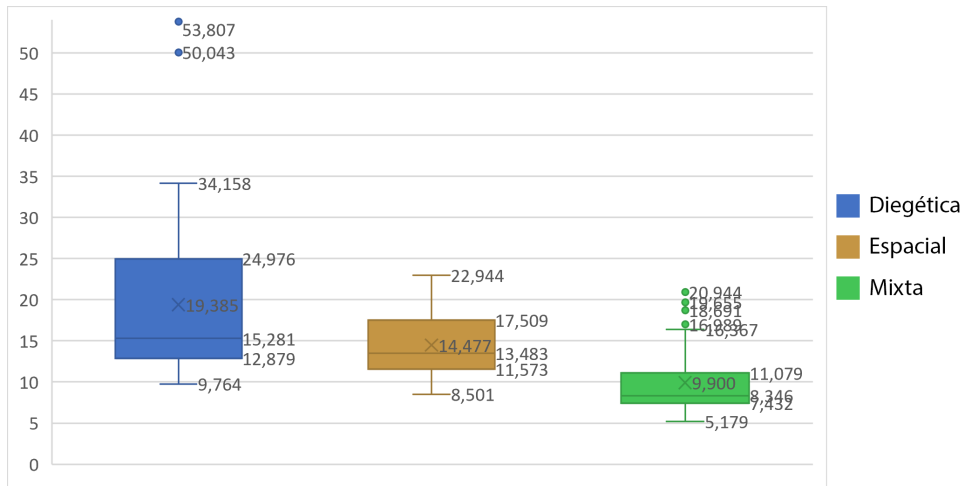


Figura 6.10: Diagrama de caja de los tiempos del dial. Fuente: Propia

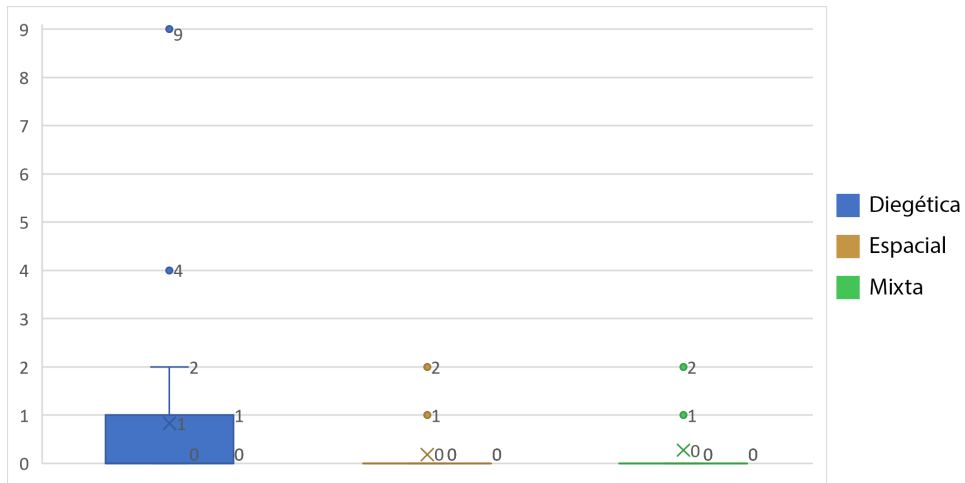


Figura 6.11: Diagrama de caja de los fallos del dial. Fuente: Propia

En este caso los fallos eran nulos y se han mantenido igual (ver Figura 6.13).

Interruptor

En este último control también observamos una mejora respecto a los originales, principalmente con el espacial (ver Figura 6.14). Los valores atípicos prácticamente desaparecen, aunque el único existente no lo sería en las otras variantes.

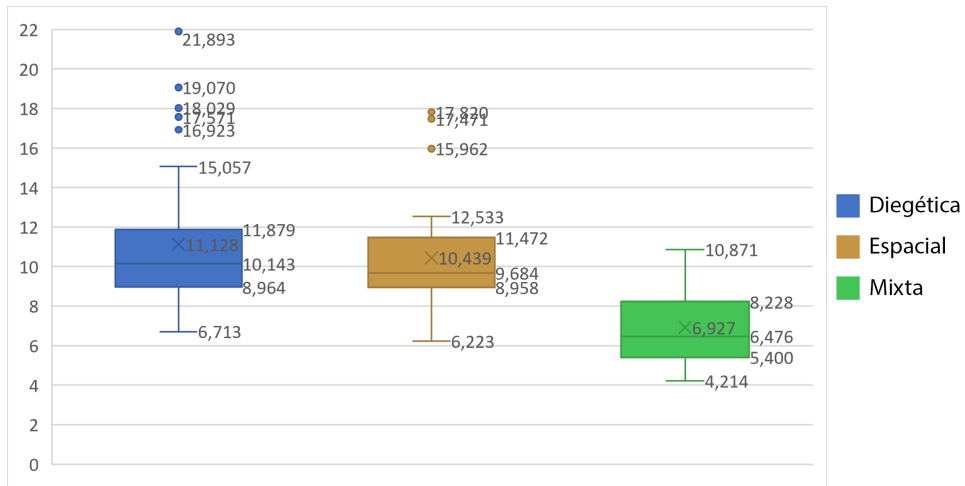


Figura 6.12: Diagrama de caja de los tiempos del deslizador. Fuente: Propia

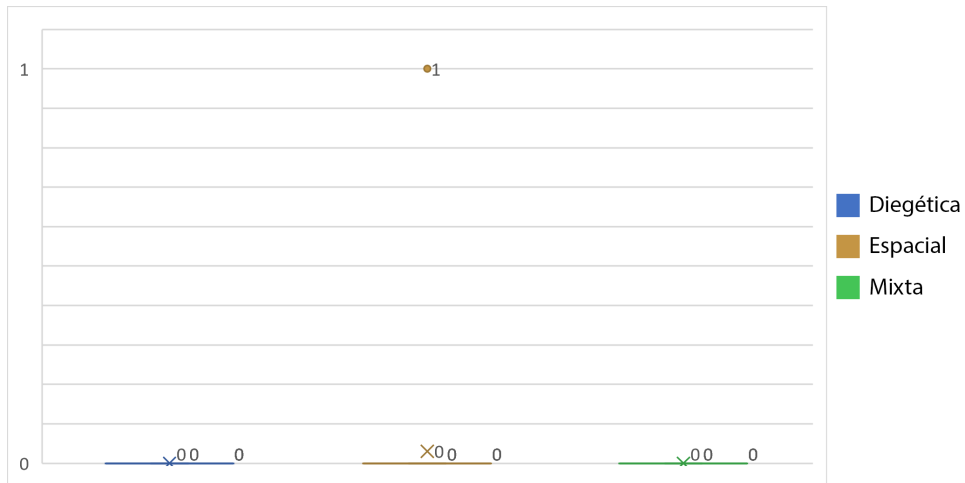


Figura 6.13: Diagrama de caja de los fallos del deslizador. Fuente: Propia

Respecto a los fallos, mantenemos los buenos resultados de la variante espacial (ver Figura 6.15).

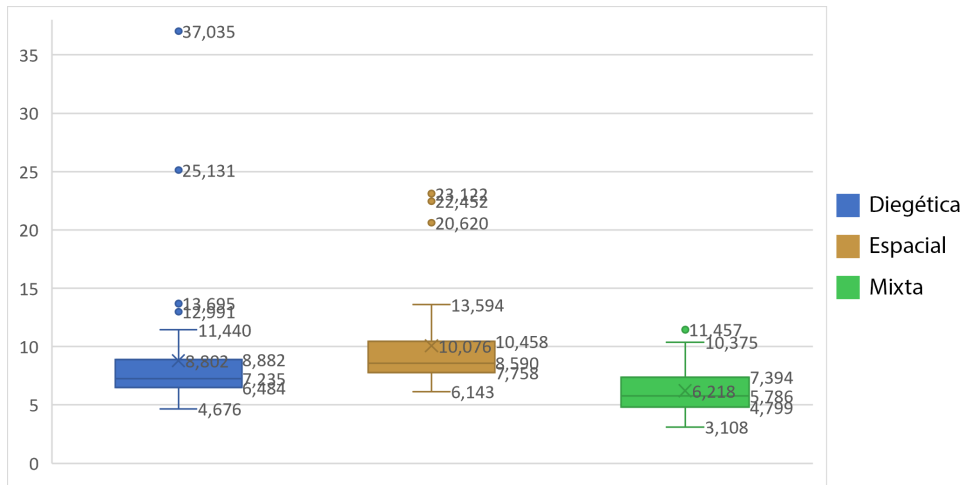


Figura 6.14: Diagrama de caja de los tiempos del interruptor. Fuente: Propia

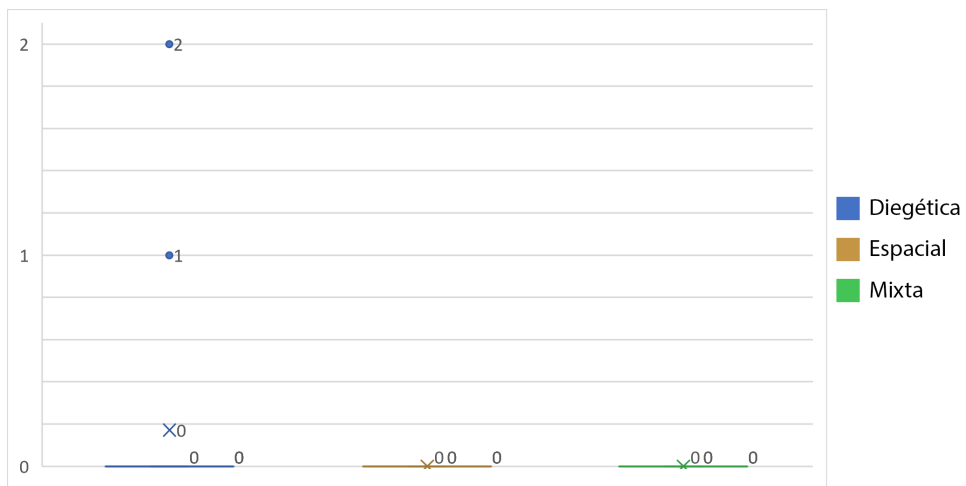


Figura 6.15: Diagrama de caja de los fallos del interruptor. Fuente: Propia

6.4. Recomendaciones para el diseño de interfaces en VR

Al igual que hemos visto con su la evolución de la VR, elementos que hace unos años eran ciencia ficción como en la película Johnny Mnemonic (Longo, 1995) (gafas, guantes, gestos, escritura...) son ahora posibles. La tecnología necesaria está desarrollada, pero las interfaces de usuario no han evolucionado con ella.

Encontramos una paradoja con el diseño de las interfaces en VR. En este medio cualquier diseño es posible, pero es algo difícil de describir y, al mismo tiempo, se prometen muchas interacciones que todavía no se han alcanzado. Desde un punto de vista de diseño, el mundo físico está limitado por las posibilidades mecánicas, contextualizado por los significantes. El modelo conceptual de la realidad es muy sólido y se fundamenta en la física. Sin embargo, en la VR no hay limitación mecánica por lo que las posibilidades se plantean ilimitadas, todo se puede usar para cualquier cosa. Esto hace que los significantes sufran ya que los signos son difíciles de leer y la cantidad de detalle está limitada por las capacidades del hardware.

Los modelos conceptuales que tenemos creados para la realidad física y la interacción con otros dispositivos modernos tienden a fallar porque son esquemorfismos de un concepto diferente. El diseño en VR es el arte de conectar y crear analogías usando símbolos y representaciones para hacer cosas que no son físicamente posibles. Cuando este esquemorfismo no coincide con el modelo mental que tenemos del mundo físico generamos frustración. Por tanto, es importante considerar la regla de oro del diseño: no es culpa del usuario (Norman, 2007). El propósito del diseño es crear cosas que se comuniquen con los humanos. Un buen diseño es buena comunicación.

A la hora de diseñar interfaces de usuario para VR hay ciertas recomendaciones generales para tener en cuenta. La primera de ellas es respetar el espacio del usuario, no ser obstructivo y esperar al permiso del usuario para ocupar un lugar. También es importante priorizar interacciones naturales, el uso de *hand tracking* en lugar de controladores puede simplificar este proceso. Igualmente importante es respetar la voluntad del usuario con aquellas inter-

acciones que estén estandarizadas. Las interfaces tienen que ser simplificadas y contar con menos menús.

Algo crítico es que la confirmación de la interacción sea predecible, que una interacción no genere situaciones inesperadas. Un ejemplo de esto es el efecto Heisenberg sobre la interacción espacial (Wolf et al., 2020), al apretar el gatillo de un controlador se produce un ligero movimiento hacia arriba de manera inconsciente. Esto hace necesario generar un nuevo conjunto de interacciones adaptado al medio.

Para ello podemos crear un flujo de interacción basado en tres elementos:

- Volúmenes: zonas de interacción.
- Ventanas: elementos de interfaz tradicionales.
- Inmersivos: elementos en los que el usuario esté plenamente integrado

Si usamos un modelo conceptual familiar podemos amplificar cómo interactuamos con la tecnología. El diseño de la interfaz tiene que ser una guía para la intuición del usuario.

A continuación vamos a destacar algunas indicaciones específicas clasificadas en los aspectos del usuario que pueden verse afectados.

A nivel motor debemos cuidar la posición de la interfaz y su tamaño para que se ajusten a las características fisiológicas del usuario. Esto puede realizarse de manera rápida con la altura. Los movimientos de rotación son más complejos, principalmente en la articulación de la muñeca. Minimizar o evitarlos puede evitar complejidad en las interacciones. Es preferible utilizar elementos de interfaz con interacciones binarias o que sólo requieran desplazamiento unidimensional.

Al interactuar con los controladores o las interfaces se pueden producir pequeños movimientos involuntarios. Tanto las interacciones como los elementos de la interfaz tienen que estar diseñados para contrarrestarlos. Una opción es que los controles tengan un tamaño suficiente para que se mantenga el contacto con ellos o utilizar algún otro tipo de mecanismo que cuente la posición original del usuario en el momento que se inició la interacción.

La interfaz tiene que intentar evitar verse afectada por las condiciones lumínicas del entorno, ignorar la luz ambiental por completo es una opción viable. También es importante la selección de colores de todos los elementos, interactivables o no. Aquello que pertenezca a la interfaz debe destacar suficientemente sobre el entorno y, dentro de esta, debe quedar claro qué elementos son interactivables. No solo esto, debemos indicar cuándo se está realizando la interacción y cuándo no usando todo lo que esté a nuestra disposición. El uso de colores con mayor saturación facilita este reconocimiento.

No debemos menospreciar el valor de la escucha como elemento para proporcionar retroalimentación. Si bien no debe ser el único, es posible combinarlo con elementos visuales como movimiento y cambios de color. El uso de las capacidades hápticas también complementa en este aspecto, aunque su intensidad no debe ser demasiado elevada para evitar desplazamientos involuntarios por parte del usuario.

En general, también es necesario proporcionar opciones de accesibilidad para realizar pequeños ajustes y consideraciones que pueden ser críticas en algunos casos. Un simple ajuste en la configuración de colores puede generar problemas en personas que padecen daltonismo. Para ello recomendamos las pautas de la web *Game Accessibility Guidelines* *.

6.5. Discusión

En esta ocasión hemos conseguido una muestra mayor que en las otras dos variantes, aunque la representación femenina sigue siendo reducida. Con los datos que tenemos actualmente no podemos asegurar que exista una relación entre el sexo y la eficiencia; esta inexistencia es, por otro lado, nuestra hipótesis inicial. Igualmente, hemos vuelto a observar una coherencia y uniformidad entre todos los controles al igual que en la primera fase.

Hemos podido comprobar que nuestra propuesta proporciona una mejora en la eficiencia y soluciona problemas que tuvimos con las primeras implementaciones. Al adaptar el banco de trabajo a la altura del usuario hemos eliminado las implicaciones que esta tenía sobre los

*<https://gameaccessibilityguidelines.com/>

resultados en el control deslizador, como sucedía en la variante diegética; esto nos demuestra la importancia de los factores humanos y la necesidad de que los espacios se adapten como sugerían varios autores en estudios previos. Esto se ve reflejado también en el control dial, al eliminar los movimientos más complejos de rotación en la muñeca hemos mejorado los tiempos frente a las otras dos implementaciones.

En general, todos los controles suponen una mejora frente a las implementaciones anteriores por lo que hemos verificado nuestra hipótesis inicial que establecía que se puede desarrollar una interfaz más eficiente considerando los mejores aspectos de las variantes diegética y espacial, y solucionando sus principales problemas.

Si bien hemos limitado este trabajo al análisis de cinco controles básicos, puede servir como punto de partida para analizar otros controles más complejos y también la combinación de ellos en un mismo banco de trabajo. De igual manera, aunque hayamos observado mejoras en la eficiencia de los controles con la propuesta, no hemos analizado el impacto de la implementación en otros aspectos como podría ser la inmersión. Esto quiere decir que los desarrolladores pueden seguir eligiendo las variantes tradicionales frente a nuestra propuesta. Las ventajas de la variante diegética en inmersión son notables, aunque no creemos que la variante espacial pueda proporcionar ventajas frente a nuestra propuesta.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

Con el desarrollo de esta tesis hemos analizado los elementos físicos y tecnológicos que afectan a la planificación de interfaces de usuario en entornos de VR. Igualmente hemos hecho una revisión de los principios de diseño de estas interfaces así como sus equivalentes en el entorno físico. Gracias al desarrollo de los experimentos hemos completado una arquitectura que permite la iteración para el desarrollo de variantes de una manera muy rápida ya que toda la arquitectura interna es común. Con los resultados de los distintos experimentos vemos que es posible optimizar la interfaz en términos de eficiencia atendiendo a pequeños detalles que pueden pasar por alto si simplemente seguimos las pautas establecidas.

A lo largo de este trabajo hemos comprobado la importancia que tienen los factores humanos en el diseño de interfaces para entornos virtuales. Esto es algo que se había estudiado para espacios físicos y ha demostrado ser un elemento clave para presentar mejoras, mostrando la posibilidad de realizar investigaciones sobre casos reales en entornos virtuales. Esto lo vemos reforzado por las implicaciones psicológicas que tiene este entorno digital y que nos facilitan realizar experimentos que serían complicados o costosos en un entorno físico.

Sentadas las bases sobre los experimentos, podríamos continuar estudiando las implicaciones en términos de accesibilidad para todas las variantes. Desde un punto de vista de responsabilidad social, consideramos interesante evitar todas barreras que impidan a cualquier persona con algún tipo de discapacidad acceder o disfrutar aquellos productos o

experiencias que se puedan ver beneficiados por los hallazgos de este estudio. Las discapacidades motoras pueden ser más determinantes por el tipo de movimientos, las auditivas podrían ser menos destacables ya que se ven más complementadas por otros sentidos y las visuales requerirían una mayor atención a la retroalimentación háptica. Hay un amplio campo de estudio en estos aspectos.

También podemos apreciar que el sexo no es un factor determinante en la eficiencia, ya que esta se ve afectada por variables antropométricas que se pueden presentar igualmente en ambos sexos. Aunque los tamaños muestrales que hemos conseguido son suficientes para el análisis que hemos realizado, si fuera interesante proseguir con este trabajo y aumentar la muestra, principalmente femenina.

Sería interesante repetir los experimentos introduciendo una nueva variable que reflejase la competencia previa en VR que tienen los participantes. Puede aportar información sobre si la implementación de los controles favorece el autoaprendizaje y reduce la brecha entre usuarios nuevos y experimentados. Supone, sin embargo, un dilema el decidir cómo se mide esta competencia. Esto podría proporcionarnos información sobre los casos extremos que hemos observado en los resultados.

Otro aspecto para tener en cuenta sería la realización de experimentos episódicos (comparación de medias dependientes o relacionadas). Con esto nos referimos a pruebas en las que se desarrollen tareas que impliquen el uso de distintos tipos de controles, de manera simultánea o en secuencia, para ver cómo se relacionan entre ellos.

Si echamos un vistazo atrás y recordamos los dispositivos actuales, vemos que hay una tendencia a permitir el control mediante hand-tracking, nosotros lo descartamos ya que no nos permitía proporcionar una retroalimentación háptica a los usuarios, aunque permite la realización de mayor cantidad de gestos. Pero, dado este empuje de la industria, consideramos importante hacer una revisión de los experimentos haciendo uso de esta técnica y, así, poderlos contrastar con los datos que ya tenemos.

Aunque este trabajo lo hemos desarrollado en un entorno de VR, los mismos principios de diseño son aplicables a los entornos de AR y MR. La manera de mostrar las interfaces es la misma en todos, con la diferencia de que estos últimos muestran la imagen del mundo digital superpuesta a la del mundo físico.

Como muestra de las aplicaciones directas que pueden tener los resultados obtenidos podemos analizar un par de casos reales y cómo resuelven el diseño de la interfaz de usuario del propio sistema integrado. Los sensores de profundidad y mejores cámaras que incluyen los dispositivos anunciados mientras terminábamos esta tesis muestran oportunidades prometedoras para ampliar el alcance de esta investigación.

Por un lado tenemos el caso de Meta con sus gafas Quest que implementa una interfaz espacial. Si se utilizan controladores se usan estos como punteros a distancia, y los distintos botones de este sirven para interactuar con los controles de la interfaz; esto coincide con el funcionamiento de la variante espacial de la primera fase. También existe la posibilidad de interactuar sin controladores, para ello utiliza tecnología *hand-tracking*. Las manos se convierten en punteros como en el caso de los controladores, pero las interacciones se hacen mediante gestos básicos con los dedos índice y pulgar. Como hemos visto a lo largo de este trabajo, una interacción que implique contacto con la interfaz genera una mayor eficiencia y, ya que la original es espacial, no sacrifica inmersión para obtener estas mejoras. Aunque no es algo que hayamos medido durante los experimentos, sí que hemos observado una predilección de los usuarios por una interacción basada en el gesto apuntar. No tenemos evidencia estadística sobre el fundamento de esta elección, aunque podría deberse a la similitud con el tipo de interacción que se usa en las pantallas táctiles.

Por otro lado también nos gustaría destacar lo observado con el visor Apple Vision Pro y la reiteración que hicieron en su presentación sobre el término *Computación Espacial*. Desde un principio han recalcado que no va a disponer de controladores y su comportamiento es similar al de la Meta Quest sin ellos. Se dispone de una interfaz espacial y se utiliza tecnología *eye-tracking* para apuntar realizando las interacciones mediante gestos con los

dedos pulgar e índice. Este cambio en la manera de apuntar es bastante diferente y sería interesante analizar las implicaciones que tiene en la eficiencia y la inmersión respecto a los estudiados, aunque el visor perfectamente podría implementar nuestra solución al disponer de todos los requisitos de hardware necesarios.

Referencias

- Agrawal, S., Simon, A., Bech, S., Bærentsen, K., y Forchhammer, S. (2020). Defining immersion: Literature review and implications for research on audiovisual experiences. *Journal of the Audio Engineering Society*, 68:404–417. doi:[10.17743/jaes.2020.0039](https://doi.org/10.17743/jaes.2020.0039).
- Apple (2023). Apple vision pro. <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>. Accedido: 2024-04-30.
- Bachmann, D., Weichert, F., y Rinckenauer, G. (2018). Review of three-dimensional human-computer interaction with focus on the leap motion controller. *Sensors*, 18:2194. doi:[10.3390/s18072194](https://doi.org/10.3390/s18072194).
- Barfield, W. y III, T. A. F., editors (1995). *Virtual Environments and Advanced Interface Design*. Oxford University Press, 1 edition.
- Berkman, M. I. y Akan, E. (2024). *Presence and Immersion in Virtual Reality*, pages 1461–1470. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-031-23161-2_162](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23161-2_162).
- Biocca, F., Harms, C., y Burgoon, J. K. (2003). Toward a more robust theory and measure of social presence: Review and suggested criteria. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12:456–480. doi:[10.1162/105474603322761270](https://doi.org/10.1162/105474603322761270).
- Blascovich, J., Loomis, J., Beall, A. C., Swinth, K. R., Hoyt, C. L., y Bailenson, J. N. (2002). Target article: Immersive virtual environment technology as a methodological tool for social psychology. *Psychological Inquiry*, 13:103–124. doi:[10.1207/S15327965PLI1302_01](https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1302_01).
- Bohil, C. J., Alicea, B., y Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nature Reviews Neuroscience*, 12:752–762. doi:[10.1038/nrn3122](https://doi.org/10.1038/nrn3122).

- Bollini, L. (2017). Beautiful interfaces. from user experience to user interface design. *The Design Journal*, 20:S89–S101. doi:[10.1080/14606925.2017.1352649](https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352649).
- Bowman, D. A. y McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: How much immersion is enough? *Computer*, 40:36–43. doi:[10.1109/MC.2007.257](https://doi.org/10.1109/MC.2007.257).
- Bowman, D. A. y Wingrave, C. A. (2001). Design and evaluation of menu systems for immersive virtual environments. *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, pages 149–156. doi:[10.1109/VR.2001.913781](https://doi.org/10.1109/VR.2001.913781).
- Broderick, D. (1982). *The Judas Mandala*. Pocket.
- Brown, E. y Cairns, P. (2004). A grounded investigation of game immersion. In *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 1297–1300. ACM. doi:[10.1145/985921.986048](https://doi.org/10.1145/985921.986048).
- Cabral, M. C., Morimoto, C. H., y Zuffo, M. K. (2005). On the usability of gesture interfaces in virtual reality environments. In *Proceedings of the 2005 Latin American conference on Human-computer interaction - CLIHC '05*, pages 100–108. ACM Press. doi:[10.1145/1111360.1111370](https://doi.org/10.1145/1111360.1111370).
- Caudell, T. P. y Mizell, D. W. (1992). Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 659–669. IEEE. doi:[10.1109/HICSS.1992.183317](https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317).
- Cecchi, A. (2010). Diegetic versus nondiegetic: A reconsideration of the conceptual opposition as a contribution to the theory of audiovision. *Worlds of Audiovision*, pages 1–10.
- Chattha, U. A., Janjua, U. I., Anwar, F., Madni, T. M., Cheema, M. F., y Janjua, S. I. (2020). Motion sickness in virtual reality: An empirical evaluation. *IEEE Access*, 8:130486–130499. doi:[10.1109/ACCESS.2020.3007076](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007076).

- Chirico, A. y Gaggioli, A. (2019). When virtual feels real: Comparing emotional responses and presence in virtual and natural environments. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 22:220–226. doi:[10.1089/cyber.2018.0393](https://doi.org/10.1089/cyber.2018.0393).
- Coomans, M. y Timmermans, H. (1997). Towards a taxonomy of virtual reality user interfaces. In *Proceedings. 1997 IEEE Conference on Information Visualization (Cat. No.97TB100165)*, pages 279–284. IEEE Comput. Soc. doi:[10.1109/IV.1997.626531](https://doi.org/10.1109/IV.1997.626531).
- Corlett, E. N. y Clark, T. S. (1995). *The Ergonomics Of Workspaces And Machines*. CRC Press. doi:[10.4324/9780203482612](https://doi.org/10.4324/9780203482612).
- Coutaz, J. (2007). *Meta-User Interfaces for Ambient Spaces*, volume 4385, pages 1–15. Springer Berlin Heidelberg. doi:[10.1007/978-3-540-70816-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70816-2_1).
- Cronenberg, D. (1999). eXistenZ. <https://www.imdb.com/title/tt0120907/>. Alliance Atlantis.
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row.
- Dachselt, R. y Hübner, A. (2007). Three-dimensional menus: A survey and taxonomy. *Computers & Graphics*, 31:53–65. doi:[10.1016/j.cag.2006.09.006](https://doi.org/10.1016/j.cag.2006.09.006).
- Davis, A. y Kühnlenz, F. (2007). Optical design using fresnel lenses. *Optik & Photonik*, 2:52–55. doi:[10.1002/opph.201190287](https://doi.org/10.1002/opph.201190287).
- Dealessandri, M. (2020). The best practices and design principles of vr development. <https://www.gamesindustry.biz/articles/2020-04-01-the-best-practices-and-design-principles-of-vr-development>.
- Deborah.L, H. (2002). Presence in virtual environments. *Handbook of Virtual Environments - Design, Implementation, and Applications*, pages 831–846. doi:[10.1201/9780585399102-51](https://doi.org/10.1201/9780585399102-51).

- Dempster, W. T., Gabel, W. C., y Felts, W. J. L. (1959). The anthropometry of the manual work space for the seated subject. *American Journal of Physical Anthropology*, 17:289–317. doi:[10.1002/ajpa.1330170405](https://doi.org/10.1002/ajpa.1330170405).
- Department of Defense of the United States of America (2020). *Design Criteria Standard, Human engineering MIL-STD-1472H*. Department of Defense of the United States of America.
- Díaz, P. y Peñas, G. (2019). La intervención de la mujer en el espacio construido en el medio rural. propuestas de cambio para cifuentes (guadalajara). https://institutomujer.castillalamancha.es/sites/institutomujer.castillalamancha.es/files/documentos/paginas/archivos/memoria_la_intervencion_de_la_mujer_en_el_espacio_construido_en_el_medio_rural.pdf.
- Ens, B. y Irani, P. (2017). Spatial analytic interfaces: Spatial user interfaces for in situ visual analytics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 37:66–79. doi:[10.1109/MCG.2016.38](https://doi.org/10.1109/MCG.2016.38).
- Facebook (2014). Facebook to acquire oculus. <https://about.fb.com/news/2014/03/facebook-to-acquire-oculus/>. Accedido: 2024-04-30.
- Falcao, C., Lemos, A. C., y Soares, M. (2015). Evaluation of natural user interface: A usability study based on the leap motion device. *Procedia Manufacturing*, 3:5490–5495. doi:[10.1016/j.promfg.2015.07.697](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.697).
- Fernandez, J. E. (1995). Ergonomics in the workplace. *Facilities*, 13:20–27. doi:[10.1108/02632779510083359](https://doi.org/10.1108/02632779510083359).
- Gaggioli, A. (2012). *Quality of Experience in Real and Virtual Environments: Some Suggestions for the Development of Positive Technologies*, volume 181, pages 177–181. IOS Press. doi:[10.3233/978-1-61499-121-2-177](https://doi.org/10.3233/978-1-61499-121-2-177).

- Hallnäs, L. y Redström, J. (2002). From use to presence. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 9:106–124. doi:[10.1145/513665.513668](https://doi.org/10.1145/513665.513668).
- Heilig, M. L. (1957). Stereoscopic-television apparatus for individual use. U.S. Patent and Trademark Office.
- Hitchcock, E. (1887). *The Need of Anthropometry, and how to Make it Available: A Paper*. Rome Brothers.
- HTC (2016). HTC and Valve bring Virtual Reality to life with unveiling of Vive Consumer Edition. <https://www.vive.com/eu/newsroom/2016-02-21/>. Accedido: 2024-04-30.
- Hunicke, R., LeBlanc, M., y Zubek, R. (2004). Mda: A formal approach to game design and game research. In *Proceedings of the AAAI Workshop on Challenges in Game AI*, volume 4, page 1722.
- Iacovides, I., Cox, A., Kennedy, R., Cairns, P., y Jennett, C. (2015). Removing the hud. In *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pages 13–22. ACM. doi:[10.1145/2793107.2793120](https://doi.org/10.1145/2793107.2793120).
- Interaction Design Foundation (2020). An introduction to usability. <https://www.interaction-design.org/literature/article/an-introduction-to-usability>. Accedido: 2024-04-30.
- Interaction Design Foundation (2022). Virtuality continuum. <https://www.interaction-design.org/literature/topics/virtuality-continuum>. Accedido: 2024-04-30.
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., y Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66:641–661. doi:[10.1016/j.ijhcs.2008.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.04.004).

- Kim, H. K., Park, J., Choi, Y., y Choe, M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (vrsq): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 69:66–73. doi:[10.1016/j.apergo.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016).
- Klein, G. y Murray, D. (2007). Parallel tracking and mapping for small ar workspaces. In *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 225–234. IEEE. doi:[10.1109/ISMAR.2007.4538852](https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538852).
- Köhle, K., Hoppe, M., Schmidt, A., y Mäkelä, V. (2021). Diegetic and non-diegetic health interfaces in vr shooter games. In Ardito, C., Lanzilotti, R., Malizia, A., Petrie, H., Piccinno, A., Desolda, G., y Inkpen, K., editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021*, pages 3–11. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-030-85613-7_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85613-7_1).
- Lanier, J. (2001). Virtually there on jstor. *Scientific American*, 284:66–75.
- Lavoie, R., Main, K., King, C., y King, D. (2021). Virtual experience, real consequences: the potential negative emotional consequences of virtual reality gameplay. *Virtual Reality*, 25:69–81. doi:[10.1007/s10055-020-00440-y](https://doi.org/10.1007/s10055-020-00440-y).
- Lazar, J., Feng, J. H., y Hochheiser, H. (2017). *Research methods in human-computer interaction*. Morgan Kaufmann.
- Leonard, B. (1992). The lawnmower man. <https://www.imdb.com/title/tt0104692/>. New Line Cinema.
- Lewis, C. y Norman, D. A. (1995). Designing for error. In Baecker, R. M., Grudin, J., Buxton, W. A., y Greenberg, S., editors, *Readings in Human-Computer Interaction*, Interactive Technologies, pages 686–697. Morgan Kaufmann. doi:[10.1016/B978-0-08-051574-8.50071-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051574-8.50071-6).

- Li, Y., Huang, J., Tian, F., Wang, H.-A., y Dai, G.-Z. (2019). Gesture interaction in virtual reality. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1:84–112. doi:[10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006](https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006).
- Licht, D., Polzella, D., Boff, K., y Armstrong, H. (1989). Human factors, ergonomics, and human factors engineering: An analysis of definitions. doi:[10.13140/RG.2.1.4367.3365](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4367.3365).
- Lindeman, R. W., Sibert, J. L., y Hahn, J. K. (1999). Towards usable vr. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems the CHI is the limit - CHI '99*, pages 64–71. ACM Press. doi:[10.1145/302979.302995](https://doi.org/10.1145/302979.302995).
- Lombard, M., Ditton, T. B., y Weinstein, L. (2009). Measuring presence: the temple presence inventory. In *Proceedings of the 12th annual international workshop on presence*, pages 1–15.
- Longo, R. (1995). Johnny mnemonic. <https://www.imdb.com/title/tt0113481/>.
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J., y Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 31:557–564. doi:[10.3758/BF03200735/METRICS](https://doi.org/10.3758/BF03200735/METRICS).
- Manghisi, V. M., Uva, A. E., Fiorentino, M., Gattullo, M., Boccaccio, A., y Monno, G. (2018). Enhancing user engagement through the user centric design of a mid-air gesture-based interface for the navigation of virtual-tours in cultural heritage expositions. *Journal of Cultural Heritage*, 32:186–197. doi:[10.1016/j.culher.2018.02.014](https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.014).
- Manning, L. (1975). *The man who awoke*. New York: Ballantine Books.
- Markham, A. N. (1998). *Life Online: Researching Real Experience in Virtual Space*. Alta-Mira Press.
- Marre, Q., Caroux, L., y Sakdavong, J.-C. (2021). Video game interfaces and diegesis: The impact on experts and novices' performance and experience in vir-

- tual reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37:1089–1103. doi:[10.1080/10447318.2020.1870819](https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1870819).
- Masoudi, N., Fadel, G. M., Pagano, C. C., y Elena, M. V. (2019). A review of affordances and affordance-based design to address usability. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1):1353–1362. doi:[10.1017/dsi.2019.141](https://doi.org/10.1017/dsi.2019.141).
- McCormick, E. J. (1957). *Human engineering*. McGraw-Hill Book Company. doi:[10.1037/13184-000](https://doi.org/10.1037/13184-000).
- McMahan, A. (2004). *The Video Game Theory Reader*, volume 1, pages 67–86. Taylor & Francis, 1 edition. doi:[10.4324/9780203700457](https://doi.org/10.4324/9780203700457).
- Meta (2016). Oculus Rift Pre-Orders Now Open, First Shipments March 28. <https://www.meta.com/en-gb/blog/quest/oculus-rift-pre-orders-now-open-first-shipments-march-28/>. Accedido: 2024-04-30.
- Meta (2020). Meta quest 2. <https://www.oculus.com/quest-2>. Accedido: 2024-04-30.
- Meta (2022). Meta quest pro. <https://www.meta.com/es/quest/quest-pro/>. Accedido: 2024-04-30.
- Miao, W., Hsiao, F., Sheng, Y., Lee, T., Hong, Y., Tsai, C., Chen, H., Liu, Z., Lin, C., Chung, R., Ye, Z., Horng, R., Chen, S., Kuo, H., y He, J. (2023). Microdisplays: Mini-led, micro-oled, and micro-led. *Advanced Optical Materials*. doi:[10.1002/adom.202300112](https://doi.org/10.1002/adom.202300112).
- Michailidis, L., Balaguer-Ballester, E., y He, X. (2018). Flow and immersion in video games: The aftermath of a conceptual challenge. *Frontiers in Psychology*, 9. doi:[10.3389/fpsyg.2018.01682](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01682).
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., y Kishino, F. (1995). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In Das, H., editor, *Telem manipulator and*

- Telepresence Technologies*, volume 2351, pages 282 – 292. International Society for Optics and Photonics, SPIE. doi:[10.1117/12.197321](https://doi.org/10.1117/12.197321).
- Mital, A. y Faard, H. F. (1990). Effects of sitting and standing, reach distance, and arm orientation on isokinetic pull strengths in the horizontal plane. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 6:241–248. doi:[10.1016/0169-8141\(90\)90038-4](https://doi.org/10.1016/0169-8141(90)90038-4).
- Montagu, M. F. A. y Brožek, J. (1960). *A handbook of anthropometry*. Charles C Thomas Publisher. doi:[10.1037/12018-000](https://doi.org/10.1037/12018-000).
- Moreno-Fernández, R., García-León, D., Peñas, G., Martín-Romero, R., Buades-Sitjar, F., y Sampedro-Piquero, P. (2023a). Immersive virtual plus-maze to examine behavior and psychophysiological-related variables in young people with problematic alcohol and cannabis consumption. *Neurobiology of Stress*, 26. doi:[10.1016/j.ynstr.2023.100564](https://doi.org/10.1016/j.ynstr.2023.100564).
- Moreno-Fernández, R. D., García-León, D., Peñas, G., Rodríguez-Espinosa, D., Álvaro Fernández-Moreno, Roncero, D., Martín-Romero, R., y Sampedro-Piquero, P. (2023b). Human virtual reality elevated-plus-maze as a tool for the assessment of psychophysiological alterations in alcohol and cannabis use. a translational approach. *IBRO Neuroscience Reports*, 15:S873. doi:[10.1016/j.ibneur.2023.08.1819](https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2023.08.1819).
- Muhanna, M. A. (2015). Virtual reality and the cave: Taxonomy, interaction challenges and research directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 27:344–361. doi:[10.1016/j.jksuci.2014.03.023](https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2014.03.023).
- Muñoz-Saavedra, L., Miró-Amarante, L., y Domínguez-Morales, M. (2020). Augmented and virtual reality evolution and future tendency. *Applied Sciences*, 10:322. doi:[10.3390/app10010322](https://doi.org/10.3390/app10010322).
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A., y Barfield, W. (2000). A review of presence and performance in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 12:1–41. doi:[10.1207/S15327590IJHC1201_1](https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1201_1).

- Nicholson, A. S. (1991). Anthropometry in workspace design. In Mital, A. y Karwowski, W., editors, *Workspace, Equipment and Tool Design*, volume 15, pages 3–28. Elsevier. doi:[10.1016/B978-0-444-87441-2.50006-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-87441-2.50006-6).
- Nilsson, N. C. ., Nordahl, R. ., y Serafin, S. (2016). Immersion revisited: A review of existing definitions of immersion and their relation to different theories of presence. *Human Technology*, 12:108–134. doi:[10.17011/ht/urn.201611174652](https://doi.org/10.17011/ht/urn.201611174652).
- Norman, D. A. (2007). *Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things*. Basic books.
- Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things: Revised and expanded edition*. Basic books.
- Norton, K. y Olds, T. (1996). *Anthropometrica: a textbook of body measurement for sports and health courses*. UNSW press.
- Nowak, E. (1989). Workspace for disabled people. *Ergonomics*, 32:1077–1088. doi:[10.1080/00140138908966875](https://doi.org/10.1080/00140138908966875).
- Oculus (2012). Oculus rift: Step into the game. <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game>. Accedido: 2024-04-30.
- O’Hagan, R., Zelinsky, A., y Rougeaux, S. (2002). Visual gesture interfaces for virtual environments. *Interacting with Computers*, 14:231–250. doi:[10.1016/S0953-5438\(01\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(01)00050-9).
- Parsons, T. D. (2015). Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. doi:[10.3389/fnhum.2015.00660](https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660).
- Peñas, G. y Peinado, F. (2018). *An Approach to Basic Emotion Recognition Through Players Body Pose Using Virtual Reality Devices*, volume 10714, pages 61–65. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-319-76270-8_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76270-8_5).

- Pheasant, S. y Haslegrave, C. M. (2018). *Bodyspace*. CRC Press. doi:[10.1201/9781315375212](https://doi.org/10.1201/9781315375212).
- Riot Games (2009). League of legends. <https://www.leagueoflegends.com/>. Riot Games. Accedido: 2024-04-30.
- Riva, G. (1998). Virtual environments in neuroscience. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2:275–281. doi:[10.1109/4233.737583](https://doi.org/10.1109/4233.737583).
- Riva, G., Wiederhold, B. K., y Mantovani, F. (2019). Neuroscience of virtual reality: From virtual exposure to embodied medicine. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 22:82–96. doi:[10.1089/cyber.2017.29099.gri](https://doi.org/10.1089/cyber.2017.29099.gri).
- Riva, G., Wiederhold, B. K., y Molinari, E., editors (1998). *Virtual environments in clinical psychology and neuroscience: Methods and techniques in advanced patient-therapist interaction*, volume 58. IOS Press, 1 edition.
- Robertson, M. M., Huang, Y.-H., O’Neill, M. J., y Schleifer, L. M. (2008). Flexible workspace design and ergonomics training: Impacts on the psychosocial work environment, musculoskeletal health, and work effectiveness among knowledge workers. *Applied Ergonomics*, 39:482–494. doi:[10.1016/j.apergo.2008.02.022](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.02.022).
- Salomoni, P., Prandi, C., Roccetti, M., Casanova, L., y Marchetti, L. (2016). Assessing the efficacy of a diegetic game interface with oculus rift. In *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pages 387–392. IEEE. doi:[10.1109/CCNC.2016.7444811](https://doi.org/10.1109/CCNC.2016.7444811).
- Salomoni, P., Prandi, C., Roccetti, M., Casanova, L., Marchetti, L., y Marfia, G. (2017). Diegetic user interfaces for virtual environments with hmds: a user experience study with oculus rift. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 11:173–184. doi:[10.1007/s12193-016-0236-5](https://doi.org/10.1007/s12193-016-0236-5).

- Santos, A., Zarrakonandia, T., Díaz, P., y Aedo, I. (2017). A comparative study of menus in virtual reality environments. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pages 294–299. ACM. doi:[10.1145/3132272.3132277](https://doi.org/10.1145/3132272.3132277).
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1:120–126. doi:[10.1162/pres.1992.1.1.120](https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120).
- Skarbez, R., Smith, M., y Whitton, M. C. (2021). Revisiting milgram and kishino’s reality-virtuality continuum. *Frontiers in Virtual Reality*, 2. doi:[10.3389/frvir.2021.647997](https://doi.org/10.3389/frvir.2021.647997).
- Slater, M., Lotto, B., Arnold, M. M., y Sanchez-Vives, M. V. (2009). How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement. *Anuario de psicología*, 40:193–210.
- Slater, M. y Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (five): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6:603–616. doi:[10.1162/pres.1997.6.6.603](https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603).
- Smilegate (2019). Lost Ark. <https://www.playlostark.com/>. Smilegate.
- Smyth, J., Jennings, P., Mouzakitis, A., y Birrell, S. (2018). Too sick to drive: How motion sickness severity impacts human performance. In *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)*, pages 1787–1793.
- Spiegel, B. (2020). *VRx: How Virtual Therapeutics Will Revolutionize Medicine*. Basic Books.
- Stanney, K. M., Nye, H., Haddad, S., Hale, K. S., Padron, C. K., y Cohn, J. V. (2021). *EXTENDED REALITY (XR) ENVIRONMENTS*, pages 782–815. Wiley. doi:[10.1002/9781119636113.ch30](https://doi.org/10.1002/9781119636113.ch30).

- Statista (2022). Consumer virtual reality (vr) hardware and software market revenue worldwide from 2016 to 2023. <https://www.statista.com/statistics/528779/virtual-reality-market-size-worldwide/>. Accedido: 2024-04-30.
- Stephenson, N. (1992). *Snow crash*. Bantam Books.
- Stone, N. J. y English, A. J. (1998). Task type, posters, and workspace color on mood, satisfaction, and performance. *Journal of Environmental Psychology*, 18:175–185. doi:[10.1006/jevp.1998.0084](https://doi.org/10.1006/jevp.1998.0084).
- Sutcliffe, A. G. y Kaur, K. D. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour & Information Technology*, 19:415–426. doi:[10.1080/014492900750052679](https://doi.org/10.1080/014492900750052679).
- Tanriverdi, V. y Jacob, R. J. (2001). Vrid. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '01*, page 175. ACM Press. doi:[10.1145/505008.505042](https://doi.org/10.1145/505008.505042).
- Tarr, M. J. y Warren, W. H. (2002). Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond. *Nature Neuroscience*, 5:1089–1092. doi:[10.1038/nn948](https://doi.org/10.1038/nn948).
- Topinard, P. (1881). Observations upon the methods and processes of anthropometry. *The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 10:212. doi:[10.2307/2841609](https://doi.org/10.2307/2841609).
- Tosi, F. (2020). *Design for Ergonomics*, pages 31–45. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-030-33562-5_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33562-5_2).
- Trabelsi-Zoghalmi, A. y Touzani, M. (2019). How real are virtual experiences? *European Journal of Marketing*, 53:1612–1636. doi:[10.1108/EJM-10-2017-0776](https://doi.org/10.1108/EJM-10-2017-0776).
- Ubisoft (2016). Watch Dogs 2. <https://www.ubisoft.com/en-us/game/watch-dogs/watch-dogs-2/>. Ubisoft.

- Valve Corporation (2020). Half-Life: Alyx. https://store.steampowered.com/app/546560/HalfLife_Alyx/. Valve Corporation.
- Valve Corporation (2022). Steam hardware & software survey. <https://store.steampowered.com/hwsurvey/Steam-Hardware-Software-Survey-Welcome-to-Steam>. Accedido: 2024-04-30.
- Vischer, J. C. (2007). The effects of the physical environment on job performance: towards a theoretical model of workspace stress. *Stress and Health*, 23:175–184. doi:[10.1002/smi.1134](https://doi.org/10.1002/smi.1134).
- Vlachos, A. (2015). Advanced vr rendering. In *Game Developers Conference*.
- Vohera, C., Chheda, H., Chouhan, D., Desai, A., y Jain, V. (2021). Game engine architecture and comparative study of different game engines. In *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–6. IEEE. doi:[10.1109/ICCCNT51525.2021.9579618](https://doi.org/10.1109/ICCCNT51525.2021.9579618).
- Wachowski, L. y Wachowski, L. (1999). The matrix. Warner Bros Roadshow Entertainment.
- Weinbaum, S. G. (1935). *Pygmalion's spectacles*. Simon and Schuster.
- Wiley, E., Khattab, S., y Tang, A. (2022). Examining the effect of virtual reality therapy on cognition post-stroke: a systematic review and meta-analysis. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 17(1):50–60. doi:[10.1080/17483107.2020.1755376](https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1755376).
- Wilson, J. R. (2000). Fundamentals of ergonomics in theory and practice. *Applied Ergonomics*, 31:557–567. doi:[10.1016/S0003-6870\(00\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00034-X).
- Witmer, B. G. y Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7:225–240. doi:[10.1162/105474698565686](https://doi.org/10.1162/105474698565686).

- Wolf, D., Gugenheimer, J., Combosch, M., y Rukzio, E. (2020). Understanding the heisenberg effect of spatial interaction: A selection induced error for spatially tracked input devices. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–10. ACM. doi:[10.1145/3313831.3376876](https://doi.org/10.1145/3313831.3376876).
- Wong, T. L., Yun, Z., Ambur, G., y Etter, J. (2017). Folded optics with birefringent reflective polarizers. In Kress, B. C., Osten, W., y Urbach, H. P., editors, *PROCEEDINGS OF SPIE*, page 103350E. doi:[10.1117/12.2270266](https://doi.org/10.1117/12.2270266).
- Zong-Ming, L. (2006). Functional degrees of freedom. *Motor Control*, 10:301–310. doi:[10.1123/mcj.10.4.301](https://doi.org/10.1123/mcj.10.4.301).

Anexo A

Glosario

AR

Del inglés Augmented Reality, realidad aumentada.

Body Tracking

Tecnología que sigue el posicionamiento del cuerpo y sus extremidades.

Component

En Unity, elemento que se puede agregar a un GameObject <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Component.html>

Control

Elemento interactuable de la interfaz de usuario.

Controlador

Periférico físico que permite al usuario interactuar con el entorno digital.

DoF

Del inglés Degrees of Freedom, grados de libertad. Número de coordenadas independientes necesarias para determinar la posición de un sistema.

Eye Tracking

Tecnología que sigue el posicionamiento de los ojos.

Face Tracking

Tecnología que detecta las expresiones faciales de la cara.

FPS

Del inglés frames per second, fotogramas por segundo.

GameObject

En Unity, entidades que pueden existir dentro de una escena <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/GameObject.html>

Hand-tracking

Tecnología para el seguimiento de manos.

HCI

Del inglés Human Computer Interaction, interacción humano-computador.

Headset

Ver HMD.

HMD

Del inglés Head Mounted Display, dispositivo que el usuario debe colocarse en la cabeza. En VR aplica al visor junto con los mecanismos que permiten su sujeción para que no se caiga con los movimientos.

Inside out Tracking

Tecnología de seguimiento en la que los mecanismos encargados de la localización se encuentran en el propio dispositivo a ubicar.

IoT

Del inglés Internet of Things, Internet de las cosas.

MR

Del inglés Mixed Reality, realidad mixta.

MonoBehaviour

En Unity, clase base para los scripts programables por el desarrollador <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/MonoBehaviour.html>

Motion sickness

En español cinetosis. Situación de malestar corporal debida a la falta de sincronía entre una simulación y la percepción sensorial. También llamado Simulation Sickness.

Prefab

En Unity, plantillas de GameObject que se pueden instanciar en las escenas <https://docs.unity3d.com/Manual/Prefabs.html>

ScriptableObject

En Unity, entidades que existen como recursos del proyecto y no están en la escena <https://docs.unity3d.com/Manual/class-ScriptableObject.html>

XR

Del inglés eXtended Reality, realidad extendida.

VE

Del inglés Virtual Environment, entorno virtual. En nuestro trabajo hacemos referencia a esto como entornos digitales.

VR

Del inglés Virtual Reality, Realidad Virtual.

Anexo B

Datos de la primera fase

Tabla B.1: Resultados prueba espacial. n = 41

Sexo	Altura	Botón	F	Palanca	F	Dial	F	Deslizador	F	Interruptor	F
M	1,83447	8,07895	0	13,89540	0	9,84110	0	6,71324	0	5,43053	0
M	1,79058	11,49755	0	20,97752	0	23,26733	4	9,81844	0	6,97838	0
M	1,68538	9,81752	0	19,45827	0	16,73273	0	15,05733	0	8,95029	0
F	1,71534	7,55693	0	18,50868	0	13,01285	0	11,65012	0	6,81409	0
F	1,75510	4,91813	0	28,20467	0	25,34509	0	12,10840	0	12,99052	0
M	1,76838	7,23765	0	11,32765	0	10,67043	1	8,26413	0	5,95679	0
F	1,78803	6,29224	0	16,66618	0	11,9297	0	11,47133	0	6,83550	2
M	1,91541	7,57601	0	15,57092	0	14,04059	0	9,88559	0	6,05431	0
M	1,82663	11,95698	0	23,52441	0	32,42648	1	12,50989	0	7,85437	0
M	1,83132	12,35843	0	18,25056	0	17,98425	0	9,47218	0	6,53862	0
F	1,71971	6,15735	0	16,69942	0	15,99564	0	8,12082	0	6,59211	0
M	1,74656	7,85779	0	16,29732	0	15,11293	1	10,46637	0	7,03359	0
M	1,69736	18,37014	0	45,66327	0	53,80698	2	11,38196	0	9,47989	0
M	1,88976	10,39124	0	20,39648	0	31,10876	1	11,13654	0	7,51541	0
F	1,82581	8,69473	0	14,14132	0	13,37054	0	10,05313	0	7,19083	1
M	1,83240	8,13187	0	21,44599	0	15,99565	1	10,81248	0	6,45731	1
F	1,76714	8,65764	0	22,46308	0	27,18770	4	11,02475	0	8,65965	0
M	1,74280	17,37566	0	21,33492	0	25,01016	1	16,92264	0	7,90967	0
M	1,83261	21,23001	0	18,51242	0	16,54971	0	11,46228	0	10,93961	0
M	1,90374	9,47811	0	18,60858	0	50,04279	9	18,02853	0	9,43761	0
F	1,68883	10,79543	0	16,63264	1	24,94279	1	12,22034	0	7,83994	0
M	1,84187	13,11740	0	21,00005	0	26,4062	1	14,51022	0	10,05673	0
M	1,86049	6,81981	0	14,41000	0	12,66649	0	8,09440	0	7,23543	0
M	1,78674	9,73586	0	14,82259	0	13,12463	0	7,83005	0	7,67084	2
M	1,80937	6,20083	0	15,50476	0	9,76371	0	8,94620	0	5,71448	0
M	1,81077	6,77828	0	15,91766	0	12,40031	1	8,65672	0	7,37476	0

F	1,64092	39,26809	2	20,94391	0	28,20856	1	19,06958	0	37,03545	0
M	1,82333	12,83744	0	23,7252	0	19,53677	0	17,57071	0	11,44026	0
M	1,75862	6,77440	0	25,63559	0	14,91188	0	10,1868	0	7,19916	0
F	1,79237	7,49051	0	18,67652	0	12,54405	0	9,76335	0	6,51073	0
M	1,73486	9,21492	0	18,91046	0	34,15831	1	21,89265	0	25,13092	0
M	1,82119	11,49291	1	18,45185	0	20,19559	1	8,98105	0	6,21077	0
M	1,64144	8,98061	0	19,59228	1	15,28085	0	9,73007	0	7,23438	1
F	1,68816	5,59147	0	12,47678	0	15,06907	0	7,02606	0	4,67590	0
M	1,73181	7,21091	0	16,28570	0	13,96233	0	9,15944	0	8,81322	0
F	1,69713	8,85434	0	18,41958	0	16,83292	0	10,7905	0	13,69507	0
M	1,74089	9,47495	0	12,99069	0	13,52692	0	10,1427	0	7,69783	0
F	1,91714	7,27110	0	14,47639	0	12,30946	1	9,50571	0	6,09938	0
F	1,83256	6,45239	0	13,19218	0	12,74496	0	7,98647	0	5,53595	0
M	1,80374	7,49092	0	15,54905	0	14,76688	2	9,73996	0	7,25044	0
F	1,93006	6,11213	0	16,73302	0	11,98552	0	8,08720	0	4,83885	0

Tabla B.2: Resultados prueba diegética. n = 33

Sexo	Altura	Botón	F	Palanca	F	Dial	F	Deslizador	F	Interruptor	F
F	1,86106	6,31181	1	15,08046	0	11,15863	0	9,30440	0	8,85873	0
M	1,93224	9,99732	1	18,16219	0	12,13060	0	10,48874	0	6,14319	0
M	1,74762	10,79010	0	17,70515	0	13,44861	1	11,56094	0	9,42783	0
M	1,79025	8,04192	5	16,59927	0	11,66162	0	11,38225	0	8,34425	0
M	1,82966	8,38272	0	21,05085	0	14,38485	0	8,32015	0	8,53307	0
F	1,87541	9,94133	1	15,86171	0	12,58893	0	9,53876	0	8,44452	0
M	1,74758	7,59562	0	19,48174	1	12,00793	1	10,66756	0	10,62274	0
M	1,82880	10,93484	0	23,89011	0	17,61296	0	17,81973	0	10,29282	0
M	1,75735	10,01994	0	19,62572	0	9,57283	0	9,21530	0	7,84108	0
M	1,79993	6,79110	0	17,74916	0	21,33508	0	8,56752	0	7,80803	0
F	1,81588	7,53022	0	11,80699	0	11,58367	0	11,25946	0	8,73418	0
F	1,90551	9,12574	2	14,17527	0	11,5614	0	12,53270	0	7,70749	0
M	1,70763	12,75642	0	25,91472	0	19,97235	0	17,47052	0	22,45200	0
F	1,70902	7,69613	0	15,57120	0	14,07371	1	9,22653	0	7,36099	0
F	1,76889	13,75060	5	18,70998	0	11,10215	0	7,49524	0	7,56259	0
M	1,82336	13,91808	0	27,89168	0	13,62753	0	11,98544	0	9,40515	0
M	1,72473	9,61706	0	16,98979	0	22,9436	0	9,56163	0	8,59006	0
F	1,67747	11,60564	0	20,88805	0	13,48253	0	9,90787	0	12,48807	0
M	1,70947	6,52341	0	20,47469	0	16,74446	0	9,12642	0	11,89609	0
F	1,66609	14,99019	0	17,43653	0	17,55959	2	11,92967	0	9,00293	0
M	1,94610	8,13190	2	14,0516	0	8,71277	0	8,74587	0	6,82477	0

F	1,73990	31,58936	0	26,8979	0	20,22853	0	15,96193	0	13,59419	0
M	1,86833	7,20462	0	16,07336	0	11,13666	0	9,13731	0	6,35582	0
M	1,70686	8,67884	0	19,26831	0	16,65459	1	7,76318	0	23,12163	0
F	1,80821	17,58199	1	14,81127	0	17,45824	0	11,19252	0	11,56218	0
F	1,70475	7,61839	0	17,96156	0	15,07909	0	9,19281	0	7,65053	0
M	1,86422	13,26999	0	18,59828	0	16,72137	0	6,22315	0	20,6203	0
F	1,83265	9,88576	1	18,20829	0	9,91884	0	9,68431	0	9,49451	0
M	1,84043	9,60615	0	16,91158	1	17,67103	0	10,62263	1	8,96935	0
M	1,68167	6,65722	0	12,84575	0	12,13084	0	6,73508	0	7,48375	0
M	1,66680	8,04247	0	22,55252	0	21,68103	0	11,29288	0	8,45575	0
M	1,68177	7,71853	2	14,68864	0	8,50053	0	11,7959	0	8,44482	0
M	1,74921	12,75626	0	20,29639	0	13,28122	0	8,79039	0	8,41081	0

Anexo C

Datos de la segunda fase

Tabla C.1: Resultados propuesta. n = 52

Sexo	Altura	Botón	F	Palanca	F	Dial	F	Deslizador	F	Interruptor	F
F	1,66119	5,01495	0	16,53966	0	6,11095	0	5,37137	0	5,49445	0
F	1,65347	4,76782	0	17,49657	0	10,36667	2	6,20947	0	4,87497	0
F	1,65134	9,29713	0	20,35762	1	12,35706	2	8,43915	0	10,3755	0
M	1,83832	7,69861	1	18,31383	0	7,65102	0	4,59578	0	3,81674	0
M	1,81029	9,45774	0	20,15240	0	7,89362	0	8,13347	0	5,25052	0
M	1,89232	8,02919	0	17,81024	1	10,67062	1	9,07355	0	4,87582	0
M	1,76697	6,99457	0	17,99106	0	14,15591	0	8,48877	0	7,39542	0
M	1,78814	9,17862	0	25,35512	0	15,46835	0	8,07791	0	4,95670	0
M	1,94793	6,33421	0	19,18889	0	8,33379	0	6,37634	0	7,25041	0
M	1,83778	4,53678	0	15,02060	0	9,81017	0	6,31006	0	5,39580	0
M	1,82620	6,62004	0	13,83487	0	7,61381	0	5,01218	0	4,41376	0
M	1,71618	7,35064	0	17,53749	1	9,31575	0	6,32842	0	6,70552	0
M	1,77431	4,52977	0	14,79063	0	10,07668	0	5,65825	0	6,89940	0
M	1,77455	3,93095	0	12,73667	0	6,76419	0	6,85695	0	6,51949	0
M	1,82417	4,45113	0	19,73883	1	9,62468	0	5,76814	0	6,67352	0
F	1,69135	6,59674	0	18,44916	0	11,99695	0	9,13663	0	8,79102	0
M	1,87692	7,29395	0	18,74435	0	10,11020	1	8,79581	0	7,25357	0
F	1,80984	10,7966	0	25,88029	0	16,98941	0	10,87149	0	10,10959	0
M	1,72581	7,91852	0	17,44501	0	9,20125	0	6,67856	0	5,33415	0
F	1,70082	10,89716	0	24,89464	0	12,22842	1	8,15338	0	10,13635	0
F	1,77506	7,71993	0	25,37021	0	14,69051	1	6,90830	0	7,59772	0
F	1,65100	8,03477	0	24,63078	0	10,45406	0	7,25641	0	11,45663	0
F	1,66994	5,55991	0	15,19232	0	6,28935	0	7,65689	0	5,67894	0
M	1,71822	5,75127	0	12,17439	0	8,19908	0	5,86999	0	7,07896	0
M	1,91712	8,47395	0	8,517563	0	7,42815	1	4,355845	0	3,87108	0
M	1,83859	4,47830	0	20,57335	0	6,89401	0	8,03137	0	7,38852	0

M	1,68711	7,79285	0	20,83342	0	19,65508	0	10,27185	0	8,03236	0
M	1,90228	11,42760	0	27,53258	0	20,94366	2	7,73508	0	11,67358	0
M	1,89644	8,19425	0	19,31146	0	6,12267	0	4,21390	0	6,67500	0
M	1,83003	4,09327	0	13,62842	0	6,02921	0	5,41405	0	4,27387	0
M	1,79902	4,63699	1	10,53084	0	7,44473	0	5,29851	0	5,89322	0
M	1,90132	7,45427	0	12,62030	0	7,13715	0	6,29329	0	5,03429	0
M	1,77550	9,41158	0	11,75647	0	7,91344	0	5,17502	0	6,31216	0
M	1,80654	6,07599	0	14,69748	0	7,77857	0	5,18619	0	4,79330	0
M	1,78519	6,51414	1	8,970604	0	5,17883	0	5,23773	0	3,43140	0
F	1,77911	4,50680	0	15,35408	0	9,29211	1	6,21436	0	3,65544	0
F	1,88944	3,53520	0	12,76151	0	7,59538	0	5,63428	0	4,93253	0
M	1,84545	7,98945	0	20,28835	0	11,20070	0	8,97751	0	7,61125	0
M	1,86466	5,96954	0	13,34462	1	8,05594	0	6,25272	0	3,67326	0
M	1,81385	7,21283	0	13,43236	0	8,24007	1	8,59924	0	8,13318	0
M	1,75823	5,05276	0	13,62393	0	11,81177	0	8,94455	0	5,01881	0
F	1,67136	9,09087	0	15,20183	1	8,32164	0	5,95386	0	8,43590	0
M	1,79440	8,72801	0	13,22438	0	8,87827	0	10,60925	0	6,15054	0
M	1,83778	4,21055	0	18,95533	1	10,71355	0	8,25330	0	4,81690	0
M	1,61111	3,95927	0	12,71434	1	6,43535	0	10,37050	0	3,24045	0
F	1,65886	5,26904	0	15,85271	1	8,97763	0	7,15482	0	5,29529	0
M	1,71713	4,89107	0	8,372375	0	6,78964	1	5,17905	0	3,10828	0
M	1,87373	5,69783	0	14,75465	1	8,35722	0	6,57562	0	7,99548	0
F	1,67983	5,47346	0	16,68032	0	7,22201	0	5,39479	0	4,55792	0
M	1,77899	3,45036	0	8,969482	0	7,62265	0	7,27539	0	6,66066	0
M	1,75701	4,85925	0	8,420975	0	5,87317	0	4,42784	0	3,78444	0
M	1,83505	4,62193	1	11,40407	0	7,50998	0	5,14182	0	4,54215	0

Anexo D

Ejemplos de interfaces



Figura D.1: Interfaz diegética en Dead Space 3. Fuente: Visceral Games



Figura D.2: Interfaz meta en Watchdogs 2. Fuente: Ubisoft



Figura D.3: Interfaz espacial y no diegética en League of Legends. Fuente: Riot Games



Figura D.4: Interfaz no diegética en Lost Ark. Fuente: Smilegate



Figura D.5: Interfaz diegética en Job Simulator. Fuente: Owlchemy Labs



Figura D.6: Interfaz espacial en Half-Life: Alyx. Fuente: Valve

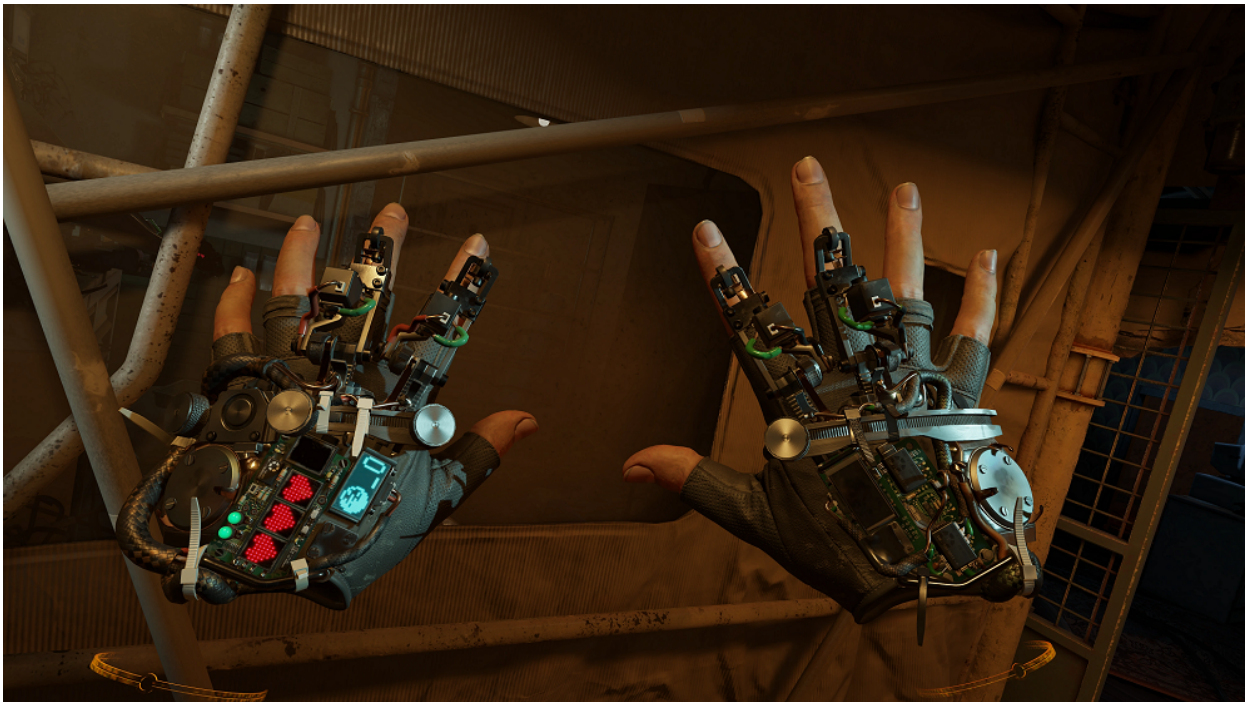


Figura D.7: Interfaz diegética en Half-Life: Alyx. Fuente: Valve

Anexo E

Figuras ampliadas de la arquitectura

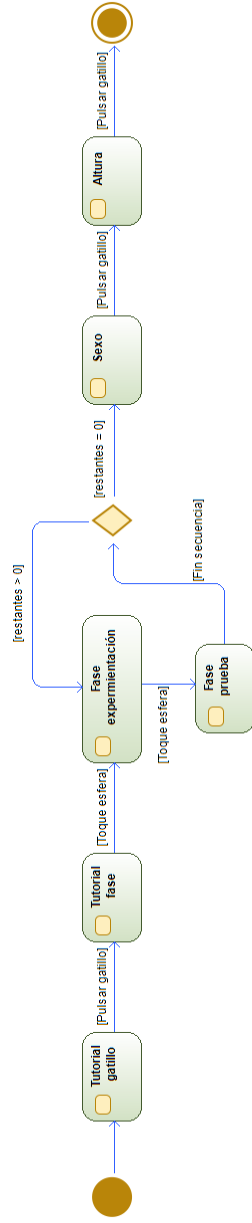


Figura E.1: Diagrama de flujo de la aplicación en la primera fase. Fuente: Propia

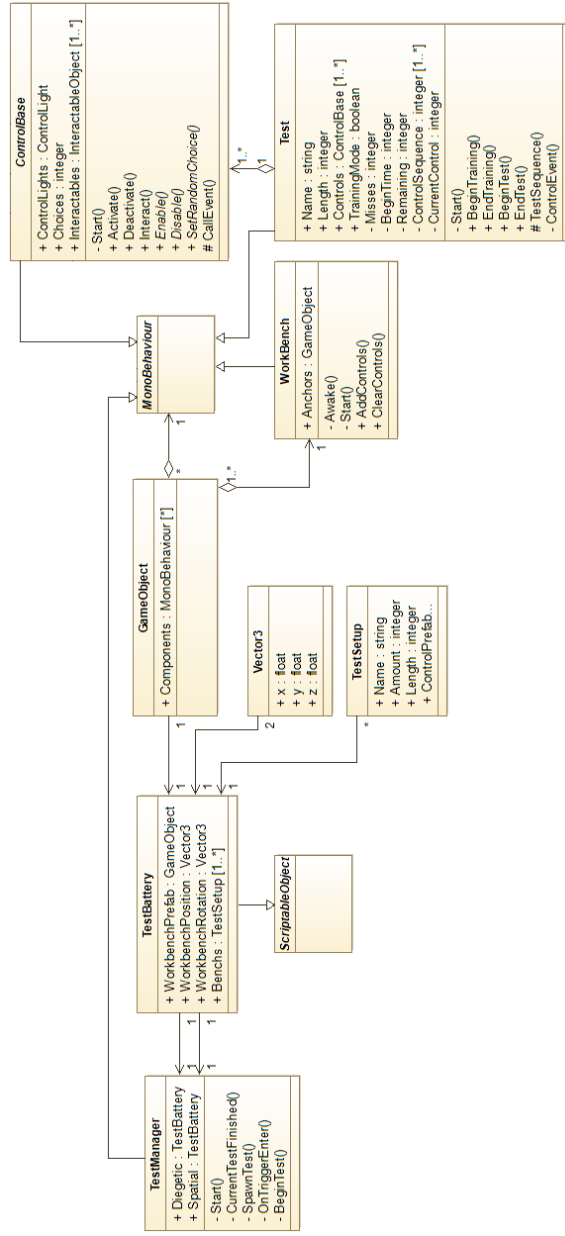


Figura E.2: Diagrama de clases relativo a la gestión de las pruebas. Fuente: Propia

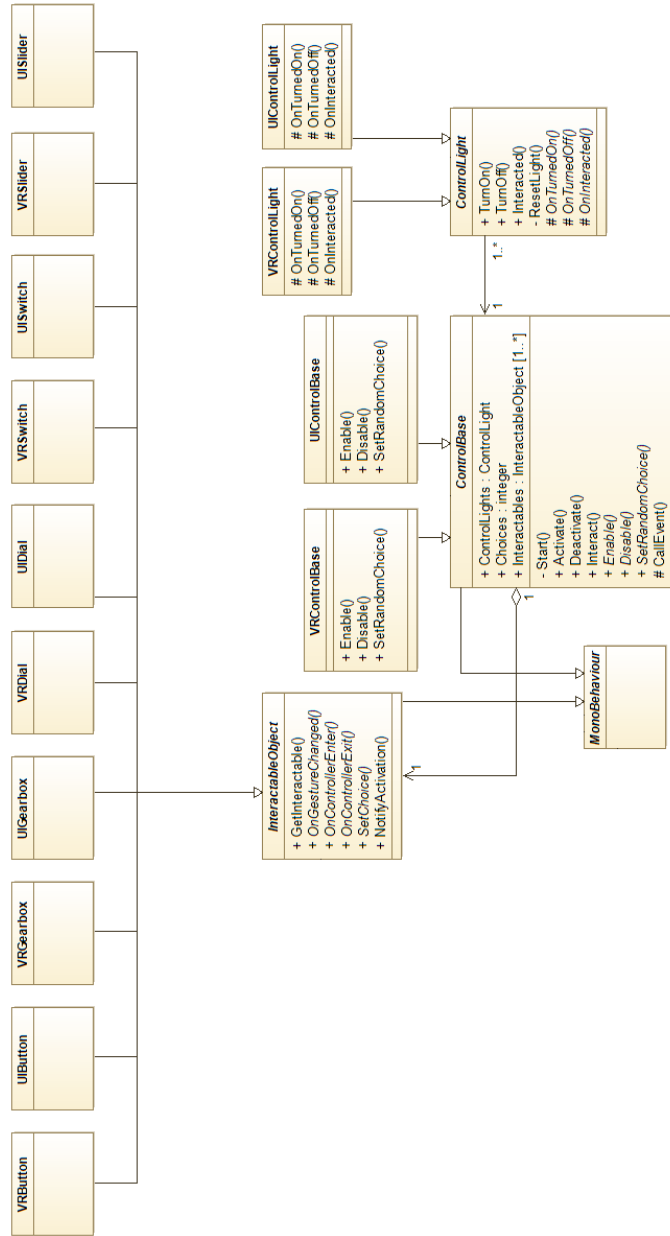


Figura E.3: Diagrama de clases de la jerarquía de controles. Fuente: Propia

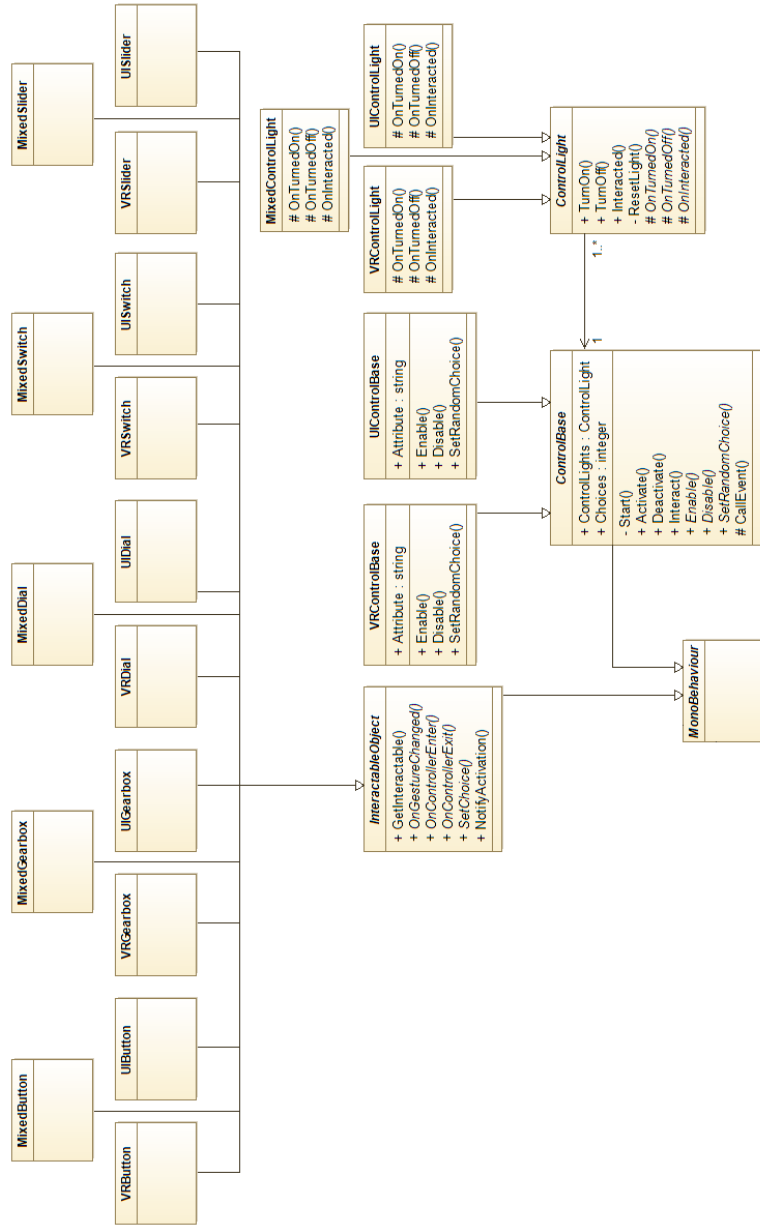


Figura E.6: Diagrama de clases de la jerarquía de controles de la nueva propuesta.

Anexo F

Figuras adicionales del análisis

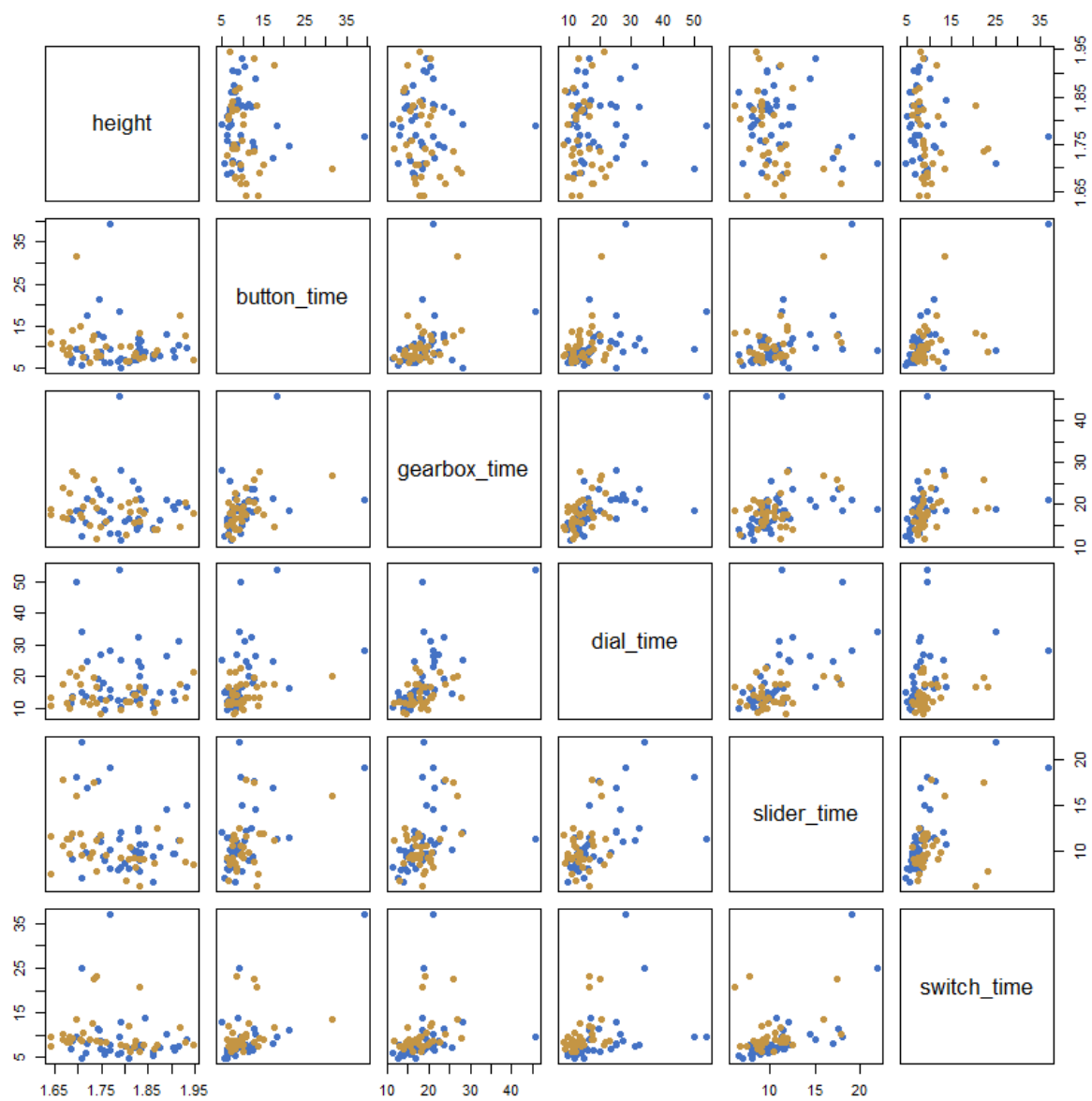


Figura F.1: Matriz con diagramas de dispersión para cada combinación de control en la primera fase: diegética (azul), espacial (mostaza). Fuente: Propia

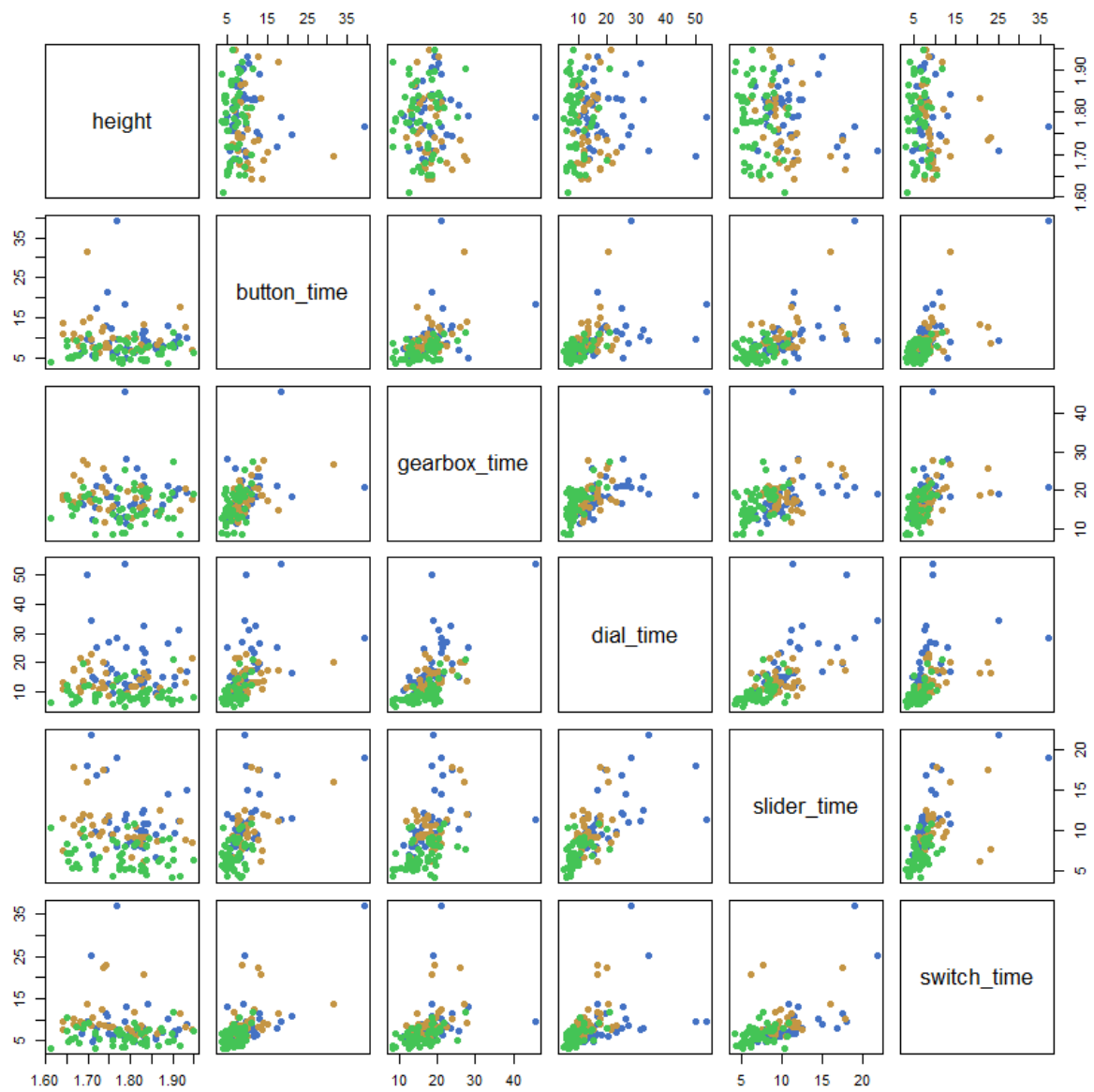


Figura F.2: Matriz con diagramas de dispersión para cada combinación de control en la segunda fase: diegética (azul), espacial (mostaza) y mixta (verde). Fuente: Propia

Anexo G

Documentación para las pruebas

Hoja de Información para Participantes de Investigación

El propósito de este documento es proveer a los participantes en esta investigación con una clara explicación del procedimiento a realizar.

La presente investigación es conducida por Gabriel Peñas, de la Universidad Francisco de Vitoria. La meta de este estudio es comprobar la eficiencia de interfaces de usuario en Realidad Virtual.

Para poder participar es necesario firmar el Consentimiento Informado.

Durante el experimento dispondrá de la ayuda de los investigadores. Si necesita ayuda en cualquier momento no dude en hacerla saber. Por favor, preste atención a las indicaciones que se le transmitan para la correcta realización de las pruebas. La siguiente información se le transmitirá de manera oral antes de comenzar.

En primer lugar, debe colocarse el dispositivo de Realidad Virtual y coger los dos controladores.

Se encontrará en una sala virtual donde se realizarán las pruebas. No necesitará desplazarse, la zona marcada será segura y no golpeará con nada en el mundo físico por lo que debe sentirse seguro.

Podrá ver la información relativa a los pasos a seguir como recordatorio. Se le indicará cómo accionar el controlador para poder interactuar con el entorno.

Una vez haya visualizado la información pasará a realizar el experimento. Habrá una serie de controles con los que interactuar. Para cada uno de ellos dispondrá de dos fases.

- Fase de aprendizaje: Podrá interactuar con los controles todas las veces que considere necesario para comprender el funcionamiento del control. Una vez esté satisfecho debe tocar la esfera de control que está a su espalda para continuar. Al interactuar con el control recibirá una respuesta visual y sonora.
- Fase de prueba: Verá un banco de pruebas con varias instancias del control. Deberá interactuar con el control que se indique con el color magenta.

Al terminar con un control se repetirá el proceso con el siguiente.

Una vez se hayan completado todos los controles se le pedirá registrar su altura. Para ello, coloque el controlador en su cabeza como se le indicará en una figura y apriete el gatillo para confirmar.

Por último, debemos introducir su sexo. Si es masculino apriete el gatillo izquierdo, si es femenino el derecho. Recuerde que es sexo biológico, no género.

Estos dos últimos datos tienen una razón antropométrica y nos ayudarán a identificar problemas en el diseño de los controles originados por las diferentes medidas del cuerpo.

Consentimiento Informado para Participantes de Investigación

El propósito de este documento es proveer a los participantes en esta investigación con una clara explicación de la naturaleza de esta, así como de su rol en ella como participantes.

La presente investigación es conducida por Gabriel Peñas, de la Universidad Francisco de Vitoria. La meta de este estudio es comprobar la eficiencia de interfaces de usuario en Realidad Virtual.

Si usted accede a participar en este estudio, se le pedirá participar en un experimento, registrar tiempos de interacción, su altura y su sexo. Esto tomará aproximadamente 10 minutos de su tiempo.

La participación en este estudio es estrictamente voluntaria. La información que se recoja será anónima y no se usará para ningún otro propósito fuera de los de esta investigación. Sus resultados y datos serán codificados usando un número de identificación y, por lo tanto, serán completamente anónimos.

Si tiene alguna duda sobre este proyecto, puede hacer preguntas en cualquier momento durante su participación en él. Igualmente, puede retirarse del proyecto en cualquier momento sin que eso lo perjudique en ninguna forma.

Desde ya le agradecemos su participación.

Yo,..... (nombre y apellidos del participante)

- He leído el documento de información que se me ha entregado.
- He podido hacer preguntas sobre el estudio y he recibido suficiente información sobre el mismo.
- He hablado con Gabriel Peñas Rodríguez
- Comprendo que mi participación es voluntaria.
- Comprendo que puedo retirarme del estudio:
 - Cuando quiera
 - Sin tener que dar explicaciones
- Presto libremente mi conformidad para participar en el estudio.
- Deseo ser informado sobre los resultados del estudio (marque lo que proceda):
 - Si No
- He recibido una copia firmada de este Consentimiento Informado.

Firma del participante:

Fecha:

- He explicado la naturaleza y el propósito del estudio al participante.

Firma del Investigador:

Fecha:

Anexo H

Contribuciones

H.1. Congreso ACE 2017

Peñas, G., Peinado, F. (2018). An Approach to Basic Emotion Recognition Through Players Body Pose Using Virtual Reality Devices. En A. D. Cheok, M. Inami, T. Romão (Eds.), *Advances in Computer Entertainment Technology* (Vol. 10714, pp. 61–65). Springer International Publishing.

doi:[10.1007/978-3-319-76270-8_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76270-8_5)

H.2. Poster 11th World Congress of Neuroscience

Moreno-Fernández, R. D., García-León, D., Peñas, G., Rodríguez-Espinosa, D., Fernández-Moreno, Á., Roncero, D., Martín-Romero, R., y Sampedro-Piquero, P. (2023). Human Virtual Reality Elevated-Plus-Maze as a tool for the assessment of psychophysiological alterations in alcohol and cannabis use. A translational approach. *IBRO Neuroscience Reports*, 15, S873.

doi:[10.1016/j.ibneur.2023.08.1819](https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2023.08.1819)

H.3. Artículo en Neuroscience

Moreno-Fernández, R. D., García-León, D., Peñas, G., Martín-Romero, R., Buades-Sitjar, F., y Sampedro-Piquero, P. (2023). Immersive virtual plus-maze to examine behavior and psychophysiological-related variables in young people with problematic alcohol and cannabis consumption. *Neurobiology of Stress*, 26(100564).

doi:[10.1016/j.ynstr.2023.100564](https://doi.org/10.1016/j.ynstr.2023.100564)