

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Visión biónica binocular simulada en entornos virtuales

Autor: Rubén Díaz Molina

Tutores: Begoña Chiquinquirá Arrue Ulles
Alejandro Barriga Rivera

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Dpto. Física Aplicada III
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Visión biónica binocular simulada en entornos virtuales

Autor:

Rubén Díaz Molina

Tutores:

Begoña Chiquinquirá Arrue Ulles

Profesora Titular

y

Alejandro Barriga Rivera

Profesor Contratado Doctor

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Dpto. Física Aplicada III

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Visión biónica binocular simulada en entornos virtuales

Autor: Rubén Díaz Molina

Tutores: Begoña Chiquinquirá Arrue Ulles
Alejandro Barriga Rivera

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Con la finalización de este Trabajo de Fin de Grado de Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica, acabo una etapa muy importante de mi vida que, como todas, ha estado marcada por altos y bajos. Tras esta etapa, da comienzo una nueva que afronto con esperanza e ilusión, pero sin olvidar el esfuerzo realizado durante los años que ha durado mi formación universitaria.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis padres Raquel y Rafa, por haber hecho posible que haya estudiado en Sevilla la carrera que desde un principio quería hacer, y que, a pesar de momentos de duda sobre si estaba realizando la carrera adecuada, ha acabado siendo sin duda una carrera cuyo final he disfrutado mucho.

En siguiente lugar, quiero dar las gracias a mi novia Alba, por haberme acompañado en mis peores y mejores momentos a lo largo de estos años y haber estado siempre ahí para escucharme y ayudarme cuando lo he necesitado.

Por último, quiero dar las gracias a todos mis amigos y a la gente maravillosa de la que estoy rodeado. Ellos me dan fuerzas y ánimo para seguir todos los días adelante, ayudándome a recargar las pilas y olvidarme de las preocupaciones que rondan por mi cabeza, sin ellos esto tampoco hubiera sido posible. En especial quiero dar las gracias a todos mis amigos de Sevilla, que han hecho de mis años allí unos años que siempre añoraré y que de momento son, sin duda, los mejores de mi vida.

Como he dicho, hoy se cierra una etapa que sé que siempre recordaré con muchísimo cariño, pero la vida son etapas y a la vez, se abre una nueva que estoy completamente ansioso por vivir y disfrutar.

Rubén Díaz Molina

Estudiante del Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Sevilla, 2024

En este Trabajo de Fin de Grado, se ha desarrollado un entorno 3D en Unity en el que se han creado diferentes pruebas con las que se podrá evaluar la capacidad de interacción y percepción espacial de sujetos que sean sometidos a estas pruebas, alternando entre el uso de un filtro elaborado que simula lo que ve un usuario con una prótesis de visión biónica binocular y la realización de dichas pruebas sin ningún tipo de filtro.

El entorno se ha implementado haciendo uso de gafas de realidad virtual, que se han configurado para trabajar dentro del sistema en Unity, para interactuar con una gran variedad de objetos de forma diversa. Esto ha permitido crear un total de 5 pruebas, destinadas a medir la capacidad de los usuarios de reconocer el entorno, figuras tridimensionales, diferenciar volúmenes y navegar por el espacio.

El espacio creado tiene la intención de ser lo más realista posible y todo está hecho de acuerdo con esa base.

Para facilitar el manejo del entorno, se ha desarrollado una interfaz de usuario que solo es accesible para el investigador encargado del manejo del ordenador donde se está llevando a cabo la simulación. Con esta interfaz se pretende hacer más ameno el desarrollo de las pruebas, evitando errores y asegurando así su correcto funcionamiento.

In this Final Degree Project, a 3D environment has been developed in Unity, in which different tests have been created to evaluate the interaction and spatial perception ability of subjects who are subjected to these tests, alternating between the use of an elaborate filter that simulates what a user sees with a binocular bionic vision prosthesis and performing these tests without any filter.

The environment has been implemented using virtual reality glasses that have been configured to work within the system in Unity to interact with a wide variety of objects in diverse ways. This has made it possible to create a total of 5 tests intended to measure the users' ability to recognize the environment, three-dimensional figures, differentiate volumes, and navigate space.

The created space is intended to be as realistic as possible, and everything is made based on that principle.

To facilitate the management of the environment, a user interface has been developed that is only accessible to the researcher in charge of operating the computer where the simulation is being carried out. This interface is intended to make the development of the tests more enjoyable, avoiding errors and ensuring their correct operation.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
1.1 <i>Motivación</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
2 Estado del Arte	3
2.1 <i>Realidad Virtual</i>	3
2.1.1 Definición actual de realidad virtual	3
2.1.2 Historia de la realidad virtual	3
2.2 <i>Visión Biónica</i>	5
2.2.1 Definición actual de visión biónica	5
2.2.2 Historia de la visión biónica	5
2.2.3 Tipos de implantes para la visión biónica	6
2.3 <i>Realidad Virtual y Visión Biónica</i>	8
3 Tecnologías Utilizadas	11
3.1 <i>Unity</i>	11
3.2 <i>Oculus Quest 2 y HTC Vive Cosmos</i>	12
3.2.1 Oculus Quest 2	12
3.2.2 HTC Vive Cosmos	12
4 Desarrollo del entorno en Unity	13
4.1 <i>Arquitectura de Objetos de Unity</i>	13
4.2 <i>Vinculación de las Gafas VR a Unity</i>	14
4.3 <i>Asignación de Entradas y Modelado de las Manos</i>	15
4.4 <i>Movimiento Continuo</i>	17
4.5 <i>Interacción con Objetos</i>	17
4.5.1 Interacción Simple:	18
4.5.2 Interacción de Agarre:	18
4.6 <i>Implementación de la Visión Biónica</i>	20
4.7 <i>Entorno Final</i>	22
4.7.1 Entorno de Familiarización	22
4.7.2 Habitación de Pruebas	23
4.7.3 Interfaz de Investigador	23
5 Pruebas y Objetivos	25
5.1 <i>Selección de Pruebas</i>	25
5.2 <i>Prueba 1: Reconocimiento del Entorno</i>	25
5.2.1 Interfaz de Usuario	25
5.2.2 Interfaz de Investigador	25

5.3	<i>Prueba 2: Reconocimiento de Formas</i>	25
5.3.1	Interfaz de Usuario	26
5.3.2	Interfaz de Investigador	26
5.4	<i>Prueba 3: Discriminación por Tamaño y Apilamiento de Bloques</i>	27
5.4.1	Interfaz de Usuario	27
5.4.2	Interfaz de Investigador	27
5.5	<i>Prueba 4: Navegación Espacial</i>	28
5.5.1	Interfaz de Usuario	28
5.5.2	Interfaz de Investigador	28
5.6	<i>Prueba 5: Ordenado de Objetos</i>	29
5.6.1	Interfaz de Usuario	29
5.6.2	Interfaz de Investigador	29
6	Conclusión	31
6.1	<i>Futuras Líneas de Trabajo</i>	31
	Referencias	33

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** Imagen perteneciente a la patente de la tecnología inmersiva Sensorama. En esta se aprecia la posición que ocuparía el sujeto y parte de los elementos que constituirían esta tecnología. Fuente: [9] 3
- Figura 2** Esquema de comunicación entre las distintas partes del sistema tridimensional de visualización *The Sword of Damocles*, primer dispositivo HMD. El proceso comienza con el Enlace (Linkage), que se trata de un dispositivo mecánico que sigue la posición de la cabeza del usuario. Los datos de posición de la cabeza obtenidos se envían a los Programas del Ordenador (Computer Programs), que determinan la perspectiva que se debe mostrar. A continuación, un Multiplicador de Matrices (Matrix Multiplier) transforma las especificaciones de las líneas 3D de las coordenadas de la sala a coordenadas del ojo. Estas coordenadas se mandan a un Divisor de Recorte (Clipping Divider), que filtra las líneas que deben ser visibles dentro del campo de visión, convirtiendo las líneas 3D en coordenadas 2D ajustadas para la pantalla. Por último, un Controlador de Pantalla Analógica (Analog Display Driver) transforma las especificaciones de la línea 2D en señales de deflexión analógicas que, a través de un tubo de rayos catódicos en miniatura proyectan la imagen en las lentes para que esta sea vista por el usuario. Fuente: [10]. 4
- Figura 3** Radiografía de la cabeza de un sujeto que muestra el dispositivo instalado por Brindley y Lewin en su investigación sobre las sensaciones producidas con la estimulación de la corteza visual. Fuente: [18]. 5
- Figura 4** Dibujo conceptual del sistema de prótesis de retina. En este, la electrónica extraocular encapsulada en un marco de vidrio capturaría una imagen y transmitiría una señal que contendría información de la imagen a la electrónica implantada. La electrónica implantada decodificaría la señal y produciría una salida eléctrica ordenada en la matriz de electrodos localizada en la superficie de la retina. Fuente: [20] 6
- Figura 5** Tamaño de una matriz de 5x5 electrodos, utilizada en experimentos intraoperatorios en la década de los 90 y principios de los 2000, respecto al tamaño de un ojo humano. Fuente: [20] 6
- Figura 6** (A) Fotografía de la parte externa del sistema de prótesis Argus II, que incluye una cámara de video incorporada en unas gafas, una bobina de radiofrecuencia (RF) y una unidad de procesamiento de video (VPU) con batería recargable. (B) Fotografía de la parte implantada del sistema de prótesis Argus II, que incluye la matriz de electrodos 6x10 para la electroestimulación retiniana, la caja de electrónica y la bobina de RF del implante. Fuente: [26]. 7
- Figura 7** Sistema de neuroestimulación con microchip subretinal PRIMA. (A) Gafas transparentes de realidad aumentada PRIMA-2. (B) Implante de 2,2 mm de ancho y 30 μm de espesor, compuesto por píxeles hexagonales de 100 μm de ancho, que incluyen 2 fotodiodos (1, 2) conectados entre el electrodo activo central (3) y un electrodo de retorno circunferencial (4). Fuente: [31]. 8
- Figura 8** Interfaz de Unity en la versión 2021.3. A la izquierda de la imagen, se encuentra el panel de Vistas de la Escena y del Juego. En el centro, en la parte superior, se encuentra la Jerarquía de Objetos. En el centro, en la parte inferior, se encuentra la ventana Proyecto. A la derecha de la imagen, se encuentra el Inspector. 11
- Figura 9** Gafas de realidad virtual y controladores HTC Vive Cosmos. Fuente: [38] 12
- Figura 10** Diagrama de la arquitectura de objetos del programa en Unity. El programa de Unity está formado por 5 elementos principales llamados *Game Objects*. “XR Interaction Manager”, encargado de gestionar las interacciones dentro del entorno de realidad virtual. “XR Origin (XR Rig)”, encargado del manejo de la cámara y los controladores de cada mano. “EventSystem”, encargado de la gestión de los eventos del usuario. “PRUEBAS EXPERIMENTO”, entorno en el que se ubica la simulación, compuesto por la interfaz de usuario (canvas), un entorno de familiarización y otro entorno en el que se desarrollarán las pruebas. “Visión Biónica”, encargado del manejo del filtro de visión biónica binocular. 13
- Figura 11** Dispositivos VR compatibles con el entorno desarrollado. 14
- Figura 12** Esquema de jerarquía de objetos y componentes principales creados para vincular las gafas VR a Unity. Los colores naranja y verde representan los *Game Objects*, mientras que el color morado representa el componente principal de ese objeto. El objeto padre “XR Origin” informa a Unity sobre qué acción se está ejecutando. El objeto hijo “Camera Offset”, define la posición inicial de la cámara y las manos en la escena. Los hijos dependientes de los dos objetos anteriores, “Main Camera”, “Left Hand” y “Right Hand” se comportan según lo establecido en los componentes “XR Controller (Action-Based)”, incluido en los controladores, y

“Tracked Pose Driver”, incluido en la cámara	15
Figura 13 . Forma del modelo 3D de las manos realistas importadas al entorno virtual en Unity cuando no se está pulsando ningún botón de los controladores del HMD. La posición espacial de las manos viene determinada por la ubicación de los controladores.	16
Figura 14 Forma del modelo 3D de las manos realistas importadas al entorno virtual en Unity cuando se están pulsando los gatillos de los controladores del HMD. En la primera imagen, se están pulsando los gatillos traseros L2 y R2. En la segunda y tercera imagen, se están pulsando los botones laterales R4 y L4. La posición espacial de las manos viene determinada por la ubicación de los controladores.	16
Figura 15 Representación esquemática de los componentes añadidos al <i>Game Object</i> “XR Origin (XR Rig)” junto con la dirección y sentido de la información que se pasan unos a otros para poder funcionar. Con estos componentes se implementa el movimiento del jugador, tanto en el espacio como en la cámara.	17
Figura 16 Interacción simple con un cubo programada para cambiar de color cuando se toca y cuando se agarra. (A) Color por defecto del cubo cuando no se está tocando. (B) Interacción al tocar el cubo y no agarrarlo. (C) Interacción al apretar el gatillo que cierra la mano mientras se está tocando el cubo.	18
Figura 17 Tipos de movimiento en la interacción de agarre. (A) instantáneo. (B) Cinemático. (C) Basado en Velocidad.	19
Figura 18 Posición de agarre de un objeto. (A) Posición definida fija. (B) Agarre dinámico.	19
Figura 19 Matriz de 6x10 “fosfenos” aplicada en el entorno virtual para la simulación de la visión biónica, que simula un implante de retina PRIMA.	20
Figura 20 Proceso de aplicación del efecto de post procesado de imagen utilizado para la creación del filtro de visión biónica. (A) Vista normal. (B) Vista tras aplicar el saturado del efecto “Ajuste de Color”. (C) Vista tras aplicar el efecto de “Profundidad de Campo” junto con el de “Ajuste de Color”. (D) Vista al aplicar en conjunto los 3 efectos de “Ajuste de Color”, “Profundidad de Campo” y “Viñeta”.	21
Figura 21 Comparativa entre la visión normal sin aplicar ningún filtro y la visión biónica simulada que imita lo que vería una persona con un implante de retina PRIMA.	21
Figura 22 Texto mostrado en la parte superior derecha de la pantalla del investigador que indica si está activo el filtro de visión biónica y como activar o desactivar este.	22
Figura 23 Entorno de Familiarización. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 24 Habitación virtual en la que se han construido las diferentes pruebas creadas en este proyecto.	23
Figura 25 Interfaz de Investigador en el entorno de familiarización. Fuente: Elaboración Propia.	24
Figura 26 Imagen perteneciente a la prueba 2 tomada desde el punto de vista del sujeto de pruebas, en la que se deberá identificar los objetos que aparezcan sobre la mesa.	26
Figura 27 Interfaz de investigador que se muestra durante el desarrollo de la prueba 2. Los botones que aparecen permiten la creación del objeto que tienen por nombre si el objeto no se encuentra en la escena. Si el objeto ya se ha creado y está en la escena, la pulsación sobre su botón lo hará desaparecer.	26
Figura 28 Prueba 3 desde el punto de vista del sujeto de pruebas. En esta se aprecian 3 bloques de diferente tamaño y color con los que habrá que interactuar.	27
Figura 29 Interfaz de investigador que se muestra durante el desarrollo de la prueba 3. Este permite el reinicio de las piezas a su posición inicial mediante la pulsación del botón “RESET”.	27
Figura 30 Segunda parte de la prueba 4 que muestra el punto de vista del sujeto de pruebas. En esta imagen se aprecia un pulsador rojo que hay que alcanzar y tocar sin colisionar con ninguna de las columnas verdes que hay distribuidas por la habitación.	28
Figura 31 Interfaz de investigador que se muestra durante el desarrollo de la prueba 4. Los 6 botones de PULSADOR crean cada uno un pulsador en una zona distinta de la habitación, el pulsador desaparece cuando el sujeto que está realizando la prueba lo toca. El botón OBSTÁCULOS permite hacer aparecer o desaparecer unas columnas que el usuario deberá evitar a la hora del desarrollo de la prueba.	29
Figura 32 Interfaz de usuario de la prueba 5. En esta se deberán colocar en su mesa correspondiente cada uno	

de los objetos que aparecen amontonados en la caja de la mesa central.

1 INTRODUCCIÓN

*La realidad es meramente una ilusión,
aunque una muy persistente.
Albert Einstein*

En las últimas décadas, y sobre todo, en estos últimos años, la realidad virtual ha evolucionado de ser una curiosidad tecnológica al alcance de unos pocos, a convertirse en una herramienta poderosa altamente versátil con aplicaciones en campos tan diversos como la educación [1], el entretenimiento y la salud [2]. La posibilidad de crear entornos inmersivos realistas o ficticios, así como de simular experiencias complejas, ha permitido el uso de estos dispositivos en la investigación y en el desarrollo de tecnologías avanzadas, entre las que se encuentra la simulación de la visión biónica [3].

1.1 Motivación

La pérdida de visión total o parcial, es un problema que afecta a millones de personas en todo el mundo que tiene un impacto directo negativo en su calidad de vida. A nivel mundial, de los 7,3 mil millones de habitantes del planeta contabilizados en 2015, se estima que 36,0 millones eran ciegos, 216,6 millones de personas tenían una discapacidad visual moderada o grave y 188,5 millones tenían discapacidad visual leve [4], siendo las cataratas, el glaucoma o la degeneración macular relacionada con la edad [17], algunas de las principales causas de ceguera. Algunas de estas enfermedades pueden ser curadas mediante intervenciones quirúrgicas o medicación, pero otras muchas personas ciegas por degeneración o daño grave en la retina, el nervio óptico o la corteza visual, se encuentran sin la posibilidad de acceder a ningún tipo de tratamiento eficaz. Siendo en esos casos, una prótesis visual la única opción [6].

La investigación y el desarrollo actual en materia de prótesis visuales y visión artificial se centra en los implantes retinianos (epirretinianos, subretinianos, supracoroideos) y los implantes corticales [5]. Sin embargo, estas soluciones presentan todavía limitaciones significativas en cuanto a la restauración completa de la visión. Por tanto, hoy en día, la visión biónica no es una solución total al problema de la ceguera, si no, una solución innovadora que busca ofrecer a personas con discapacidad visual, la oportunidad de recuperar parte de su visión o de mejorarla en cuanto sea posible.

Al encontrarse todavía en una fase temprana de su desarrollo, estos sistemas enfrentan desafíos importantes tanto técnicos como quirúrgicos, siendo un gran desafío predecir qué es lo que las personas "ven" cuando usan sus implantes. Además, el campo de visión limitado de las prótesis actuales requiere movimientos de la cabeza para escanear la escena, algo complicado de replicar desde la pantalla de un ordenador [3]. Es aquí donde la realidad virtual puede desempeñar un papel crucial, gracias a la posibilidad de la creación de entornos controlables y altamente adaptables que permiten simular en cierta parte lo que los futuros receptores de estos implantes verán.

Es de esta forma, que la realidad virtual tiene un papel crucial en investigaciones de este tipo, ya que es una herramienta que permite acelerar el desarrollo de tecnologías de visión biónica que buscan restaurar, cada vez de forma más fiel a la realidad, la visión de los pacientes. Por esto, la integración de este tipo de tecnologías en ámbitos de investigación con implantes visuales promete no solo avances técnicos, sino también una mejora sustancial en la autonomía e interacción de los usuarios con su entorno, repercutiendo directamente en la mejora de su calidad de vida.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el de desarrollar un entorno 3D virtual en Unity que permita evaluar la capacidad de interacción y percepción espacial de distintos sujetos dentro de un entorno cuando se les aplique un filtro que simule lo que vería un usuario con una prótesis de visión biónica binocular. El entorno se implementará haciendo uso de unas gafas de realidad virtual y constará de distintos escenarios variables, así como de la posibilidad de activar o desactivar el filtro de visión biónica binocular.

El entorno simulado tratará de imitar una sala de pruebas del mundo real, con el fin de proporcionar una experiencia lo más inmersiva y realista posible, donde sujetos sin problemas de visión realizarán distintas pruebas. El objetivo ha sido la creación de pruebas que permitan evaluar la facilidad o dificultad que mostrarían los sujetos para superarlas, no la realización de las pruebas por parte de dichos sujetos ni, por tanto, el análisis de los resultados. Con estas pruebas se puede comparar como influye la visión biónica binocular en la comprensión del espacio de una persona con este implante respecto a una persona sin problemas de visión.

El control de las pruebas y el entorno vendrá de la mano del investigador, que será quien esté manejando el programa Unity desde su ordenador. Para esto, se desarrollará una interfaz independiente para el investigador que se mostrará a través de la pantalla del ordenador y a la cual, no tendrá acceso el sujeto que esté realizando las pruebas con las gafas de realidad virtual en ningún momento.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Realidad Virtual

2.1.1 Definición actual de realidad virtual

La realidad virtual (VR) es una tecnología que permite a los usuarios sumergirse en un entorno simulado por un ordenador, que crea artificialmente objetos físicos en el mundo real o en el mundo ficticio. Además de la inmersión en el entorno, el usuario también es capaz de manipular los objetos de este o de realizar diversas acciones de forma realista gracias al uso de dispositivos como cascos para escuchar el sonido o mandos para simular las manos y permitir la interacción [8]. Como norma general, la experiencia de la realidad virtual debe incluir la simulación de objetos 3D de tamaño real, así como la posibilidad de reflejar cambios en la perspectiva mediante sistemas que detecten el movimiento del usuario ofreciendo una respuesta en tiempo real [7].

2.1.2 Historia de la realidad virtual

Aunque pueda parecer que la realidad virtual (VR) es algo que lleva existiendo desde hace apenas unos diez o veinte años, los primeros prototipos que se pueden considerar precursores de la realidad virtual actual, llegaron a mediados del siglo XX. En 1962, Morton Heilig desarrolló una tecnología inmersiva que llamó Sensorama (**Figura 1**). Esta estaba basada en técnicas cinematográficas tales como imágenes tridimensionales, sonido estéreo, vibraciones y olores que permitían obtener una experiencia inmersiva [9]. De esta forma, aunque el dispositivo no era completamente interactivo, sentó las bases para las siguientes tecnologías VR.

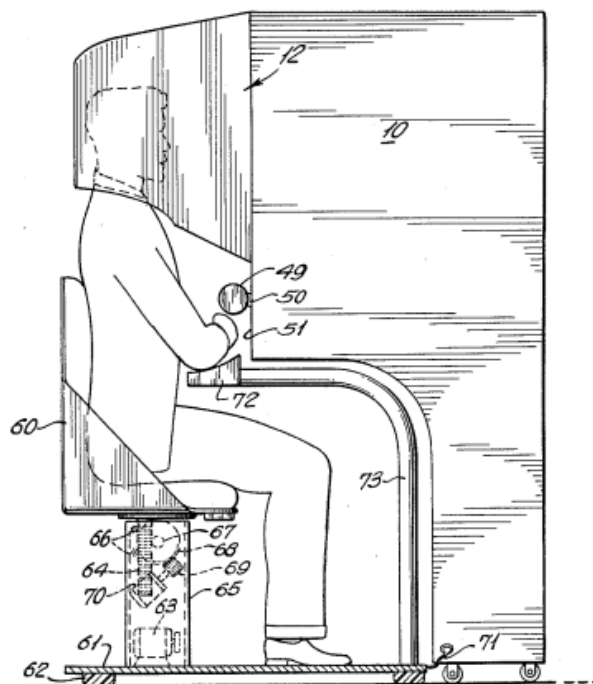


Figura 1 Imagen perteneciente a la patente de la tecnología inmersiva Sensorama. En esta se aprecia la posición que ocuparía el sujeto y parte de los elementos que constituían esta tecnología. Fuente: [9]

Años después, en 1968, Ivan Sutherland creó lo que es considerado el primer dispositivo de realidad aumentada¹ HMD². A este se le llamó "The Sword of Damocles" (**Figura 2**). Consistía en un casco de visualización que, aunque rudimentario y pesado, permitía a los usuarios ver gráficos en 3D. Este dispositivo fue revolucionario,

¹ Se denomina realidad aumentada a la tecnología que utiliza la combinación de elementos virtuales junto con el entorno físico

² HMD (Head Mounted Display). Literalmente traducido al español, pantalla montada en la cabeza

pues era capaz de seguir el movimiento de la cabeza del usuario para mostrar la perspectiva correcta de visualización al mismo. Debido a su peso, el mismo tenía que estar colgado del techo del laboratorio mientras el usuario mantenía la cabeza bien sujeta al dispositivo [10]. Sin embargo, el dispositivo seguía siendo primitivo tanto en términos de interfaz de usuario como de realismo, debido a las limitaciones tecnológicas de la época.

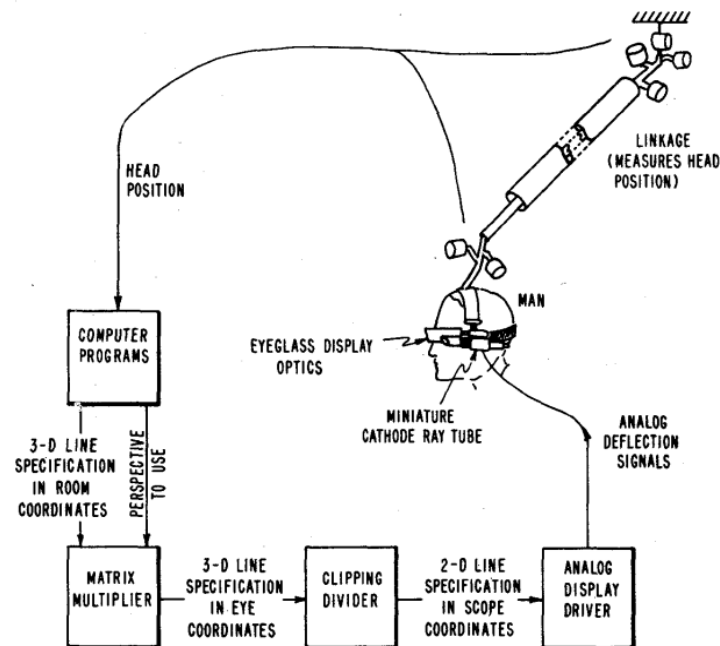


Figura 2 Esquema de comunicación entre las distintas partes del sistema tridimensional de visualización *The Sword of Damocles*, primer dispositivo HMD. El proceso comienza con el Enlace (Linkage), que se trata de un dispositivo mecánico que sigue la posición de la cabeza del usuario. Los datos de posición de la cabeza obtenidos se envían a los Programas del Ordenador (Computer Programs), que determinan la perspectiva que se debe mostrar. A continuación, un Multiplicador de Matrices (Matrix Multiplier) transforma las especificaciones de las líneas 3D de las coordenadas de la sala a coordenadas del ojo. Estas coordenadas se mandan a un Divisor de Recorte (Clipping Divider), que filtra las líneas que deben ser visibles dentro del campo de visión, convirtiendo las líneas 3D en coordenadas 2D ajustadas para la pantalla. Por último, un Controlador de Pantalla Analógica (Analog Display Driver) transforma las especificaciones de la línea 2D en señales de deflexión analógicas que, a través de un tubo de rayos catódicos en miniatura proyectan la imagen en las lentes para que esta sea vista por el usuario. Fuente: [10].

No fue hasta 1987 que se acuñó el término de “Realidad Virtual”. Este fue acuñado por Jaron Lanier, quien fundó *VPL Research*, la que sería la primera empresa en vender guantes y cascos de realidad virtual, que permitieron un mayor grado de interacción dentro de los entornos virtuales. Esto conllevó que a principios de la década de los 90 aparecieran muchas pequeñas empresas emergentes de realidad virtual, que empezaron a ofrecer productos dirigidos al mercado de consumo abaratando sus costes. Entre estas empresas, surgieron varias dedicadas a los videojuegos, sin embargo, el éxito les duró poco [11], como es el caso de la consola de Nintendo “Virtual Boy”. Esta consola usaba un proyector similar al de las gafas de realidad virtual para crear un efecto 3D monocromático, pero fue un fracaso comercial y tras solo 6 meses en el mercado se acabó retirando de la venta [12]. Al no ser económicamente viable para las empresas, se dejó de invertir durante un tiempo en el desarrollo de estas tecnologías.

Por último, en el siglo XXI, los avances tecnológicos han permitido hacer de la realidad virtual un mundo mucho más accesible al mercado global. La mejora del procesamiento gráfico, la miniaturización de componentes y la reducción del costo [13], permitieron que en 2012 se lanzase el primer prototipo de gafas VR comerciales, llamadas “Rift”. Estas fueron un éxito, lo que provocó que numerosas compañías comenzasen a desarrollar e invertir en productos de realidad virtual, consiguiendo hacer a este producto, accesible para el usuario de a pie. Esto, ha permitido que la realidad virtual se pueda aplicar a diversos campos más allá de los videojuegos, entre los que se encuentra el de la investigación

2.2 Visión Biónica

2.2.1 Definición actual de visión biónica

En la retina sana, la luz es detectada por los fotorreceptores (conos y bastones) a través de moléculas fotosensibles localizadas en los segmentos externos de estos. Estas moléculas, una vez son transformadas por la luz, desencadenan una cascada de eventos neuroquímicos que llevan a que otras células neurales de la retina (células ganglionares) envíen señales a los centros visuales superiores del cerebro [14].

Las prótesis de retina, también conocidas como ojos biónicos, son dispositivos que se pueden implantar para restaurar parcialmente la visión en pacientes con enfermedades degenerativas de la retina, tales como la retinosis pigmentaria (RP) [16] o la degeneración macular relacionada con la edad [17]. Estas enfermedades causan la pérdida de fotorreceptores, lo que a su vez produce que la retina sea incapaz de detectar la luz. Sin embargo, las neuronas que permanecen aún viables en la retina pueden seguir activándose eléctricamente siguiendo una serie de técnicas establecidas para la estimulación nerviosa [14, 15].

2.2.2 Historia de la visión biónica

Los primeros estudios relacionados con la restauración de la visión se comenzaron a realizar a mediados del siglo XX, consiguiendo estos demostrar que la aplicación de campos eléctricos y magnéticos en las neuronas de la retina podían excitar las mismas y crear la sensación de luz. Es en 1968 cuando se publica el trabajo de Brindley y Lewin [18], en el que consiguieron que un sujeto viera puntos de luz cuando se activaban los distintos canales de estímulo que contenía el dispositivo, que aparece en la **Figura 3**, que le habían instalado en la corteza visual³.

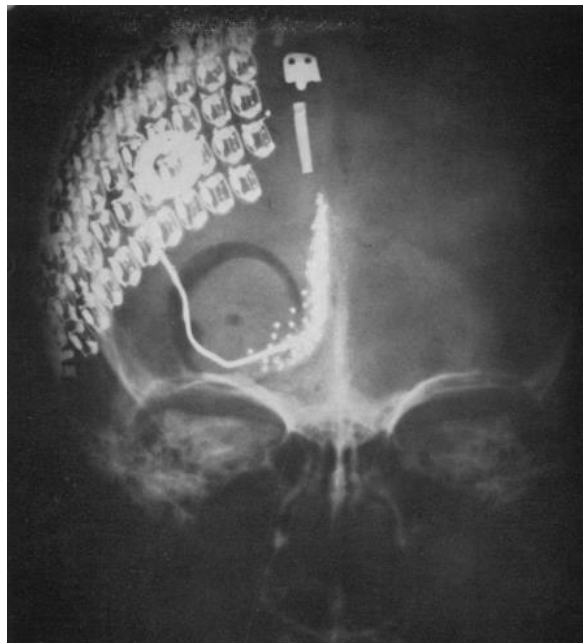


Figura 3 Radiografía de la cabeza de un sujeto que muestra el dispositivo instalado por Brindley y Lewin en su investigación sobre las sensaciones producidas con la estimulación de la corteza visual. Fuente: [18].

Sólo un año después, Potts e Inoue utilizaron un electrodo corneal para estimular el ojo, con el fin de caracterizar el potencial evocado cortical resultante de la estimulación ocular/retiniana en individuos con retinosis pigmentaria [19]. Descubrieron, que los pacientes con RP mostraban patrones de potenciales evocados similares a los de los pacientes normales sin problemas de visión.

³ Área visual más estudiada del cerebro, localizada en el polo posterior de la corteza occipital.

De esta forma, estos primeros estudios consiguieron demostrar que el sistema visual podía ser estimulado eléctricamente y que la RP no eliminaba la capacidad del ojo de responder a la estimulación eléctrica, abriendo así un campo de posibilidades muy esperanzadoras.

Fue en la década de 1990 y principios de los 2000 cuando se empezaron a hacer experimentos implantando una matriz de electrodos para la electroestimulación retiniana, como la de la **Figura 5**, en el en el ojo de sujetos de prueba ciegos [20, 21]. En estos experimentos intraoperatorios, se insertaban sondas con electrodos en la retina de los pacientes mediante cirugía. La electrónica implantada decodificaba una señal enviada por la electrónica extraocular con información de la imagen, produciendo una salida eléctrica ordenada en la matriz de electrodos que estimulaba la retina. En estos experimentos, los sujetos describieron que veían puntos de luz cuando se les aplicaban los diferentes pulsos a los electrodos, pudiendo demostrar que se podían crear puntos de luz potencialmente útiles, incluso en retinas que llevaban décadas afectadas por alguna enfermedad.

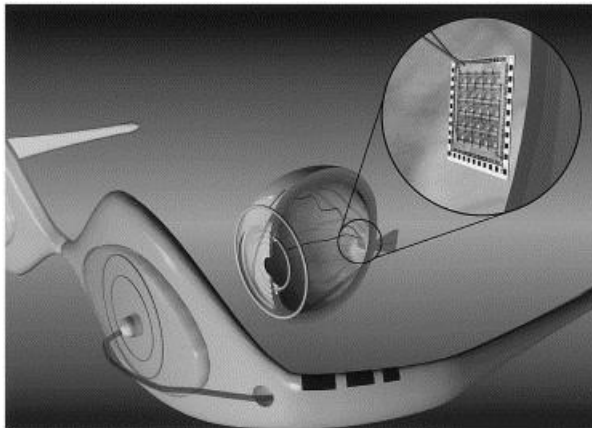


Figura 4 Dibujo conceptual del sistema de prótesis de retina. En este, la electrónica extraocular encapsulada en un marco de vidrio capturaría una imagen y transmitiría una señal que contendría información de la imagen a la electrónica implantada. La electrónica implantada decodificaría la señal y produciría una salida eléctrica ordenada en la matriz de electrodos localizada en la superficie de la retina. Fuente: [20]

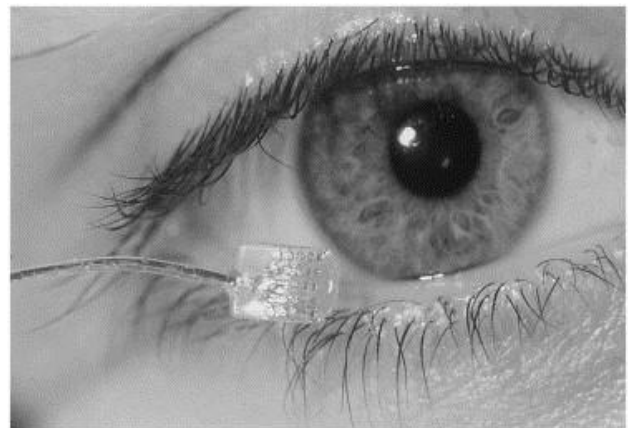


Figura 5 Tamaño de una matriz de 5x5 electrodos, utilizada en experimentos intraoperatorios en la década de los 90 y principios de los 2000, respecto al tamaño de un ojo humano. Fuente: [20]

Estos estudios y sus prometedoras demostraciones dieron pie a que se comenzasen a desarrollar los primeros dispositivos que se implantaron en sujetos, con el fin de conseguir desarrollar dispositivos aptos para comercializarse que pudieran llevarse de forma crónica, basados en ideas como la representada en la **Figura 4**. Para esto, se desarrollaron primero prototipos diseñados para mostrar su viabilidad en humanos, pero que no eran comercialmente viables, y en los que la prioridad era la seguridad del paciente. Una vez se demostró su viabilidad, se empezaron a desarrollar dispositivos comerciales que tenían que ser robustos, seguros y con un funcionamiento esperado de más de una década.

2.2.3 Tipos de implantes para la visión biónica

Las prótesis de retina están formadas por múltiples componentes, entre los que se encuentran, una cámara que capta imágenes, la electrónica encargada del procesamiento de la imagen y la generación de pulsos de corriente, así como una serie de microelectrodos que son los encargados de estimular la retina.

La clasificación de los distintos tipos de implantes de retina se da en función del lugar del ojo en el que se implante la guía de electrodos que forma la interfaz funcional con la retina. De acuerdo con esta clasificación, hay tres tipos de implantes.

- **Implante Epirretinal**

Este tipo de implantes fue el primero que se probó a implantar en humanos y en ellos la matriz de electrodos para la estimulación retiniana se implanta en la superficie superior de la retina.

Los primeros implantes desarrollados, cuya intención era mostrar la viabilidad de estos, fueron tres. El primero fue el dispositivo Argus I, que se implantó en seis sujetos entre 2002 y 2004 [22] y que consistía en un implante coclear modificado. Con un poco de entrenamiento, los sujetos fueron capaces de distinguir objetos de un conjunto [23] y detectar el movimiento de una barra. Otro de los dispositivos implantados fue el IMI, que se implantó en siete sujetos [24] y que permitió ver a los sujetos puntos de luz y algunos patrones simples. El último de los dispositivos de esta parte del desarrollo fue el Epi-Ret, que se implantó en seis personas [25] y que por su diseño consiguió umbrales perceptivos bajos.

En los siguientes implantes epirretinales, ya orientados a su comercialización, se encuentra el Argus II (**Figura 6**). Este es un dispositivo en el que, los componentes electrónicos encargados de la captura y procesamiento de imágenes están en el exterior del ojo y en el que, la matriz de electrodos para la electroestimulación retiniana que se encuentra en la superficie de la retina, está conectada por un cable que discurre sobre la pared del ojo, a los componentes electrónicos implantados encargados de traducir las señales recibidas de los componentes externos a las señales a enviar a los electrodos [26]. Lo más importante de este dispositivo es que permite a los pacientes su uso fuera de la clínica, gracias a su implantación permanente y una alimentación propia. Esto, permitió la implantación de este dispositivo en treinta sujetos, que mostraron resultados favorables en los ensayos clínicos [14, 27].

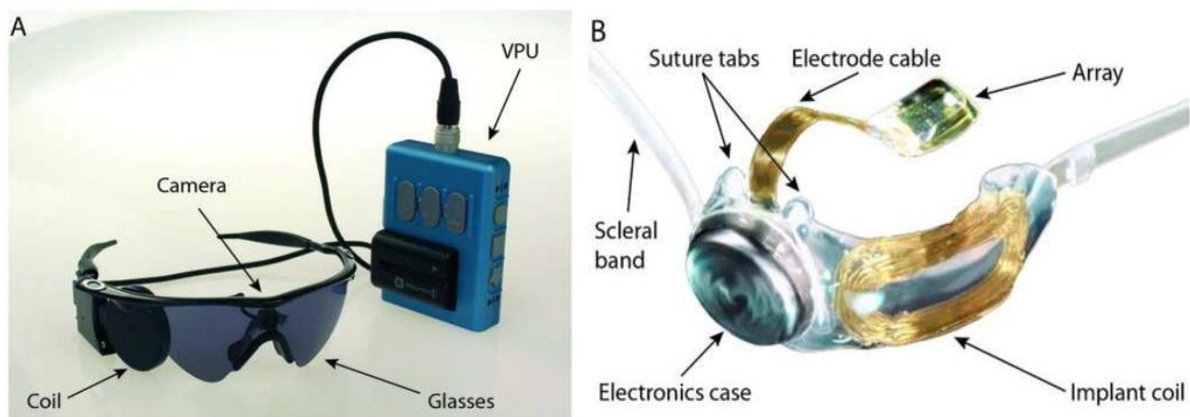


Figura 6 (A) Fotografía de la parte externa del sistema de prótesis Argus II, que incluye una cámara de video incorporada en unas gafas, una bobina de radiofrecuencia (RF) y una unidad de procesamiento de video (VPU) con batería recargable. (B) Fotografía de la parte implantada del sistema de prótesis Argus II, que incluye la matriz de electrodos 6x10 para la electroestimulación retiniana, la caja de electrónica y la bobina de RF del implante. Fuente: [26].

- **Implante Subretinal**

Los siguientes implantes probados en humanos fueron los implantes subretinales. Estos se implantan bajo de la retina, en el lugar del ojo en el que se da la degeneración de los fotorreceptores. El primer dispositivo de este tipo que se implantó fue el desarrollado por Optobionics, realizando implantes subretinales pasivos en 30 sujetos [28]. Un implante pasivo se basa en la luz incidente para activar los fotodiodos dispuestos en un disco de silicio, estimulando la retina a través de electrodos también presentes en el disco.

Posteriormente, se probó con un implante más sofisticado desarrollado por *Retina Implant*, el RI [29], que incluía circuitos para amplificar la fotocorriente a un nivel adecuado. En primera instancia, este se alimentaba a través de un cable percutáneo, cosa que se mejoró para el sistema comercial Alpha IMS [41], al que se le incluyó un módulo de alimentación inalámbrico. Con este dispositivo se consiguió una percepción mejorada de la fuente de luz, también se reportaron dificultades para localizar objetos y en las tareas de detección de movimiento.

El último implante subretinal que se ha lanzado al mercado es el PRIMA (**Figura 7**). En este implante, las imágenes son capturadas por una cámara integrada en unas gafas de realidad aumentada. Tras procesarse las imágenes, se proyectan sobre el implante usando luz infrarroja cercana (880 nm). Tras esto, los píxeles del implante convierten la luz en impulsos eléctricos que fluyen a través de la retina, estimulando las neuronas de la retina interna [31]. Con este implante se ha conseguido mejorar la agudeza natural excéntrica y conseguir una identificación precisa de la orientación de una barra [30]. A su vez, un estudio de este año 2024 que ha realizado un seguimiento de cuatro años sobre la agudeza visual protésica con el microchip subretinal PRIMA en pacientes con degeneración macular atrófica relacionada con la edad [31]. Ha concluido, que la implantación del microchip subretinal PRIMA es eficaz y bien tolerada, sin reducción de la visión periférica natural hasta los 48 meses. Comprobando que la visión central proporcionada por la neuroestimulación fofovoltaica permitió a los pacientes reconocer letras y secuencias de letras de manera acertada.

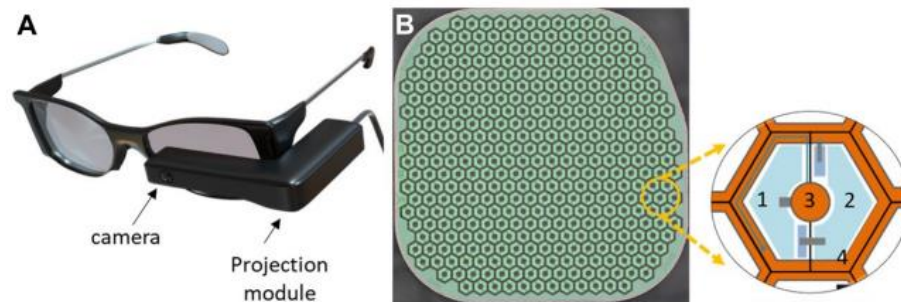


Figura 7 Sistema de neuroestimulación con microchip subretinal PRIMA. (A) Gafas transparentes de realidad aumentada PRIMA-2. (B) Implante de 2,2 mm de ancho y 30 µm de espesor, compuesto por píxeles hexagonales de 100 µm de ancho, que incluyen 2 fotodiodos (1, 2) conectados entre el electrodo activo central (3) y un electrodo de retorno circunferencial (4). Fuente: [31].

- **Implante Supracoroideo**

Los implantes supracoroideos, que se sitúan entre la esclerótica y la coroides se consideran menos desafiantes quirúrgicamente en comparación con otros tipos de implantes, ya que limitan la necesidad de incisiones en la retina [32].

Un estudio de 2021 en el que se investigó la mejora en la realización de tareas durante dos años en pacientes con retinosis pigmentaria en etapa tardía. Encontró, que los implantes de retina supracoroideos facilitaban la realización de actividad diaria variaba. De esta forma, las tareas que dependen de la visión, como lavar los platos, doblar y organizar la ropa, e identificar puertas y personas en espacios no concurridos, mostraron los mayores beneficios a lo largo del tiempo, con el punto de mejora máxima entre 17 y 44 semanas después de la implantación [33].

2.3 Realidad Virtual y Visión Biónica

El uso de la realidad virtual como parte de la investigación en el campo de la visión biónica, es una posibilidad emergente que consta de un gran potencial para mejorar la calidad de vida de las personas. En la visión protésica, una escena visual se compone de puntos de luz relativamente grandes y aislados llamados "fosfenos".

En 2009 se realizaron dos estudios sobre la simulación de la visión protésica. En el primero, se estudiaron los distintos modelos visuales de fosfenos [42]. Tras esto, se propuso un marco estandarizado de simulación e informes para que las simulaciones futuras de visión protésica llevadas a cabo con modelos visuales de realidad virtual que estuvieran administradas a sujetos con visión normal, pudieran configurarse de la forma más realista posible en base a la experiencia y descripciones reales de los fosfenos dadas por humanos que habían participado en ensayos de dispositivos de prótesis visuales. Esto se hizo con el fin de poder extraer y comparar más fácilmente los resultados de los estudios de simulación, para que estos fueran relevantes para la experiencia de los usuarios de prótesis visuales. En el segundo estudio que realizó ese mismo año [43], se analizaron los

hallazgos de diversas investigaciones que utilizaron simulaciones VR para evaluar la capacidad funcional de la visión protésica. Centrándose especialmente en aspectos como la agudeza visual para reconocer letras, la capacidad de lectura, la navegación, así como el aprendizaje y la adaptación al escaneo visual.

Un estudio posterior de 2011 sobre el desarrollo y la evaluación de un sistema de VR basado en convertir en tiempo real los datos sensoriales visuales y no visuales, en representaciones simbólicas que se muestran como visión de baja resolución para ayudar a los usuarios a realizar tareas como la navegación en interiores, la localización de objetos y la detección de personas [34]. Concluyó, que esta ofrecía mejoras prácticas y significativas en comparación con la visión biónica tradicional.

Así, En 2015, un estudio evaluó mediante simulaciones en un entorno virtual, usando un dispositivo HMD, la posibilidad de implantar una prótesis visual periférica que coexistiera con la visión central residual en personas con RP[35]. Los resultados mostraron que los diseños de fosfenos asistidos estaban asociados con reducciones significativas en los movimientos relacionados con el escaneo visual, lo que sugiere que la implantación temprana de prótesis retinianas en la periferia podría ser beneficiosa. Abriéndose así una nueva posible línea de investigación gracias a la realidad virtual.

De igual manera, otro estudio muy reciente de 2022 con el objetivo de simular y comprender con precisión la experiencia visual de los usuarios de estos dispositivos para evaluar sistemáticamente cómo las distorsiones visuales, reportadas clínicamente, afectan al desempeño en tareas de reconocimiento de letras y de evitación de obstáculos en un entorno inmersivo [3]. Concluye que el uso de HMD ofrece una simulación más realista y efectiva de la visión protésica en comparación con un monitor, lo que podría tener implicaciones importantes para el diseño y la evaluación de dispositivos de visión biónica.

3 TECNOLOGÍAS UTILIZADAS

3.1 Unity

Unity es un motor gráfico multiplataforma 2D y 3D desarrollado por Unity Technologies. Este es líder en la industria del desarrollo de videojuegos y de entornos gráficos. Es un motor universal que tiene compatibilidad con más de 20 plataformas de desarrollo y con una curva de aprendizaje poco pronunciada gracias a una interfaz muy intuitiva. Su potencia, junto con su compatibilidad, robustez y sencillez son los principales motivos que han llevado a elegir Unity como el motor gráfico de desarrollo para el entorno de realidad virtual en el que se elaborarán las pruebas para sujetos con visión biónica simulada.

El motor de Unity se basa en el lenguaje C#, y, aunque en un principio no existiera la opción de desarrollar entornos en realidad virtual, en los últimos años se ha convertido en una de las principales herramientas para el desarrollo de entornos virtuales que van más allá de los videojuegos, incluyendo la educación [36], la cultura y la investigación [3].

Este proyecto se ha realizado en la versión 2021.3.38f1 LTS⁴, dado que es una versión ya desarrollada que cuenta con soporte a largo plazo. La interfaz de Unity, visible en la **Figura 8**, consta de cuatro paneles principales.

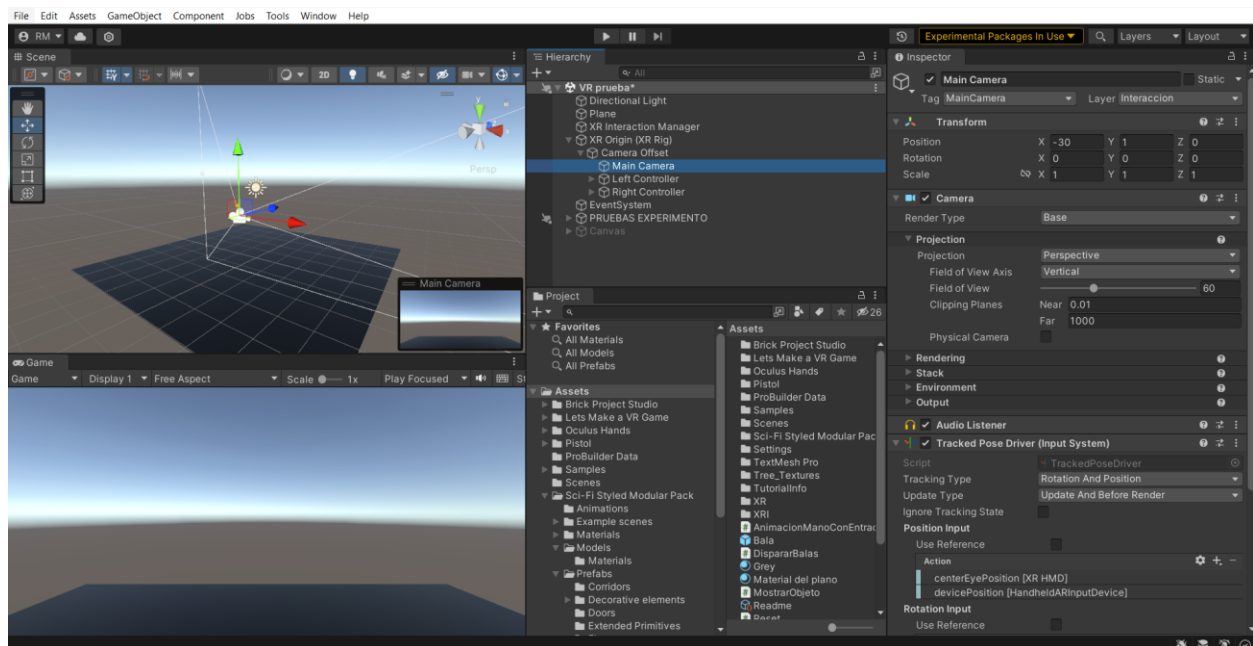


Figura 8 Interfaz de Unity en la versión 2021.3. A la izquierda de la imagen, se encuentra el panel de Vistas de la Escena y del Juego. En el centro, en la parte superior, se encuentra la Jerarquía de Objetos. En el centro, en la parte inferior, se encuentra la ventana Proyecto. A la derecha de la imagen, se encuentra el Inspector.

- Jerarquía (*Hierarchy*): representación jerárquica de la estructura de todos los objetos de la escena de Unity. Estos objetos se denominan *Game Object* y cada uno tendrá unas características u otras en función del tipo que sea.
- Vista Escena/Juego (*Scene/Game View*): la Vista Escena permite moverse por la escena y editarla. La Vista Juego simula lo que se verá en el renderizado final de la escena a través de la cámara.
- Proyecto (*Project Window*): explorador de archivos de Unity donde aparecen y se seleccionan todos los elementos que se pueden usar dentro de Unity. Estos son imágenes, audios, texturas... que se denominan *Assets*.

⁴ Long Time Support.

- Inspector (*Inspector*): permite ver y editar las propiedades de los *GameObject* en función del tipo que sean.

3.2 Oculus Quest 2 y HTC Vive Cosmos

Las gafas de realidad virtual son el dispositivo esencial y necesario para la inmersión en entornos virtuales. Estas permiten a los usuarios sumergirse en mundos ficticios generados digitalmente, mediante el uso de pantallas y controladores especializados. En la actualidad, existe una amplia gama de dispositivos en el mercado que facilitan esta experiencia, desde carcasas para teléfonos móviles que, mediante el uso exclusivo del dispositivo móvil, permiten la entrada a entornos virtuales, hasta una variedad de gafas de realidad virtual más avanzadas.

Para la realización de este proyecto, se han utilizado las gafas de realidad virtual Oculus Quest 2 y HTC Vive Cosmos, junto con sus respectivos controladores, que permiten la interacción efectiva con el entorno virtual. La compatibilidad ofrecida por Unity ha sido un factor clave, que ha permitido el desarrollo paralelo utilizando ambos modelos de gafas sin generar incompatibilidades significativas al cambiar de un dispositivo a otro.

El proyecto final se ha desarrollado con el objetivo de que funcione sin ningún fallo haciendo uso de las gafas de realidad virtual HTC Vive Cosmos, al ser el modelo disponible vinculado al ordenador del laboratorio en el que se ha desarrollado por completo el entorno. Sin embargo, el uso de las Oculus Quest 2 ha contribuido a desarrollar partes del entorno virtual en otros ordenadores cuando no se ha podido trabajar en el laboratorio.

3.2.1 Oculus Quest 2

Estas gafas de realidad virtual cuentan con un sistema operativo propio que permite usar las gafas sin necesidad de que estén conectadas a un ordenador, aunque para este proyecto esa opción no se ha utilizado. Cuentan con una tecnología de seis grados de libertad, con la que las gafas realizan un seguimiento de los movimientos tanto de la cabeza como del cuerpo y los integran en la realidad virtual con una precisión realista. También tienen sonido espacial con altavoces integrados en las gafas. Por su parte, las lentes tienen una pantalla LCD de cambio rápido de 1832×1920 píxeles de resolución en cada ojo, con una frecuencia de actualización de 60, 72 o 90 Hz. En el exterior, las gafas cuentan con 4 cámaras que ayudan a reconocer el entorno y que permiten la visión del mundo real a través de las propias gafas [37]. Las gafas Oculus Quest 2 se han utilizado durante fases de desarrollo del proyecto, pero las gafas finalmente elegidas para la última parte del desarrollo y presentación final del mismo han sido las HTC Vive Cosmos.

3.2.2 HTC Vive Cosmos

Por su parte, este otro modelo de gafas de realidad virtual (**Figura 9**) cuenta con sonido espacial 3D, una pantalla dual de 3,4" con una resolución de 1440×1700 píxeles en cada ojo, una tasa de frecuencia de actualización fija a 90 Hz y un campo de visión de 110 grados. También cuentan con sensores como acelerómetro y giroscopio para seguir los movimientos de la cabeza sin problema. Estas gafas constan de 6 cámaras exteriores para el reconocimiento del entorno y poder observar el mismo a través de ellas [38].



Figura 9 Gafas de realidad virtual y controladores HTC Vive Cosmos. Fuente: [38]

4 DESARROLLO DEL ENTORNO EN UNITY

En este capítulo se va a explicar detalladamente el desarrollo completo del entorno realizado paso por paso, desde la configuración y vinculación de las gafas de realidad virtual al proyecto, hasta el entorno final donde se desarrollarán las pruebas, empezando por la arquitectura de objetos de este entorno.

4.1 Arquitectura de Objetos de Unity

Para describir la arquitectura de objetos de este entorno se va a hacer uso del gráfico proporcionado en la **Figura 10**, para facilitar su comprensión.

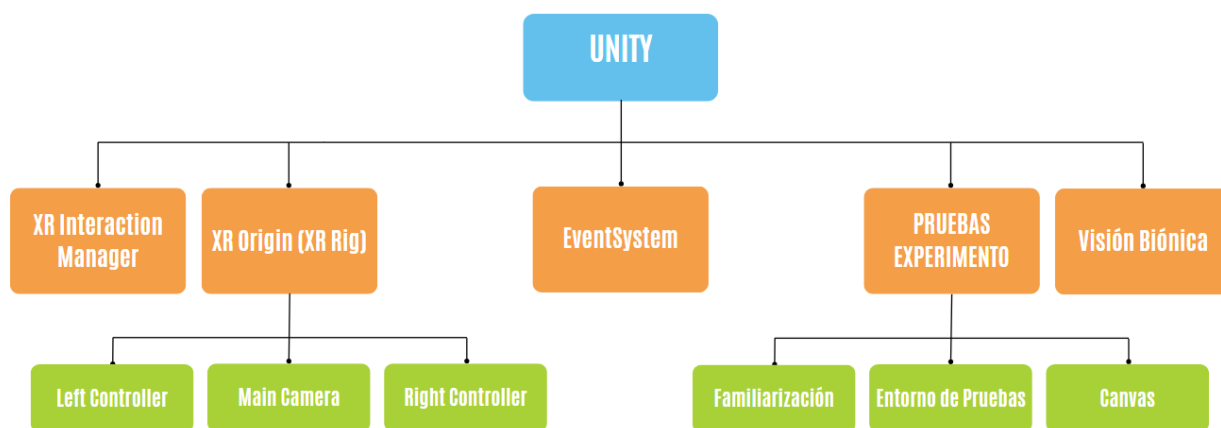


Figura 10 Diagrama de la arquitectura de objetos del programa en Unity. El programa de Unity está formado por 5 elementos principales llamados *Game Objects*. “XR Interaction Manager”, encargado de gestionar las interacciones dentro del entorno de realidad virtual. “XR Origin (XR Rig)”, encargado del manejo de la cámara y los controladores de cada mano. “EventSystem”, encargado de la gestión de los eventos del usuario. “PRUEBAS EXPERIMENTO”, entorno en el que se ubica la simulación, compuesto por la interfaz de usuario (canvas), un entorno de familiarización y otro entorno en el que se desarrollarán las pruebas. “Visión Biónica”, encargado del manejo del filtro de visión biónica binocular.

La base del entorno de realidad virtual creado en Unity son los *Game Objects*. Todos los objetos que se encuentran en el primer nivel, representado por el color naranja interactúan entre sí de forma fluida para lograr el correcto funcionamiento del entorno y permitir al usuario moverse y realizar las diferentes pruebas programadas. Por su parte, los objetos representados en verde son dependientes exclusivamente de su objeto padre. A continuación, se procede a explicar uno a uno los diferentes *Game Objects* elaborados en el proyecto y su función dentro del mismo.

El *Game Object* “XR Interaction Manager”, es el encargado de gestionar las interacciones dentro del entorno de realidad virtual. Este coordina cómo el usuario interactúa con los objetos y el entorno en función de las diferentes entradas de los controladores. Se trata de un script que incluye Unity para facilitar el manejo y la creación de entornos virtuales que van a ser ejecutados en gafas de realidad virtual.

“XR Origin (XR Rig)”, contiene la cámara principal, que representa los ojos del usuario en el entorno, y los controladores, que representan las manos y que se han modelado como tal para dar más realismo.

“EventSystem”, es un componente fundamental en Unity para la gestión de los eventos del usuario, tales como los clics, entrada de datos u otras interacciones que ocurran dentro del entorno de realidad virtual.

El *Game Object* “PRUEBAS EXPERIMENTO” es el entorno creado en el que se va a transcurrir toda la simulación. Este consta de un entorno de pruebas genérico que es común a todas las pruebas y en el que se desarrollan las distintas pruebas evaluables creadas como objetivo en este proyecto explicadas en el capítulo 5.

También está compuesto por un entorno de familiarización en el que los usuarios aprenderán a manejar las gafas de realidad virtual y sus controladores. Por último, cuenta con un “Canvas”, que es un componente de la interfaz de usuario (UI) usado para mostrar información adicional e interactuar con el entorno. A este solo tiene acceso el investigador que esté manejando el ordenador desde el que se está ejecutando el entorno y no el usuario que se encuentra dentro del mismo.

El último objeto, “Visión Biónica” es el encargado de la activación del filtro de visión biónica binocular. Cuando este se activa, tanto la interfaz de usuario como la del investigador cambian.

4.2 Vinculación de las Gafas VR a Unity

Nada más crear el proyecto de Unity, el entorno está formado por una cámara y una luz direccional que ilumina la escena. Sin embargo, las gafas de realidad virtual no se encuentran vinculadas al proyecto, y aunque ejecutemos el mismo, no se muestra nada por las gafas. El primer paso a realizar consiste en instalar el plugin *XR Plugin Management*, que es un plugin que permite a Unity detectar y utilizar el hardware adecuado para experiencias VR. Este se configura para que funcione con el máximo número de dispositivos posibles, tal y como se muestra en la **Figura 11**.

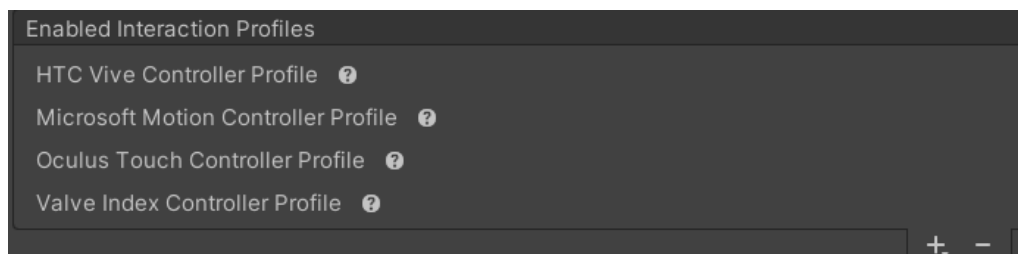


Figura 11 Dispositivos VR compatibles con el entorno desarrollado.

Una vez realizado este primer paso, al ejecutar el programa, el entorno se ve a través de las gafas de realidad virtual, pero al girar la cabeza con estas puestas, no sucede nada, mostrándose siempre la misma imagen a través de las gafas. Correspondiendo con la vista a través del *Game Object* “Cámara principal” del proyecto.

Para conseguir que la cámara monitoree e imite los movimientos del HMD, hay que añadirle a la misma el componente *Tracked Pose Driver*. Este permite vincular la posición y rotación de un objeto en el mundo virtual, en este caso la cámara, con un dispositivo de seguimiento de movimiento en tiempo real, siendo este las gafas de realidad virtual. Una vez instalado y configurado el plugin, se va a hacer uso del paquete *Unity XR interaction Toolkit*. Este paquete desarrollado por Unity, permite implementar diversas interacciones como la manipulación de objetos, el seguimiento de movimientos o la creación de interfaces de usuario inmersivas, sin necesidad de escribir código desde cero.

Una vez instalado este paquete, se sustituye la cámara principal del proyecto por la que se encuentra dentro del paquete y que se llama *XR Origin*, convirtiéndose así en el objeto padre, como se aprecia en el esquema de la **Figura 12**. Este nuevo *Game Object*, permite establecer la posición de referencia de altura de la cámara del proyecto respecto al suelo real, haciendo uso de los sensores y cámaras presentes en las gafas de realidad virtual utilizadas, consiguiendo así lograr un mayor nivel de realismo en la inmersión. Sin embargo, todavía falta configurar los mandos o controladores que permitirán interactuar con el entorno.

Para la configuración de los controladores asociados a las gafas de realidad virtual, se crean dos nuevos *Game Objects*, uno para cada mano. A estos, se les añade el componente *XR Controller (Action-based)*, que permite mapear las acciones de entrada producidas por los movimientos y botones de los controladores e implementarlas dentro del entorno virtual. Para la configuración de este componente, se han utilizado los *Starter Assets* del *Toolkit* instalado anteriormente, que permiten configurar de manera rápida y sencilla todas las posibles entradas de los mandos sin tener que ir haciéndolo manualmente una por una.

Tras haber configurado el equipo con el que se va a trabajar, se ha desarrollado la parte de la jerarquía del proyecto (**Figura 12**) correspondiente al *Game Object* “XR Origin (XR Rig)”. En resumen, el objeto padre “XR Origin” es el encargado de decirle a Unity qué acción se está ejecutando. El objeto hijo “Camera Offset”, define la posición inicial de la cámara y las manos en la escena. Por último, los hijos dependientes de los dos objetos

anteriores, “Main Camera”, “Left Hand” y “Right Hand” definen el comportamiento de cada uno de ellos en función de sus entradas, las cuales se pueden configurar para desarrollar acciones deseadas dentro del entorno virtual.

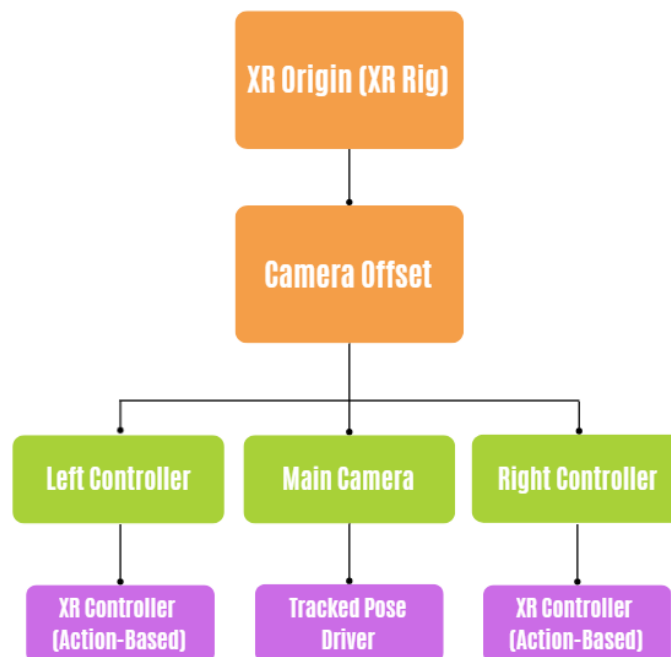


Figura 12 Esquema de jerarquía de objetos y componentes principales creados para vincular las gafas VR a Unity. Los colores naranja y verde representan los *Game Objects*, mientras que el color morado representa el componente principal de ese objeto. El objeto padre “XR Origin” informa a Unity sobre qué acción se está ejecutando. El objeto hijo “Camera Offset”, define la posición inicial de la cámara y las manos en la escena. Los hijos dependientes de los dos objetos anteriores, “Main Camera”, “Left Hand” y “Right Hand” se comportan según lo establecido en los componentes “XR Controller (Action-Based)”, incluido en los controladores, y “Tracked Pose Driver”, incluido en la cámara

4.3 Asignación de Entradas y Modelado de las Manos

En esta sección se va a explicar cómo funcionan y se configuran las entradas de los controladores, asignando acciones a unas manos realistas que imitarán movimientos humanos naturales con el fin de hacer la experiencia lo más realista posible. También se va a explicar cómo se han modelado las manos y los movimientos que les van a ser asignados.

Para la creación de las manos se ha recurrido a usar el modelo de manos diseñado en 3D por Oculus [39] junto con un paquete de animaciones y materiales para estas manos creado por el creador de contenido online “Valem Tutorials” [40]. Antes de seguir con la implementación de este modelo de manos en Unity, cabe destacar algunos conceptos clave sobre el programa que se van a utilizar reiteradamente en la creación de este entorno:

- Texturas (*Textures*): son la base de la superficie de un objeto. Junto con los *Materials* y *Shaders* establecen el resultado final de la superficie.
- Materiales (*Materials*): establecen como se renderiza la superficie de un objeto.
- Sombras (*Shader*): calculan el color exacto de cada píxel de una superficie teniendo en cuenta parámetros como la iluminación.
- Mallas (*Meshes*): son las encargadas de definir la forma de un objeto.

Una vez se importa el modelo dentro de Unity, se adjunta cada modelo de las manos a la jerarquía como un hijo de los objetos mano derecha y mano izquierda creados anteriormente. Estos modelos constan de un componente de animación que ayuda a manejar las animaciones de las manos, así como de su propio material y su propia malla. En este caso, el color que se ha elegido para las manos imita el color de unas manos humanas, como se muestra en la **Figura 13**, con el fin de dar el mayor aspecto de realismo posible.



Figura 13 . Forma del modelo 3D de las manos realistas importadas al entorno virtual en Unity cuando no se está pulsando ningún botón de los controladores del HMD. La posición espacial de las manos viene determinada por la ubicación de los controladores.

El modelo de las manos ya se encuentra importado dentro del entorno y responde correctamente al movimiento de los controladores, sin embargo, al no tener ninguna acción adjudicada por mucho que se pulsen los gatillos o botones de los mandos, estas no hacen nada.

Para usar las entradas de los mandos se ha desarrollado un componente propio programado en un archivo de #C que se ha llamado “AnimacionManoConEntradas”. En este archivo se ha creado un componente que depende de 3 variables. La primera, es la que se encargará del movimiento de juntar el dedo índice con el pulgar. La segunda, se encarga de cerrar la mano en un puño, y la tercera, de usar como referencia el modelo de manos adjuntado. Con estas variables se van a realizar las animaciones de las manos que se observan en la **Figura 14**.



Figura 14 Forma del modelo 3D de las manos realistas importadas al entorno virtual en Unity cuando se están pulsando los gatillos de los controladores del HMD. En la primera imagen, se están pulsando los gatillos traseros L2 y R2. En la segunda y tercera imagen, se están pulsando los botones laterales R4 y L4. La posición espacial de las manos viene determinada por la ubicación de los controladores.

Para las acciones de cerrar la mano o juntar los dedos índice y pulgar, se han utilizado las acciones del paquete de animaciones descargado. Se ha utilizado el repositorio de acciones por defecto *XRI Default Input Action*, que indica cómo están ligadas las acciones a los distintos botones del mando de las gafas de realidad virtual. De esta manera, para los gatillos de los controladores, se tiene una entrada de tipo “Valor” que indica cuánto está pulsado ese gatillo. Por otro lado, para los botones existe una entrada de tipo “Botón” que indica simplemente si ese botón está siendo pulsado o no.

Una vez se comprende como están definidos los botones del mando y a qué acciones están ligados, se vincula esta acción al componente y modifica el archivo C# en el que se ha declarado la variable, para que, durante cada fotograma de la ejecución del entorno, Unity compruebe si se está pulsando ese botón o gatillo. Tras esto, se pasa el valor del gatillo pulsado (cuya entrada varía entre 0 y 1) al animador mediante el script programado y se vincula al modelo animado de las manos en el componente de Unity.

4.4 Movimiento Continuo

En esta parte se va a desarrollar como se ha programado el movimiento dentro del entorno haciendo uso de los Joystick de los mandos. Esta es una función que no estará disponible en el programa final, ya que el objetivo es moverse por el entorno andando por un espacio libre y el hecho de poder hacerlo haciendo uso de los Joystick es contraproducente. Sin embargo, al ser una función que ha permitido desarrollar el entorno desde una mesa de trabajo sin necesidad de disponer de un espacio grande en el que testear los avances, se va a proceder a explicar su configuración brevemente.

Se han añadido al *Game Object* padre “XR Origin” varios componentes, como se puede ver ilustrado en la **Figura 15**. El primero es un componente llamado “Locomotion Sytem”, este es el encargado de recibir la petición de movimiento para mover el “personaje” del entorno virtual, información que es proporcionada por el propio objeto padre. El siguiente componente añadido es un controlador del personaje llamado “Character Controller”, que permite configurar cómo reacciona este ante los objetos del entorno. Este componente sólo interviene al hacer uso de los Joystick de los mandos, por lo que a la hora de interactuar andando en el entorno es posible atravesar los objetos. De lo contrario, avanzar hacia delante en la vida real sin hacerlo en el entorno puede generar en el usuario una sensación de mareo no deseada. Por último, hay que añadir otros dos componentes que serán los encargados del movimiento y el giro de la cámara, llamados “Continuos Move Provider (Action-Based)” y “Continuos Turn Provider (Action-Based)” respectivamente. Estos componentes están configurados para funcionar cada uno con un joystick diferente, el movimiento lo realiza el joystick izquierdo y el giro el derecho. Ambos componentes funcionan basándose en la información que reciben del componente “Locomotion System”.

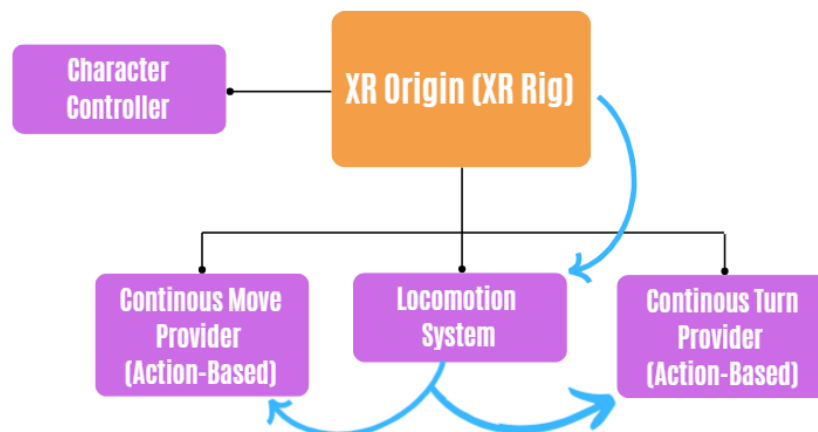


Figura 15 Representación esquemática de los componentes añadidos al *Game Object* “XR Origin (XR Rig)” junto con la dirección y sentido de la información que se pasan unos a otros para poder funcionar. Con estos componentes se implementa el movimiento del jugador, tanto en el espacio como en la cámara.

4.5 Interacción con Objetos

En esta sección se va a explicar cómo se ha desarrollado la interacción con los distintos objetos del entorno. Se hará hincapié en qué tipos de interacción existen y qué características programables se le pueden aplicar a los objetos.

Para interactuar con un objeto dentro del entorno, debe de definirse qué objeto va a sufrir la interacción (*interactable*) y qué otro objeto es el que la va a producir (*interactor*). De esta forma, el *interactor* establece el tipo de interacción que se va a realizar y el *interactable* rige como se va a comportar el objeto ante ese tipo de interacción. En este caso, el *interactor* de todos los objetos van a ser las manos que se han modelado y los *interactables* todos los objetos con los que ellas van a interactuar.

Para dotar a las manos de esa condición de *interactor* se les añade a ambas el componente “XR Direct Interactor”, que permitirá interactuar con los objetos que se encuentren dentro de un rango cercano a las manos. Para definir esa zona de interacción, se añade un segundo componente a las manos llamado “Sphere Collider” cuyo tamaño se adecúa al de las manos para crear una interacción lo más real posible.

Una vez configuradas las manos, se procede a crear los objetos *interactables*. Para que se pueda con interaccionar con un objeto, a este se le ha de añadir el componente “Rigidbody”. Este componente dota de físicas a los objetos, algo necesario para que se detecte el contacto con ellos. Para explicar el funcionamiento de los distintos tipos de interacción, se ha procedido a crear varios cubos con distintas configuraciones.

4.5.1 Interacción Simple:

Para la creación de este tipo de interacción, se añade al objeto *interactable* el componente “XR Simple Interactable”. Este componente permite configurar una lista de eventos a ocurrir en el objeto según la acción que el *interactor* realice en ellos. Este tipo de interacciones no permite agarrar el objeto, si no programarlo para que realice otro tipo de acciones. Un ejemplo de acción a programar es hacer que el objeto cambie de color cuando se esté tocando, al poner la mano encima del mismo y vuelva a hacerlo si se aprieta el gatillo al que le ha sido asignada la acción de agarrar representada cerrando la mano y convirtiéndola en un puño. Un ejemplo gráfico de esto se muestra en la **Figura 16**.

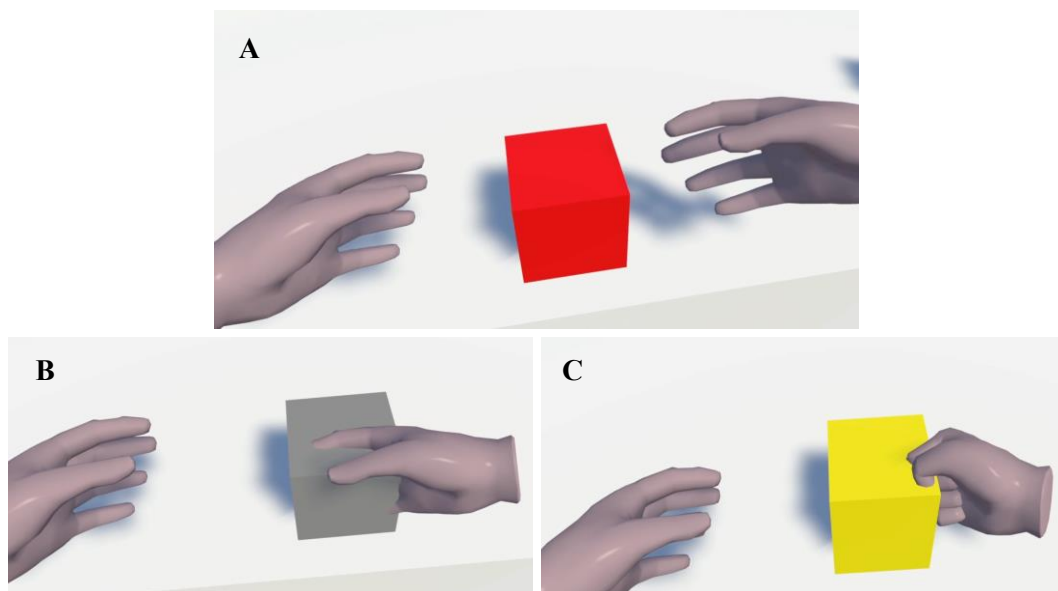


Figura 16 Interacción simple con un cubo programada para cambiar de color cuando se toca y cuando se agarra. (A) Color por defecto del cubo cuando no se está tocando. (B) Interacción al tocar el cubo y no agarrarlo. (C) Interacción al apretar el gatillo que cierra la mano mientras se está tocando el cubo.

4.5.2 Interacción de Agarre:

Para la creación de este tipo de interacción, se añade al objeto *interactable* el componente “XR Grab Interactable”. Con solo añadir este componente ya se puede agarrar el objeto. Sin embargo, dentro del componente existe la opción de configurar la interacción de varias maneras. Lo primero que tener en cuenta es el tipo de movimiento, donde hay 3 posibilidades representadas en la **Figura 17**:

- Instantáneo: mueve el objeto directamente a la nueva posición cada fotograma, ignorando la física, lo que resulta en un comportamiento preciso, pero no natural. Al no aplicar la física, la colisión con el resto de los objetos se hace rara y no se siente realista.
- Cinemático: sigue el controlador suavemente sin ser afectado por la física, es ideal para un movimiento más natural, pero carece de inercia. En este caso, las colisiones son más realistas con otros objetos

interactables, pero al carecer de físicas las interacciones con objetos no *interactables* no se procesan mientras se mueve.

- Basado en Velocidad: aplica física para mover el objeto, por lo que ofrece el comportamiento más realista y natural, aunque esto puede resultar en pérdida de precisión. Este tipo de movimiento procesa la interacción del objeto en movimiento con el resto de los objetos de la escena, evitando así las situaciones raras dadas en los otros dos tipos, donde los objetos del escenario no *interactables* son atravesados por el objeto mientras se realiza el movimiento. Puesto que se pretende construir un entorno lo más realista posible, se utilizará este tipo de movimiento para todos los objetos que se vayan a agarrar y mover por la escena.

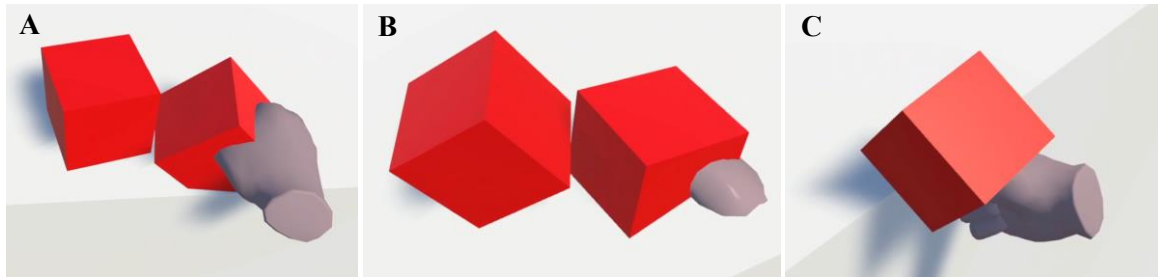


Figura 17 Tipos de movimiento en la interacción de agarre. (A) instantáneo. (B) Cinemático. (C) Basado en Velocidad.

Tras configurar el tipo de movimiento, se debe configurar cómo se vincula el objeto *interactable* al *interactor* mediante la opción “Attach Transform”. Cuando se coge un objeto, este se “transporta” a una determinada posición y rotación que está definida como posición de agarre. Esta opción del componente permite ajustar al gusto la posición de agarre del objeto o crear un agarre dinámico, que permite agarrar el objeto conservando la posición y rotación en la que se encuentre en ese momento. Esta última opción es la que dota de un mayor realismo a la escena, por lo que es la que será implementada en todos los objetos que se vayan a agarrar y mover por la misma. Las diferencias en la forma de agarre se pueden ver en la **Figura 18**.

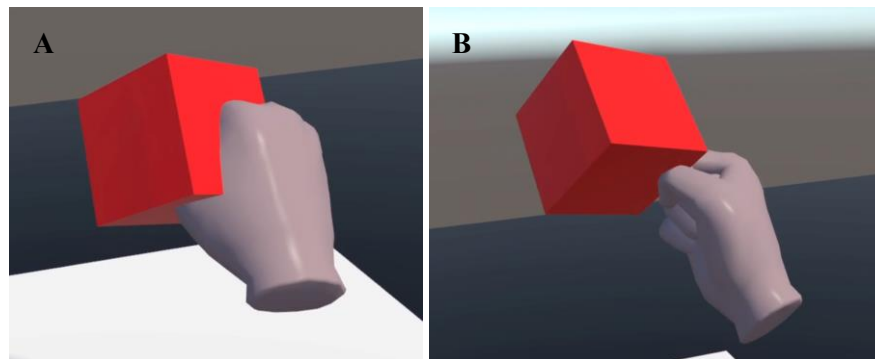


Figura 18 Posición de agarre de un objeto. (A) Posición definida fija. (B) Agarre dinámico.

Otra de las posibles características con las que se puede dotar a un objeto con el que se interactúa es con sonido. Para ello, se debe añadir el componente “Audio Source” dentro del *Game Object* desde el que se va a emitir el sonido. Tras esto, se añade el sonido que se quiere emitir y se configura según la aplicación para que se repita constantemente, se escuche en 3D o 2D o se active solo al interactuar con el objeto, entre otras muchas opciones tales como la dispersión del sonido por el espacio.

4.6 Implementación de la Visión Biónica

Para la implementación de la visión biónica, en primer lugar, se intentó utilizar un toolbox desarrollado por el laboratorio Bionic Vision Lab para la simulación de la visión protésica [44]. Este software presentaba la ventaja de integrar diversos modelos computacionales para la simulación de prótesis visuales actuales, respetando informes clínicos sobre la apariencia del fosfeno, como su forma y persistencia, los movimientos oculares y las limitaciones prácticas, como la imposibilidad de activar todos los electrodos simultáneamente. Sin embargo, tras un extenso período de prueba y múltiples consultas con los desarrolladores del toolbox, se ha decidido finalmente descartar su uso. La razón principal ha sido debido a que se trataba de una versión beta que no estaba diseñada para ser implementada directamente en Unity. De esta forma, a pesar de seguir las instrucciones proporcionadas de mano de sus creadores, se producían fallos constantemente como la falta de seguimiento del movimiento del HMD, la inactivación del filtro de visión biónica y cierres inesperados de la aplicación. Estos problemas de funcionamiento han provocado que se haya desarrollado un filtro de visión biónica propio, que, aunque está basado en la matriz de electrodos 6x10 para la electroestimulación retiniana del implante PRIMA (**Figura 19**), no logra replicar con la misma fidelidad la realidad que se pretendía alcanzar con el toolbox original.

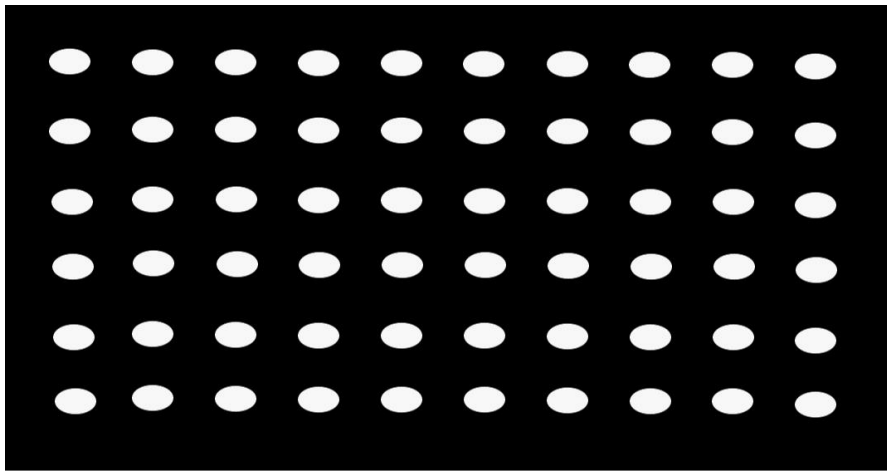


Figura 19 Matriz de 6x10 “fosfenos” aplicada en el entorno virtual para la simulación de la visión biónica, que simula un implante de retina PRIMA.

Para crear el filtro de visión biónica, se ha recurrido al uso del post procesado de imágenes de Unity. Este funciona mediante la aplicación de efectos visuales a la imagen renderizada en una escena VR que son añadidos al final de la cadena de procesamiento de imágenes. Para crearlo y configurarlo, se ha creado un *Game Object* llamado “Post Processing (VB)”, al que se le ha añadido un componente de “Volumen” que permite aplicar varios efectos sobre la imagen. El primer efecto aplicado ha sido un “Ajuste de Color”, con el que se han transformado los colores de la escena en escala de grises llevando al mínimo la saturación. El siguiente efecto usado ha sido el de “Profundidad de Campo”, con el que se ha emborronado la vista a través de la cámara. Para esto se ha configurado, la distancia de enfoque al mínimo para que cuanto más lejos esté un objeto más desenfocado aparezca, la longitud focal al máximo para hacer más pronunciado el desenfoco en las áreas fuera del foco y, la curvatura del diafragma de la lente de la cámara al máximo para hacer ver los puntos desenfocados de forma circular. El último efecto que se ha aplicado ha sido el de Viñeta, con el que se ha eliminado la visión periférica configurando su intensidad al máximo y aplicando un suavizado para hacerlo más realista. La combinación progresiva de estos 3 filtros se muestra en la **Figura 20**.

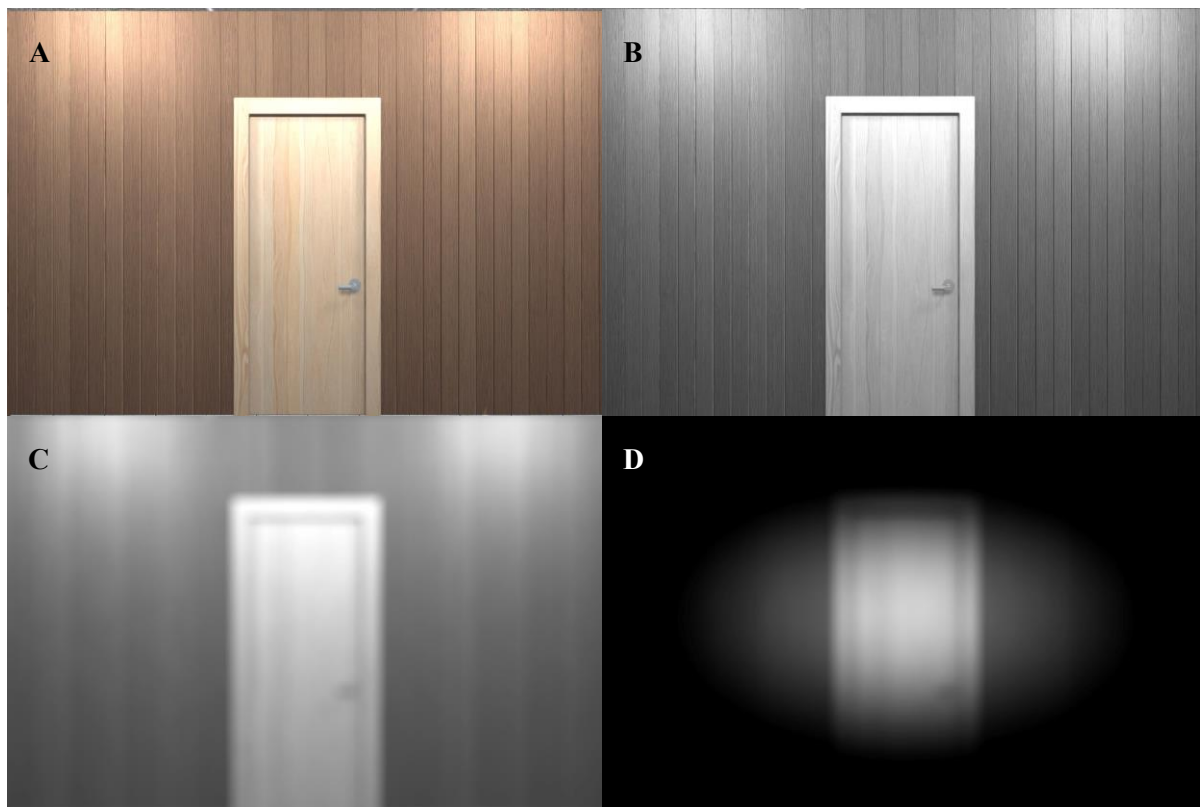


Figura 20 Proceso de aplicación del efecto de post procesado de imagen utilizado para la creación del filtro de visión biónica. (A) Vista normal. (B) Vista tras aplicar el saturado del efecto “Ajuste de Color”. (C) Vista tras aplicar el efecto de “Profundidad de Campo” junto con el de “Ajuste de Color”. (D) Vista al aplicar en conjunto los 3 efectos de “Ajuste de Color”, “Profundidad de Campo” y “Viñeta”.

Por último, una vez aplicados todos los efectos de post procesado a la imagen, se ha colocado la matriz 6x10 de la **Figura 19** delante de la cámara, para obligar a la luz a pasar a través de esos agujeros y simular así los fosfenos del implante, como se aprecia en la **Figura 21**.

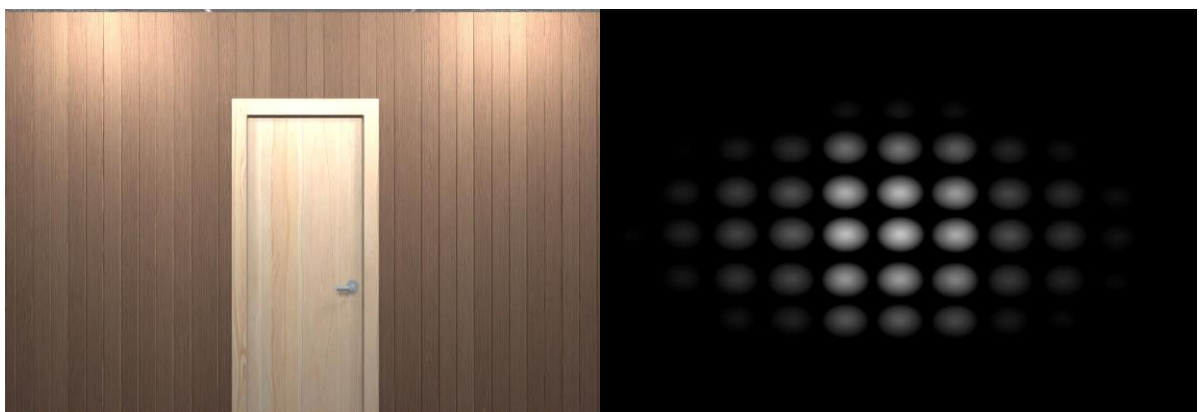


Figura 21 Comparativa entre la visión normal sin aplicar ningún filtro y la visión biónica simulada que imita lo que vería una persona con un implante de retina PRIMA.

Para la activación o desactivación del filtro de visión biónica se han configurado las teclas “N” y “B”. De esta forma, al pulsar la tecla B, se activa el filtro de visión Biónica y al pulsar la tecla N, se desactiva este filtro para volver a la visión Normal. También se ha añadido a la interfaz de usuario visible solo por el investigador, un texto en la esquina superior derecha que indica si está activado o no el filtro de visión biónica, así como una indicación sobre como activarlo o desactivarlo, esto se enseña en la **Figura 22**.

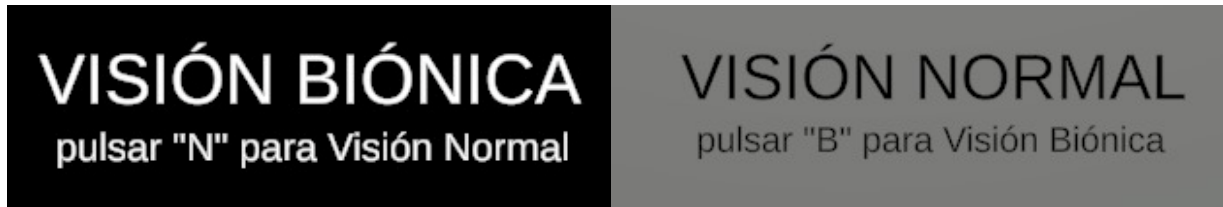


Figura 22 Texto mostrado en la parte superior derecha de la pantalla del investigador que indica si está activo el filtro de visión biónica y como activar o desactivar este.

4.7 Entorno Final

4.7.1 Entorno de Familiarización

Con el fin de ayudar a los sujetos que fueran a realizar las pruebas a familiarizarse con las gafas de realidad virtual, se ha creado un entorno de familiarización, que se muestra en la **Figura 23**, en el que, sin estar bajo el efecto del filtro de visión biónica, estos podrán interactuar con varios objetos y aprender las mecánicas que van a utilizar en los experimentos. Este entorno consiste en un espacio sin texturas realistas en las paredes, en el que hay una mesa con varios objetos *interactables*. El objetivo de este espacio es enseñar al usuario a hacer uso de los botones y funciones que va a usar mientras lleva puestas las gafas de realidad virtual. A la misma vez, se le permite acostumbrarse a la sensación de estar en un entorno de realidad virtual.

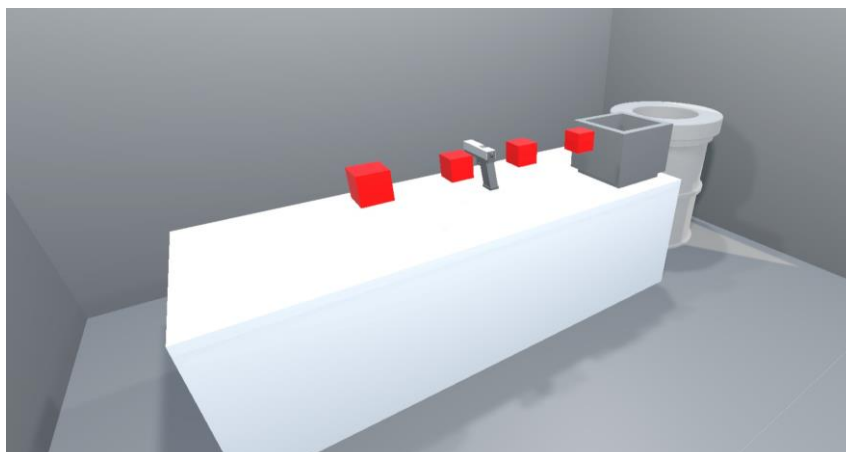


Figura 23 Entorno de Familiarización. Fuente: Elaboración propia.

Encima de la mesa se encuentran 4 cubos y el modelo 3D de una pistola. El primer cubo, es un *Simple Interactable* que cambia de color cuando se toca y cuando se agarra, pero este no puede moverse por el espacio. Los otros 3 cubos, son *Grab Interactables*, por lo que se pueden mover libremente por el espacio si se agarran. Cada cubo tiene asignado un tipo de movimiento (instantáneo, cinemático y basado en velocidad) con el fin de ver las diferencias en la interacción de unos con otros y con los elementos del entorno. El último objeto que se encuentra encima de la mesa es una pistola funcional que dispara balas al apretar el gatillo del mando, esta ayuda a convertir esta dinámica de aprendizaje en algo más parecido a un juego, de forma que los sujetos puedan familiarizarse con la sensación de estar con las gafas de realidad virtual mientras investigan y juegan.

4.7.2 Habitación de Pruebas

Para la realización de los experimentos, se ha desarrollado un entorno en el que se van a construir las distintas pruebas. Este entorno consiste en una habitación de pruebas bien iluminada, que será común a todos los experimentos y que trata de ser lo más realista posible (**Figura 24**). Para conseguir esto, se ha elaborado una habitación de unos 9 m², donde la puerta, venta, texturas de las paredes, suelo y techo se han escalado a tamaño humano para crear la sensación de que la habitación es real. La habitación cuenta con iluminación propia, compuesta por 5 fuentes de luz colocadas en el techo a modo de lámparas, y con iluminación exterior que entra por la ventana. Los materiales se han elegido para hacerla sentir familiar y el techo se ha elevado más de lo normal para no crear una sensación claustrofóbica. El cuadrado rojo de la habitación es el lugar en el que se deberá situar el sujeto para realizar el cambio de una prueba a otra. Este existe para evitar posibles mareos y bugs en el funcionamiento del entorno al cambiar la composición de la habitación cuando se cambia de una prueba a otra.



Figura 24 Habitación virtual en la que se han construido las diferentes pruebas creadas en este proyecto.

4.7.3 Interfaz de Investigador

Para facilitar el trabajo del investigador que realiza las pruebas, se ha creado una interfaz independiente a lo que el usuario ve a través de las gafas de realidad virtual. Esta interfaz está compuesta por botones y anotaciones que facilitan el correcto desarrollo de las pruebas y cuyo funcionamiento se irá explicando en la sección Pruebas y Objetivos. En esta interfaz, se indica en todo momento que prueba se está realizando y, en función de la prueba, se muestran botones con funciones directas para el correcto desarrollo de esta. El investigador, a través de su pantalla verá, por tanto, lo que está viendo el sujeto con las gafas de realidad virtual junto con lo añadido en su interfaz propia.

La interfaz de investigador en el entorno de familiarización, compuesta por lo señalado en rojo en la **Figura 25**. Consta de un texto que indica que se está ejecutando dicho entorno y un botón de “RESET” que permite resetear la posición inicial de los objetos. Para conseguir que el botón haga esa función, se ha programado un script en C# llamado “resetearposicion”, en el que, tras indicar el objeto y su posición inicial, basta con pulsar el botón para que este vuelva a la misma.

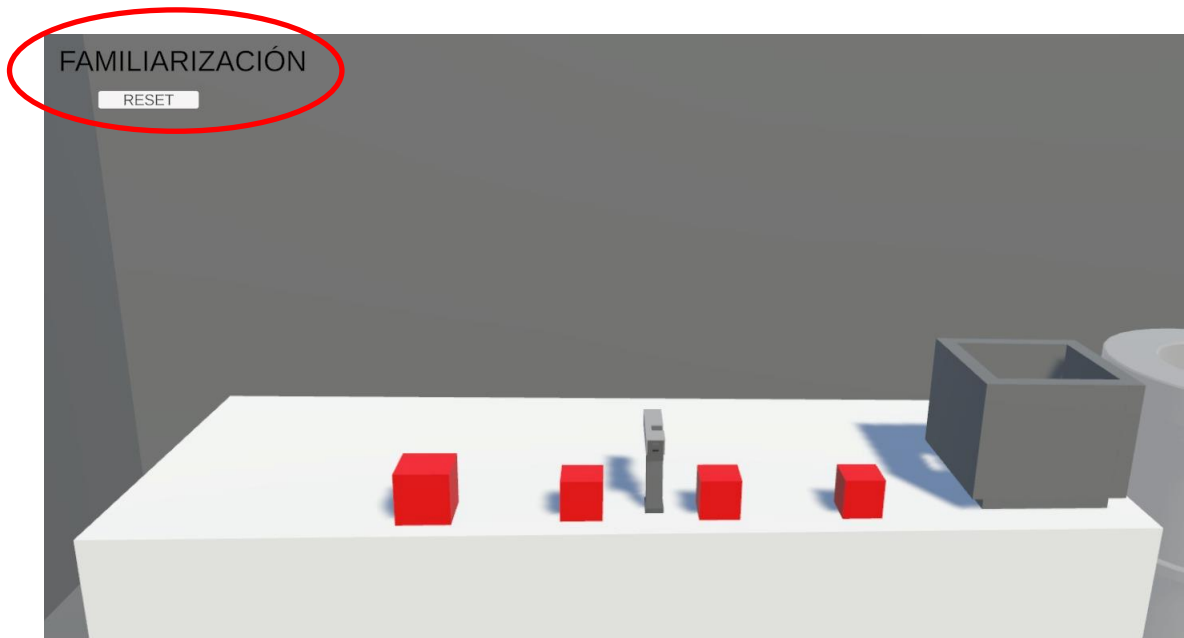


Figura 25 Interfaz de Investigador en el entorno de familiarización. Fuente: Elaboración Propia.

5 PRUEBAS Y OBJETIVOS

En esta sección se van a desarrollar las distintas pruebas creadas para realizar por los sujetos dentro de la simulación. Se desarrollarán tres apartados por prueba. El primero, interfaz de usuario, irá dedicado a explicar detalladamente en qué consiste dicha prueba y qué tiene que lograr el sujeto de pruebas. El segundo, interfaz de investigador, explicará cómo tiene que intervenir el investigador en dicha prueba de acuerdo con la interfaz que le aparezca en pantalla.

5.1 Selección de Pruebas

Para seleccionar y moverse entre los distintos escenarios de las distintas pruebas a realizar se ha programado una máquina de estados en un script llamado “SeleccionPruebas”. Esta es la encargada de activar o desactivar los componentes que conforman cada prueba. Las pruebas se seleccionan haciendo uso del teclado numérico del ordenador, en orden, de manera que la prueba 1 se activa pulsando la tecla “1”, la prueba 2 pulsando la tecla “2” y así hasta la prueba 5. El entorno de familiarización se encuentra activado por defecto al iniciar el programa, pero para volver a acceder a él se puede pulsar la tecla “F”. La visión biónica se activa pulsando la tecla “B” y se desactiva pulsando la tecla “N”, como se indicó anteriormente.

El script está programado de forma que, en cada *fotograma* de la ejecución del programa, se comprueba si se ha pulsado alguna tecla de las definidas. En caso afirmativo, se establece un nuevo estado, que, si difiere del estado en el que se encontraba el programa, desactiva el resto de los entornos y activa el de la prueba correspondiente.

Para cambiar de un estado a otro, el sujeto debe situarse encima del cuadrado rojo pintado en el suelo de la habitación de pruebas, para asegurar el correcto funcionamiento y desarrollo de estas. Mientras se desarrollen las pruebas, el sujeto tiene total libertad para moverse por la habitación.

5.2 Prueba 1: Reconocimiento del Entorno

El objetivo de esta prueba es el de comprobar como percibe el entorno el sujeto, viendo qué partes de este puede identificar y cuáles no. Se dejará explorar libremente por la habitación al sujeto para que intente reconocer elementos como la puerta, la ventana, las esquinas, las fuentes de luz y la posible composición de los materiales de la habitación.

5.2.1 Interfaz de Usuario

El usuario se encontrará en la habitación de pruebas vacía de la **Figura 24**, sin posibilidad de interactuar directamente con ningún objeto, solo podrá moverse por la sala y describir lo que ve.

5.2.2 Interfaz de Investigador

En este caso, la interfaz sólo indica que se está llevando a cabo la prueba 1 al no haber objetos con los que el sujeto de pruebas deba interactuar.

5.3 Prueba 2: Reconocimiento de Formas

El objetivo de esta prueba es el de comprobar qué figuras es capaz de identificar el sujeto, para ello podrá hacer uso de las manos virtuales e interactuar con los objetos que vayan apareciendo. Se anotará qué objetos puede distinguir más fácilmente, qué objetos no es capaz de identificar, el tiempo que le ha llevado identificar los aciertos y las dificultades que encuentre para reconocerlos. Se mostrará 2 veces cada una de las 6 figuras de forma aleatoria.

5.3.1 Interfaz de Usuario

En la habitación de pruebas vacía, aparecerá una mesa entre la puerta y el cuadrado rojo sobre el que se sitúa el usuario. Sobre esta mesa irán apareciendo distintos objetos de color resultante respecto a la habitación. El usuario tiene la posibilidad de interactuar con todos y cada uno de los objetos que vayan apareciendo para intentar adivinar de qué se trata (**Figura 26**).

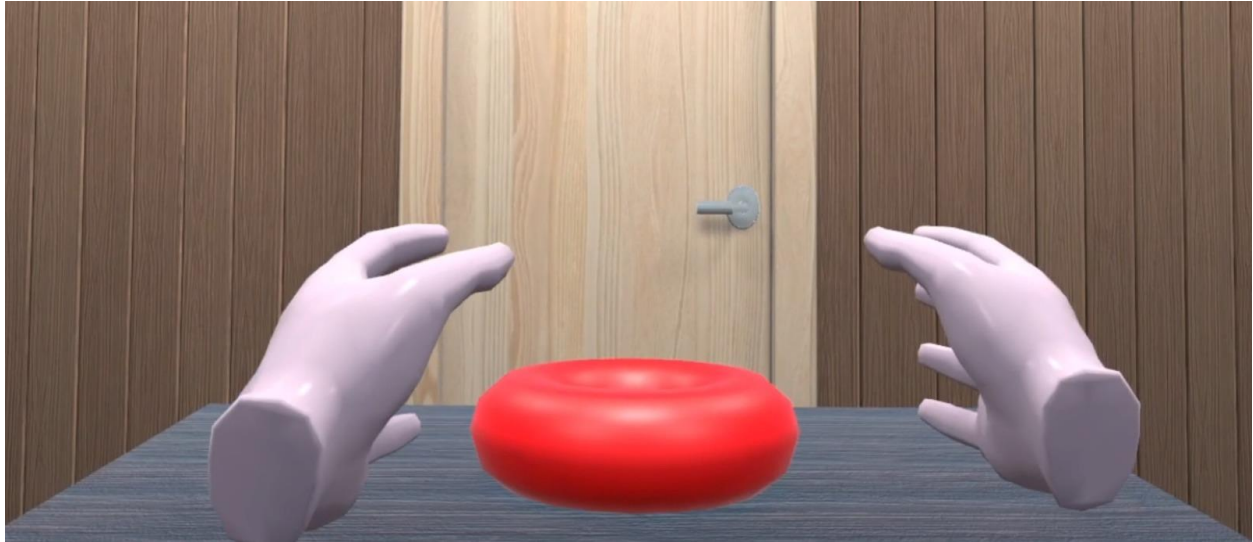


Figura 26 Imagen perteneciente a la prueba 2 tomada desde el punto de vista del sujeto de pruebas, en la que se deberá identificar los objetos que aparezcan sobre la mesa.

5.3.2 Interfaz de Investigador

En primer lugar, la interfaz indica al investigador que se está llevando a cabo la segunda prueba. En este caso, existen 6 botones que pueden ser accionados por el investigador, que contienen nombres de figuras y cuerpos geométricos. Cada vez que se haga clic en un botón, aparecerá la figura nombrada en ese botón. La figura permanecerá en el entorno hasta que se vuelva a pulsar su botón, lo que la hará desaparecer. Si se quisiera volver a generar esa figura, bastaría con darle de nuevo al botón y esta aparecería nuevamente encima de la mesa.

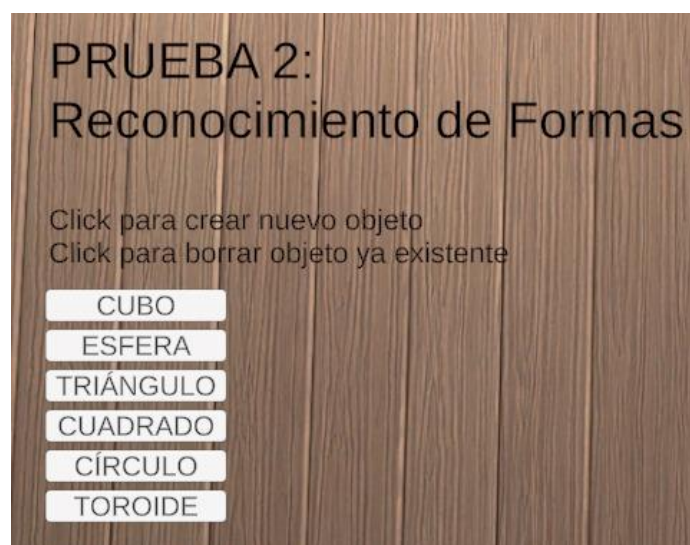


Figura 27 Interfaz de investigador que se muestra durante el desarrollo de la prueba 2. Los botones que aparecen permiten la creación del objeto que tienen por nombre si el objeto no se encuentra en la escena. Si el objeto ya se ha creado y está en la escena, la pulsación sobre su botón lo hará desaparecer.

5.4 Prueba 3: Discriminación por Tamaño y Apilamiento de Bloques

El objetivo de esta prueba es el de comprobar la comprensión espacial que muestra el sujeto de pruebas al interactuar con 3 cuerpos geométricos con la misma forma y distinto tamaño. Para ello, en primer lugar, el sujeto deberá ordenar los cuerpos geométricos de mayor a menor tamaño, siendo el de mayor tamaño el que se sitúe a la derecha. Tras esto, deberá hacer una torre de tres pisos en el centro de la mesa, apilando los bloques unos encima de otros, siendo el mayor el de la base y el menor el de la cima. Se anotará el número de fallos hasta conseguir realizar cada uno de los objetivos, así como el tiempo empleado para conseguir lograr cada uno. Un total de 10 fallos en alguno de los objetivos dará por concluida esta prueba. Se considerará como fallo la mala colocación de los bloques, la caída de la torre y los resets de los bloques.

5.4.1 Interfaz de Usuario

En la mesa sobre la que se trabajó en la prueba anterior, aparecerán 3 bloques de distinto tamaño y color. El usuario deberá interactuar con estos objetos para ordenarlos por tamaño y posteriormente construir una torre.

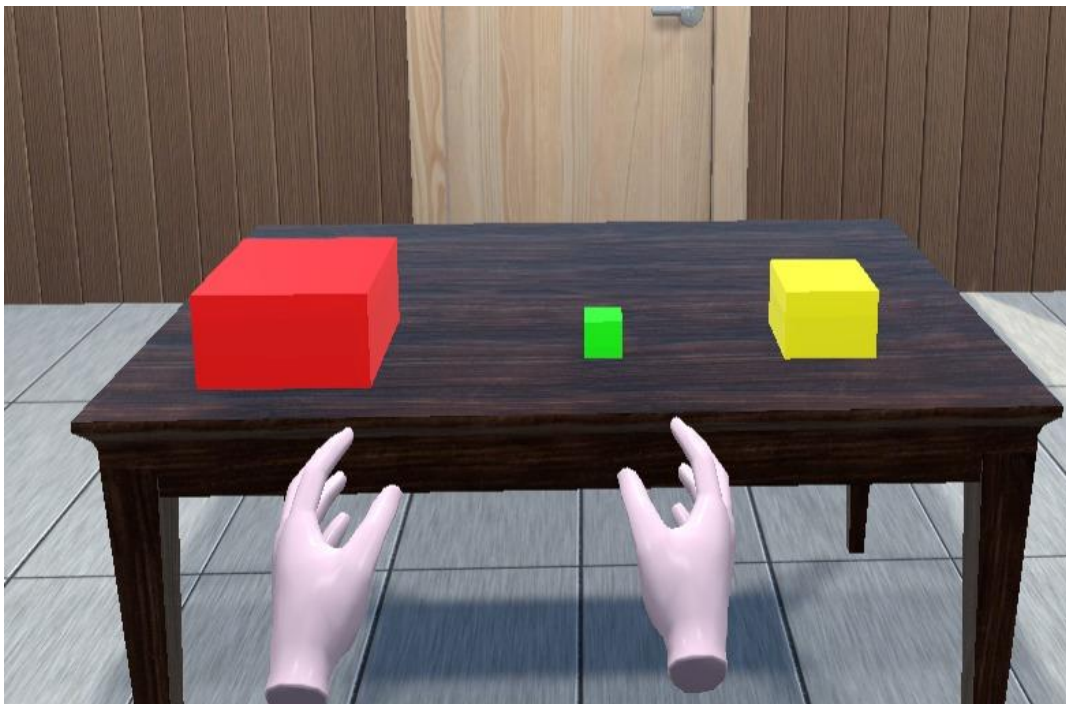


Figura 28 Prueba 3 desde el punto de vista del sujeto de pruebas. En esta se aprecian 3 bloques de diferente tamaño y color con los que habrá que interactuar.

5.4.2 Interfaz de Investigador

En este caso, la interfaz indica la prueba que se está llevando a cabo y consta de un botón de “RESET” que devuelve los bloques a su posición inicial al ser pulsado.

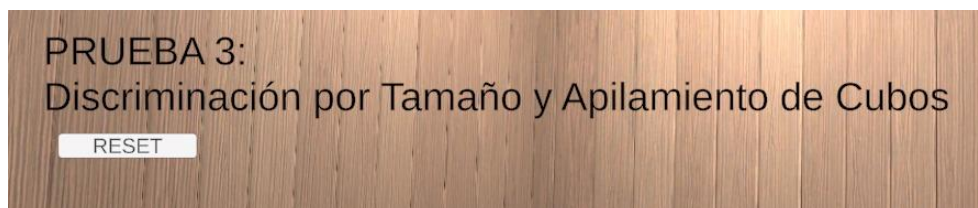


Figura 29 Interfaz de investigador que se muestra durante el desarrollo de la prueba 3. Este permite el reinicio de las piezas a su posición inicial mediante la pulsación del botón “RESET”.

5.5 Prueba 4: Navegación Espacial

Esta prueba se divide en dos fases. En la primera, el usuario deberá moverse por la habitación vacía para accionar varios pulsadores que emiten ruido. En la segunda, la habitación se llenará obstáculos (columnas) que el sujeto deberá esquivar a la hora de ir activando los pulsadores. En ninguna de las fases deben activarse dos pulsadores al mismo tiempo. Para cambiar de una fase a otra, el usuario deberá colocarse en el cuadrado rojo pintado en el suelo. En la primera fase se diseñará un orden de activación de los pulsadores aleatorio común para todos los sujetos de pruebas y se medirá el tiempo que tardan en desactivarlos todos. Para la segunda fase, se hará lo mismo y se anotará, además, el número de columnas que se han golpeado.

5.5.1 Interfaz de Usuario

En la primera parte de esta prueba, en la habitación vacía, irán apareciendo botones que emiten ruido y que se sitúan en las paredes, el objetivo es tocar los botones para desactivarlos. Al establecer contacto con el pulsador, este desaparecerá. No habrá nunca más de un pulsador activo en la escena. En la segunda parte de la prueba, aparecerán en la habitación columnas que deben ser evitadas para desactivar nuevamente los pulsadores. Si se toca alguna columna, esta cambiará de color volviéndose roja.



Figura 30 Segunda parte de la prueba 4 que muestra el punto de vista del sujeto de pruebas. En esta imagen se aprecia un pulsador rojo que hay que alcanzar y tocar sin colisionar con ninguna de las columnas verdes que hay distribuidas por la habitación.

5.5.2 Interfaz de Investigador

A parte del texto que indica qué prueba que se está llevando a cabo, en la interfaz hay 7 botones. Los 6 primeros son los encargados de hacer aparecer los pulsadores que tienen que ser tocados por el sujeto de pruebas. Estos se actúan manualmente, cuando el sujeto desactive un pulsador, el encargado del experimento accionará el siguiente. El séptimo botón, es el encargado de hacer aparecer o desaparecer las columnas y será activado cuando se dé por finalizada la primera fase de la prueba y se vaya a proceder a la segunda. Para esto, el sujeto se debe situar sobre el cuadrado rojo del suelo.

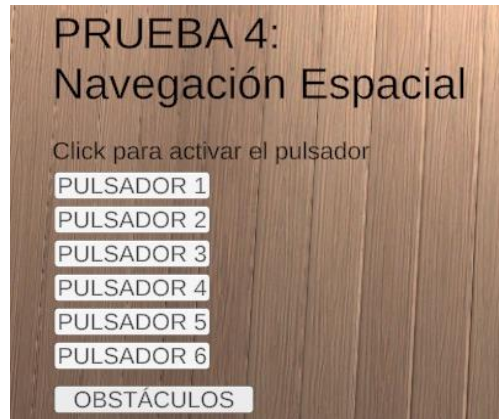


Figura 31 Interfaz de investigador que se muestra durante el desarrollo de la prueba 4. Los 6 botones de PULSADOR crean cada uno un pulsador en una zona distinta de la habitación, el pulsador desaparece cuando el sujeto que está realizando la prueba lo toca. El botón OBSTÁCULOS permite hacer aparecer o desaparecer unas columnas que el usuario deberá evitar a la hora del desarrollo de la prueba.

5.6 Prueba 5: Ordenado de Objetos

En esta prueba deberá llevarse a su mesa correspondiente cada objeto que se coja de una caja llena de objetos de distintas formas y tamaños. Encima de las mesas destino, hay un modelo de los objetos que hay que depositar allí. El objetivo será cronometrar cuánto tiempo tarda el sujeto en ordenar estos objetos y el número de fallos cometidos. Si se pierde algún objeto que no logre localizar el sujeto y pide el reset, la prueba empezará desde cero y se anotará el hecho de haber reiniciado.

5.6.1 Interfaz de Usuario

Aparecerán 5 mesas en la habitación, 4 situadas en las esquinas y una en el centro. La mesa del centro contiene una cesta llena de objetos de distinto tamaño y forma que deberán ser reconocidos y llevados a la mesa de la esquina a la que pertenece. Cada mesa de cada esquina tiene asignado un tipo de objeto que ha de depositarse en ella, el tipo de objetos que deben depositarse en esa mesa viene representado por un objeto que cuelga de la pared a la que pega cada mesa.

5.6.2 Interfaz de Investigador

En este caso, la interfaz indica la prueba que se está llevando a cabo y consta de un botón de “RESET” que devuelve todos los objetos a su posición inicial al ser pulsado. Se trata de una interfaz muy parecida a la de la prueba 3, la correspondiente a la **Figura 29**.

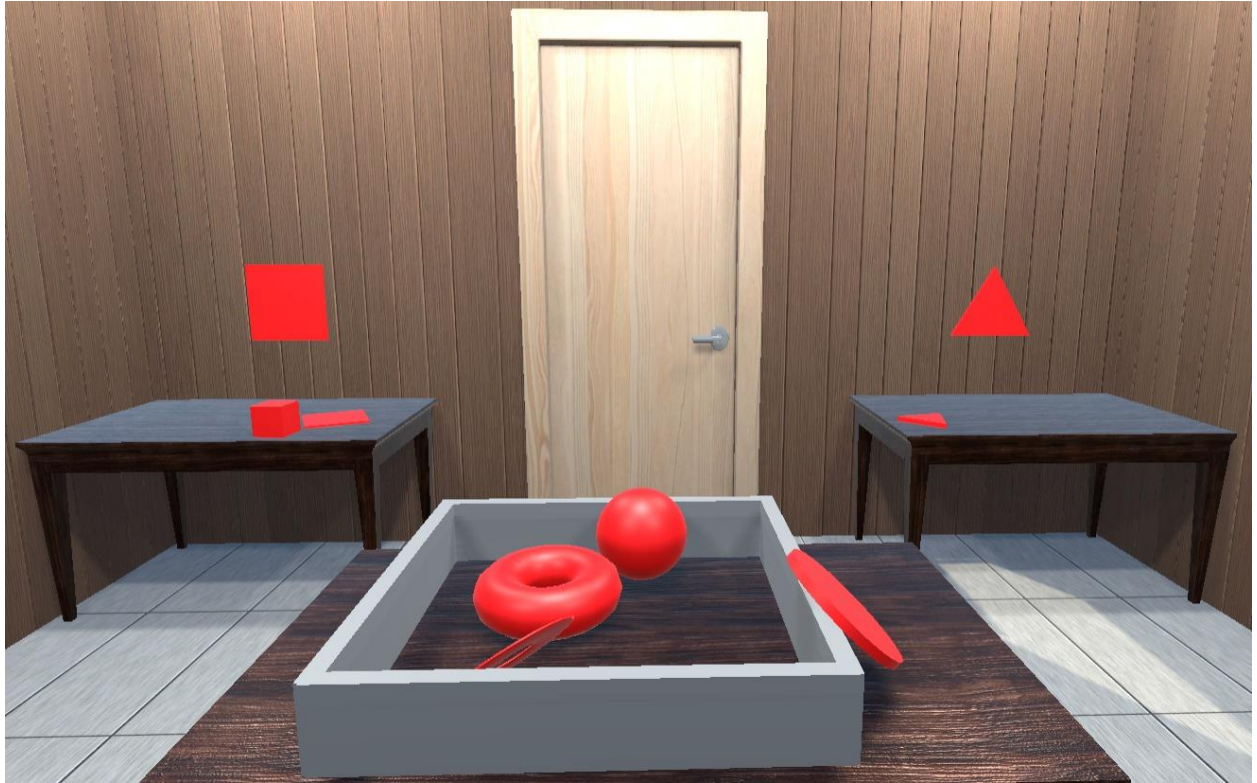


Figura 32 Interfaz de usuario de la prueba 5. En esta se deberán colocar en su mesa correspondiente cada uno de los objetos que aparecen amontonados en la caja de la mesa central.

6 CONCLUSIÓN

Este proyecto se realizó con la idea de investigar sobre la realidad virtual, la creación de entornos virtuales en algún motor gráfico y la unión de la ingeniería en la investigación de avances sanitarios que permitan mejorar la calidad de vida de las personas.

De esta forma, en este trabajo se ha llevado a cabo la construcción de un entorno virtual 3D al que se puede acceder haciendo uso de unas gafas de realidad virtual, en el que se han desarrollado una serie de pruebas que están preparadas para llevar a cabo otro estudio centrado en el análisis de datos obtenidos de la realización de dichas pruebas por sujetos sin problemas de visión.

La parte más complicada de este proyecto ha sido el aprender a usar Unity para configurar las gafas de realidad virtual y su interacción con todos los objetos a usar en las pruebas. Aunque este motor gráfico tiene una interfaz intuitiva que hace que el desarrollo de entornos sencillos no sea complicado, la configuración interna de los objetos presentes en el entorno sí ha supuesto un verdadero reto.

El desarrollo de entornos en Unity destinados a la investigación, en este caso, de la visión biónica es un ámbito muy reciente del que apenas hay documentación en la que basarse para saber que se está yendo por el buen camino. En la configuración del filtro de visión biónica surgieron un montón de fallos de incompatibilidad al intentar aplicar *Shaders* a la cámara. Estos fallos han provocado que el resultado de este filtro no sea tan preciso como si se hubiera realizado con el *toolbox* del laboratorio “BionicVisionLab”. Además, debido a todos los errores e incompatibilidades que se fueron encontrando se tuvo que descartar la idea de hacer una visión biónica monocular y sólo se ha podido desarrollar la binocular. Sin embargo, a pesar de todos los fallos, se ha conseguido crear un filtro de visión biónica que simula, aunque de forma menos precisa, la visión que tendría una persona con un implante PRIMA en ambos ojos.

La programación de la interfaz para el investigador en Unity ha sido la parte más complicada de aprender, pues todos los botones y teclas que se pulsan y provocan cambios dentro del entorno virtual se han tenido que programar en scripts basados en C#, pero con el lenguaje de programación de Unity, un lenguaje con el que nunca había trabajado en anteriormente y que en la declaración y manejo de variables difiere bastante de dev-C.

Sin embargo, todas las dificultades que han ido surgiendo se han superado y se ha conseguido desarrollar un proyecto que cumple con casi todos los objetivos planteados al inicio de este trabajo, que consistían en la creación de un entorno 3D virtual en Unity que permitiese evaluar la capacidad de interacción y percepción espacial de distintos sujetos dentro de un entorno cuando se les aplicase un filtro que simule lo que ve un usuario con una prótesis de visión biónica.

6.1 Futuras Líneas de Trabajo

La más directa futura línea de trabajo a la que da pie este proyecto es la realización de un estudio que analice los resultados obtenidos por distintos sujetos de pruebas. Se podrían hacer dos grupos de estudio. Un primer grupo formado por sujetos que realizarían las pruebas bajo el filtro de visión biónica y, un segundo grupo, que las realizaría sin ningún tipo de filtro. De la comparación de los datos obtenidos se podría obtener qué pruebas resultan más complicadas de realizar por el primer grupo respecto al segundo. Con esto se podría concluir en qué aspectos debería centrarse el desarrollo de los nuevos prototipos de implantes de retina que se estén llevando a cabo, con el fin de mejorar la percepción del sujeto.

Otra línea de trabajo muy útil a realizar se puede centrar en el desarrollo y la implementación de un filtro de visión biónica más realista, que puede basarse en el del *toolbox* que no ha podido instalarse. Esto dotaría de más valor a las pruebas a realizar, ya que las simulaciones y resultados serían más precisos y acordes a la realidad. En este mismo camino, se podría trabajar en adaptar el filtro de visión biónica binocular para conseguir hacerlo monocular y que solo se ejecute en un ojo mientras por el otro se ve todo en negro.

Por último, como línea de trabajo alternativa, siempre se pueden añadir nuevas pruebas al proyecto que busquen estudiar otros campos de la visión más relacionados con el reconocimiento de figuras o letras y no tanto del manejo espacial, como es el caso.

REFERENCIAS

- [1] Víctor Udo, O. B., & Eustaquio Alcides Martínez Jara. (2015). Application of virtual reality in a learning experience. *Journal of Computer Science and Technology*, 15(2), 149-153.
- [2] Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 1–47.
- [3] J Kasowski & M Beyeler (2022). Immersive virtual reality simulations of bionic vision. In AHs '22: Augmented Humans International Conference, March 13-15th, 2022, Munich, Germany + Cyberspace. ACM, New York, NY, USA.
- [4] Bourne, R. R. A., Flaxman, S. R., Braithwaite, T., Cicinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., Keeffe, J., Kempen, J. H., Leasher, J., Limburg, H., Pesudovs, K., Resnikoff, S., Silvester, A., Stevens, G. A., Tahhan, N., Wong, T. Y., Taylor, H. R., Bourne, R., Ackland, P., ... Wormald, R. (2017). Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(9), e888–e897.
- [5] Özmert, E., & Arslan, U. (2019). Retinal Prostheses and Artificial Vision. *Turkish journal of ophthalmology*, 49(4), 213–219.
- [6] Fernandez, E. (2018). Development of visual Neuroprostheses: trends and challenges. *Bioelectronic Medicine*, 4(1), 12–12.
- [7] Chang, N., Park, J. J., Hariharan, G., Itaya, M., Chen, J., Kwon, J., & Uchida, Y. (2016). *Virtual Reality: From virtual to reality*. (). New York: JPMorgan Chase & Company. Retrieved from ProQuest One Business
- [8] Steuer, J. S. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73–93.
- [9] Heilig, M. (1962). Sensorama Simulator. U.S. Patent No. 3,050,870. U.S. Patent and Trademark Office.
- [10] Sutherland, I.E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field*.
- [11] Wiederhold, B. K., & Wiederhold, M. D. (2005). A Brief History of Virtual Reality Technology. *Virtual reality therapy for anxiety disorders: Advances in evaluation and treatment*. (pp. 11-27, 225 Pages). American Psychological Association, American Psychological Association.
- [12] Boyer, S. (2009). A Virtual Failure: Evaluating the Success of Nintendo's Virtual Boy. *Velvet Light Trap*, (64), 23-33
- [13] Paíno Ambrosio, A., & Rodríguez Fidalgo, M. I. (2020). Past, present and future of Virtual Reality: Analysis of its technological variables and definitions. *Culture & History Digital Journal*, 9(1), e010.
- [14] Weiland, J. D., & Humayun, M. S. (2014). Retinal Prosthesis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(5), 1412–1424.
- [15] Wu, K. Y., Mina, M., Sahyoun, J., Kalevar, A., & Tran, S. D. (2023). Retinal Prostheses: Engineering and Clinical Perspectives for Vision Restoration. *Sensors*, 23(13), 5782.
- [16] Hartong, D. T., Berson, E. L., & Dryja, T. P. (2006). Retinitis pigmentosa. *Lancet (London, England)*, 368(9549), 1795–1809.
- [17] Loewenstein, A., & Trivizki, O. (2023). Future perspectives for treating patients with geographic atrophy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 261(6), 1525–1531.
- [18] Brindley, G. S., & Lewin, W. S. (1968). The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex. *The Journal of physiology*, 196(2), 479–493.

- [19] POTTS, A. M., & INOUE, J. (1969). The electrically evoked response (EER) of the visual system: II. Effect of adaptation and retinitis pigmentosa. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 8(6), 605-.
- [20] Humayun, M. S., de Juan, E., Jr, Weiland, J. D., Dagnelie, G., Katona, S., Greenberg, R., & Suzuki, S. (1999). Pattern electrical stimulation of the human retina. *Vision research*, 39(15), 2569–2576.
- [21] Rizzo, J. F., 3rd, Wyatt, J., Loewenstein, J., Kelly, S., & Shire, D. (2003). Perceptual efficacy of electrical stimulation of human retina with a microelectrode array during short-term surgical trials. *Investigative ophthalmology & visual science*, 44(12), 5362–5369
- [22] Humayun, M. S., Weiland, J. D., Fujii, G. Y., Greenberg, R., Williamson, R., Little, J., Mech, B., Cimmarusti, V., Van Boemel, G., Dagnelie, G., & de Juan, E. (2003). Visual perception in a blind subject with a chronic microelectronic retinal prosthesis. *Vision Research (Oxford)*, 43(24), 2573–2581.
- [23] Yanai, D., Weiland, J. D., Mahadevappa, M., Greenberg, R. J., Fine, I., & Humayun, M. S. (2007). Visual Performance Using a Retinal Prosthesis in Three Subjects With Retinitis Pigmentosa. *American Journal of Ophthalmology*, 143(5), 820-827.e2.
- [24] Hornig, R., Zehnder, T., Velikay-Parel, M., Laube, T., Feucht, M., Richard, G. (2007). The IMI Retinal Implant System. In: Humayun, M.S., Weiland, J.D., Chader, G., Greenbaum, E. (eds) *Artificial Sight. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*. Springer, New York, NY.
- [25] Roessler, G., Laube, T., Brockmann, C., Kirschkamp, T., Mazinani, B., Goertz, M., Koch, C., Krisch, I., Sellhaus, B., Trieu, H. K., Weis, J., Bornfeld, N., Rothgen, H., Messner, A., Mokwa, W., & Walter, P. (2009). Implantation and Explantation of a Wireless Epiretinal Retina Implant Device: Observations during the EPIRET3 Prospective Clinical Trial. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 50(6), 3003–3008.
- [26] Humayun, M. S., Dorn, J. D., da Cruz, L., Dagnelie, G., Sahel, J. A., Stanga, P. E., Cideciyan, A. V., Duncan, J. L., Elliott, D., Filley, E., Ho, A. C., Santos, A., Safran, A. B., Ardit, A., Del Priore, L. V., Greenberg, R. J., & Argus II Study Group (2012). Interim results from the international trial of Second Sight's visual prosthesis. *Ophthalmology*, 119(4), 779–788.
- [27] Stiles, N. R. B., Patel, V. R., & Weiland, J. D. (2021). Multisensory perception in Argus II retinal prosthesis patients: Leveraging auditory-visual mappings to enhance prosthesis outcomes. *Vision research*, 182, 58–68.
- [28] Chow, A. Y., Chow, V. Y., Packo, K. H., Pollack, J. S., Peyman, G. A., & Schuchard, R. (2004). The artificial silicon retina microchip for the treatment of vision loss from retinitis pigmentosa. *Archives of ophthalmology (Chicago, Ill. : 1960)*, 122(4), 460–469.
- [29] Palanker, D., Vankov, A., Huie, P., & Baccus, S. (2005). Design of a high-resolution optoelectronic retinal prosthesis. *Journal of neural engineering*, 2(1), S105–S120.
- [30] Palanker, D., Le Mer, Y., Mohand-Said, S., Muqit, M., & Sahel, J. A. (2020). Photovoltaic Restoration of Central Vision in Atrophic Age-Related Macular Degeneration. *Ophthalmology*, 127(8), 1097–1104.
- [31] Muqit, M. M. K., Le Mer, Y., Olmos de Koo, L., Holz, F. G., Sahel, J. A., & Palanker, D. (2024). Prosthetic visual acuity with the PRIMA subretinal microchip in patients with atrophic age-related macular degeneration at 4 years follow-up. *Ophthalmology Science*, 4(5), 100510.
- [32] Ayton, L. N., Blamey, P. J., Guymer, R. H., Luu, C. D., Nayagam, D. A., Sinclair, N. C., Shivdasani, M. N., Yeoh, J., McCombe, M. F., Briggs, R. J., Opie, N. L., Villalobos, J., Dimitrov, P. N., Varsamidis, M., Petoe, M. A., McCarthy, C. D., Walker, J. G., Barnes, N., Burkitt, A. N., Williams, C. E., ... Bionic Vision Australia Research Consortium (2014). First-in-human trial of a novel suprachoroidal retinal prosthesis. *PloS one*, 9(12), e115239.
- [33] Karapanos, L., Abbott, C. J., Ayton, L. N., Kolic, M., McGuinness, M. B., Baglin, E. K., Titchener, S. A., Kvangsakul, J., Johnson, D., Kentler, W. G., Barnes, N., Nayagam, D. A. X., Allen, P. J., & Petoe, M. A. (2021). Functional Vision in the Real-World Environment With a Second-Generation (44-Channel) Suprachoroidal Retinal Prosthesis. *Translational vision science & technology*, 10(10), 7.
- [34] Lui, W.L., Browne, D., Kleeman, L., Drummond, T., & Li, W.H. (2011). Transformative reality: Augmented reality for visual prostheses. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 253-254.

- [35] Zapf, M. P. H., Boon, M., Lovell, N. H., & Suaning, G. J. (2015). Assistive peripheral prosthetic vision aids perception and mobility in outdoor environments: A virtual-reality simulation study. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2015*, 1638-1641.
- [36] Lee, L., Wei, X., Kwok, T. C., Cheung, S. K. S., Fu, L. W., Yin-Chun, F., Lu, A., Hui, Y. K., Hao, T., Leong, H. U., & Wu, N. (2024). A Systematic Review of the Design of Serious Games for Innovative Learning: Augmented Reality, Virtual Reality, or Mixed Reality? *Electronics*, *13*(5), 890.
- [37] <https://www.meta.com/es/quest/products/quest-2/tech-specs/>
- [38] <https://www.vive.com/sea/product/vive-cosmos/specs/>
- [39] <https://developer.oculus.com/downloads/package/oculus-hand-models/>
- [40] <https://www.youtube.com/channel/UC-BligqNSwG0krJDfaPhytw>
- [41] Stingl, K., Bartz-Schmidt, K. U., Besch, D., Braun, A., Bruckmann, A., Gekeler, F., Greppmaier, U., Hipp, S., Hördörfer, G., Kernstock, C., Koitschev, A., Kusnyerik, A., Sachs, H., Schatz, A., Stingl, K. T., Peters, T., Wilhelm, B., & Zrenner, E. (2013). Artificial vision with wirelessly powered subretinal electronic implant alpha-IMS. *Proceedings of the Royal Society. B, Biological Sciences*, *280*(1757), 20130077–20130077.
- [42] Chen, S. C., Suaning, G. J., Morley, J. W., & Lovell, N. H. (2009). Simulating prosthetic vision: I. Visual models of phosphenes. *Vision Research (Oxford)*, *49*(12), 1493–1506.
- [43] Chen, S. C., Suaning, G. J., Morley, J. W., & Lovell, N. H. (2009). Simulating prosthetic vision: II. Measuring functional capacity. *Vision Research (Oxford)*, *49*(19), 2329–2343.
- [44] J Kasowski & M Beyeler (2022). Immersive Virtual Reality Simulations of Bionic Vision. *AHs '22: Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022* 82–93.