



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Universidad de Oviedo

ESCUELA DE INGENIERÍA INFORMÁTICA DEL
SOFTWARE

**ESTIMULACIÓN LUMINOSA CON
REALIDAD VIRTUAL PARA
DETECTAR FOTOSENSIBILIDAD**

Trabajo Fin de Grado 2021

Autora:

Sofía Martín Rodríguez

Tutores:

Víctor Manuel Álvarez García

Beatriz García López

"La investigación, especialmente la académica, es una forma de optimismo sobre la condición humana."

- Henry Rosovsky

Remarcar el apoyo constante de mi tutor Víctor, y la colaboración de la neurofisióloga Beatriz García para hacer este proyecto realidad.

SM

Resumen

A medida que nuevas tecnologías van surgiendo, aparecen nuevos factores que pueden afectar negativamente a las personas. En concreto, algunos factores visuales pueden llegar a desencadenar epilepsia fotosensible, una afección que repercute tanto en personas con diagnóstico de epilepsia, como latentes y aparentemente sanas.

La realidad virtual es una de las últimas tecnologías en desarrollo, aplicándose cada vez en más campos y sectores muy demandados como pueden ser los videojuegos. Estos contenidos pueden ser causantes potenciales de una respuesta cerebral denominada respuesta fotoparoxística, la cual es un fenómeno bien conocido y documentado en la literatura científica que puede detectarse mediante pruebas de estimulación fótica intermitente.

En esta investigación se pretende utilizar la realidad virtual para determinar el riesgo potencial de esta tecnología en relación con la fotosensibilidad. Para ello, se desarrolla VR-Photosense, una herramienta software que permitirá llevar a cabo pruebas de estimulación fótica intermitente. Este prototipo emplea diferentes estímulos visuales con el objetivo de estudiar respuestas cerebrales anormales haciendo uso de un electroenfacelograma en personas que padecen fotosensibilidad. Esto permitirá determinar el impacto de estímulos en realidad virtual sensibles a la vista en el cerebro humano.

Además, durante la investigación se ha realizado una prueba inicial para determinar la viabilidad del prototipo, obteniendo unos resultados prometedores que abren las puertas al desarrollo de un estudio clínico completo.

Palabras clave: Fotosensibilidad, Epilepsia, Realidad virtual, gafas de realidad virtual, respuesta fotoparoxística, estimulación fótica intermitente, electroenfacelografía.

Abstract

As new technologies emerge, new factors that can adversely affect people increase considerably. In particular, these factors can trigger photosensitive epilepsy, a condition that affects both diagnosed and apparently healthy people.

Virtual reality is one of the latest technologies in development, whose use is widespread and being applied in highly demanded sectors such as video games. These contents and hardware can potentially cause a brain response called photo-paroxysmal response, which is a well known and documented phenomenon that can be diagnosed thanks to intermittent photic stimulation tests.

In this research we aim to use virtual reality to determine the potential risk of this technology in relation to photo-sensitivity. To achieve this, we present VR-Photosense, a software tool that will allow intermittent photic stimulation tests to be carried out using virtual reality. This prototype uses different visual stimuli to study abnormal brain responses using an electroencephalography in people suffering from photo-sensitivity. This will make it possible to determine the impact of visually-sensitive virtual reality stimuli on the human brain.

In addition, an initial test has been carried out in order to determine the feasibility of the prototype during the research, obtaining promising results that potentially open the door to the development of a full clinical study.

Keywords: Photo-sensitivity, epilepsy, virtual reality, photo-paroxysmal response, intermittent photic stimulation, electroencephalography.

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Definiciones y Abreviaturas	5
3.1. Abreviaturas	5
3.2. Definiciones	5
4. Base teórica	8
4.1. Fotosensibilidad o epilepsia fotosensible	8
4.2. Pruebas de estimulación luminosa intermitente	10
4.3. Realidad Virtual	13
5. Solución propuesta: VR-Photosense	16
5.1. Software de estimulación luminosa	16
5.2. Monitorización	20
6. Método	24
6.1. Estimulación luminosa con VR-Photosense	25
7. Evaluación y resultados	29
8. Alcance de la investigación	31
9. Conclusiones	33
10. Planificación	35
11. Presupuesto	38
12. Anexos	42
12.1. Anexo I: Elaboración del presupuesto	42
12.1.1. Definición de empresa	42
12.1.2. Partidas	44
12.1.3. Presupuesto de cliente	45
12.2. Anexo II: Instrucciones básicas de uso	47
12.3. Anexo III: Manual para desarrolladores	51
12.3.1. Configuración de dispositivos de entrada	52
12.3.2. Compilación	53
12.3.3. Modificaciones en el código	54
12.4. Anexo IV: Requisitos del cliente	55
13. Contenido adjunto a la memoria	58
13.1. Artículo para SOCO 2021	58
13.2. Código fuente VR-Photosense	58

Índice de figuras

1.	Uso de videojuegos, ordenador o internet en menores de 15 años en España. INE.	1
2.	Simulación de una prueba ELI/IPS en el Hospital Universitario de Burgos.	10
3.	Escenario de prueba ELI con VEEG que muestra picos a los 20Hz [Vin14].	11
4.	PPR ocurrida durante una prueba de estimulación luminosa intermitente [Ver+12] a 15Hz.	12
5.	Ilustración del funcionamiento de un HMD simple.	14
6.	Escena del juego de RV llamado Beat Saber.	14
7.	VR-Photosense prototype based on functionally expressed by neurophysiologist.	17
8.	Diagrama de paquetes contenidos en el proyecto.	18
9.	Diagrama de la escena implementada en Unity 3D	19
10.	Esquema del funcionamiento teórico del sistema	21
11.	Diagrama de secuencia del sistema completo usando websockets	22
12.	Diagrama de clases del cliente Stimulation	22
13.	Visualización de la información desde la web	23
14.	Monitorización de VR-Photosense y vista del resgistro del EEG OpenBCI.	23
15.	Montaje común. Respuesta de arrastre en las regiones occipitales, a la frecuencia del flash (8Hz) y a las frecuencias armónicas de 16Hz y 24HZ.	24
16.	Registro de canales 10-20 de un electroencefalograma EEG [NGB10].	25
17.	Ultracortex Mark IV de Open BCI	26
18.	Colocación de los electrodos en el modelo Ultracortex Mark IV de OpenBCI según el sistema 10-20.	27
19.	VR-Photosense set-up para pruebas de estimulación luminosa intermitente.	28
20.	Respuesta de arrastre detectada en el ritmo alfa a una frecuencia de estimulación de 10Hz con VR-Photosense.	29
21.	Nuestra propuesta vs estimulación convencional	31
22.	Distribución gráfica del trabajo entre roles	35
23.	Distribución gráfica de trabajo en las distintas fases.	36
24.	Partida I: adquisición del hardware	44
25.	Partida II: desarrollo del proyecto.	45
26.	Partida III: desarrollo de la documentación.	45
27.	Partida IV: Otros costes.	46
28.	Presupuesto total de costes.	46
29.	Partida de cliente sin promediar.	46
30.	Adaptador USB-USBC.	47
31.	Icono de la aplicación móvil VR-Photosense.	48
32.	Aplicación VR-Photosense cargada y funcionando.	48

33.	Forma de colocar el teléfono dentro de las gafas de realidad virtual.	49
34.	Sistema de monitorización de VR-Photosense preparado.	49
35.	Captura de la instalación de la versión 2020.1.17f del motor Unity y los diferentes módulos.	51
36.	Captura del menú Proyectos de Unity Hub.	51
37.	Archivo del tipo Input Action Asset que contiene las configuraciones de dispositivos y acciones de entrada.	52
38.	Interfaz que ofrece el Input System 1.0.2 para asociar acciones a los distintos dispositivos de entrada.	52
39.	Ventana de configuración para compilar la aplicación desde Unity 3D.	53
40.	Paquetes y clases incluidas en la carpeta resources dentro del proyecto en Unity 3D.	54

Índice de tablas

1.	Lista de comandos	20
2.	Características evaluadas de VR-Photosense.	30
3.	Distribución del trabajo.	35
4.	Duración de las distintas fases planificadas.	36
5.	Definición de tareas asociadas a cada fase y duración de cada una.	37
6.	Presupuesto de cliente resumido.	38
7.	Presupuesto de cliente desglosado.	38
8.	Personal definido en la empresa.	42
9.	Productividad del personal.	42
10.	Medios de producción.	42
11.	Costes indirectos.	43
12.	Horas productivas.	43
13.	Precio por hora del personal.	43
14.	Valores a promediar para el cliente.	46
15.	Comandos mostrados en el manual de instrucciones básicas para VR-Photosense.	50

1. Introducción

La epilepsia fotosensible es una forma específica de epilepsia, la cual normalmente aparece como respuesta a ciertos estímulos visuales, siendo más prevalente en niños y adolescentes de entre 7 y 19 años [Ver+12]. La exposición a luces intermitentes en frecuencias o luminosidad concretas representan una amenaza importante para individuos fotosensibles, muchos de los cuales aún no han sido diagnosticados, incurriendo en un incremento de la probabilidad de riesgo de ataque sin tener conciencia previa de padecer esta patología. En la vida diaria se presentan muchas de estas condiciones que pueden ser consideradas como situaciones proclives a desencadenar reacciones fotosensibles, tanto en la naturaleza como en el uso de las nuevas tecnologías [CS21].

El continuo desarrollo de contenidos novedosos y la entrada al mercado de dispositivos cada vez más inmersivos hacen que a día de hoy sea asequible para cualquier individuo el disponer de varias tecnologías en casa, véase televisiones de alta resolución, consolas e incluso gafas de realidad virtual. Los niños y adolescentes constituyen el grupo de población que más uso hace de las tecnologías a día de hoy, consumiendo desde películas hasta videojuegos a diario. En el siguiente gráfico puede observarse la prevalencia del uso de videojuegos, ordenador o internet en los menores de 15 años, constituyendo un 63,7% [Est].

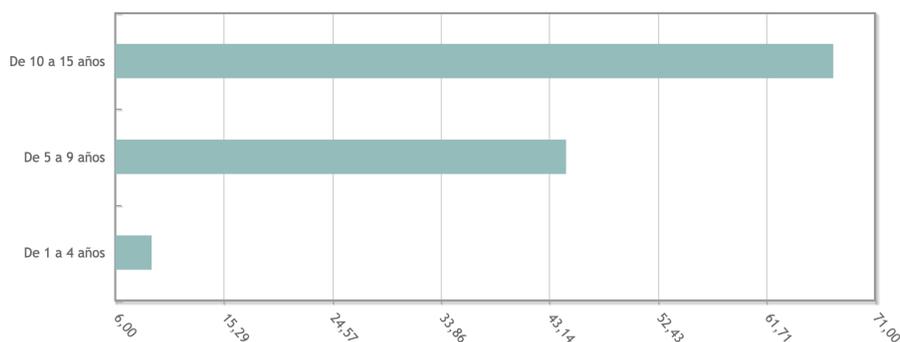


Figura 1: Uso de videojuegos, ordenador o internet en menores de 15 años en España. INE.

Sin embargo, muchos de estos dispositivos como televisiones plasma, monitores o consolas y sus contenidos pueden suponer un riesgo para un porcentaje de consumidores, especialmente en los rangos de edad anteriormente mencionados [CS21]. Ciertos parámetros como el brillo o la frecuencia en estos aparatos o luces intermitentes en los contenidos multimedia son conocidos provocadores de ataques de epilepsia fotosensible [Fer+21].

Una de las nuevas tecnologías que más en auge se encuentra es la Realidad Virtual (RV). Durante los últimos años su uso se ha extendido de manera considerable, desde el sector de los videojuegos hasta medicina o aplicaciones

industriales. El año pasado la plataforma más popular a nivel mundial de distribución digital de videojuegos, Steam, publicó más de 60 juegos destinados a RV, y según avanza el tiempo la comercialización de contenidos y dispositivos específicos va aumentando. Se espera que antes del año 2025 esta industria supere los 40 millones de ventas mundiales [Vai21].

Este tipo de epilepsia se hizo más conocida debido a la emisión de un episodio de la conocida serie Pokemon en Japón en 1997 [Wud97]. Durante esta emisión se registraron unos 700 niños que sufrieron crisis epilépticas mientras veían la televisión, ya fueran desde síntomas leves hasta convulsiones y pérdida de conciencia. Tras este incidente surgieron investigaciones que manifestaban preocupaciones sobre el riesgo de exposición al contenido emitido en tanto en televisiones como en videojuegos, con el fin de evitar que esto volviese a ocurrir [HT04].

Conforme nuevas tecnologías y contenidos van surgiendo y evolucionando, es necesario comprobar que sean seguras sobretodo para aquellas personas que más las usan, como niños y adolescentes. La Realidad Virtual está presente en cada vez más hogares, y hoy en día sus contenidos son uno de los provocadores más relevantes que pueden desencadenar ataques de epilepsia fotosensible [Fer+21]. Con todo esto, la necesidad de estudiar el impacto y efecto de la realidad virtual en individuos que padecen o podrían padecer fotosensibilidad es cada vez más imprescindible.

2. Objetivos

Con la llegada de la realidad virtual (VR) al espectro de las nuevas tecnologías y con ella los head-mounted displays (HMD), los factores que pueden causar epilepsia fotosensible aumentan considerablemente. Frente a la creencia general, no todos los ataques de epilepsia fotosensible involucran convulsiones o pérdida de conciencia, haciendo que el riesgo de sufrir este tipo de trastorno sea subestimado y pase desapercibido. Teniendo todo esto en cuenta, determinar el impacto de estos dispositivos para los usuarios es un aspecto clave para garantizar la seguridad de uso de los mismos.

Los contenidos de realidad virtual y los videojuegos pueden ser provocadores potenciales de una respuesta denominada respuesta foto-paroxística o fotoconvulsiva, que es un fenómeno muy conocido que puede diagnosticar haciendo uso de pruebas de estimulación luminosa intermitente. Esto junto con el uso de un electroenfacelograma permite determinar las respuestas del cerebro ante este tipo de estímulos.

En esta investigación se estudiará la relevancia de este tipo de tecnología en el campo de la fotosensibilidad y cómo podría afectar a los individuos en el día a día. También se presenta VR-Photosense, un software de estimulación luminosa intermitente en Realidad Virtual, el cual usa diferentes tipos de estimulaciones luminosas para estudiar respuestas anormales usando un electroenfacelograma de bajo costo. Gracias a este prototipo se podrá comenzar a estudiar el impacto de estímulos visuales a través de VR en el cerebro de pacientes fotosensibles, mostrando cómo se puede apreciar respuestas cerebrales haciendo uso de esta estimulación. Las preguntas a responder con esta investigación son las siguientes:

1. ¿Es posible utilizar software y dispositivos Head-Mounted Display de realidad virtual para identificar respuestas fotosensibles?
2. ¿Permite nuestra solución propuesta identificar arrastre en individuos sanos?
3. ¿Permite la solución identificar PPR en pacientes con diagnóstico de epilepsia fotosensible?

La estructura del estudio es la siguiente: la primera sección presenta un resumen de la base teórica, donde se describirán en detalle tanto el fenómeno de epilepsia fotosensible y la fotosensibilidad, como la relación de estos con los contenidos y dispositivos de realidad virtual. A continuación, se presenta el primer prototipo, VR Photosense, el software diseñado para medir fotosensibilidad. Primero se describe el desarrollo de la aplicación móvil y después la monitorización. El siguiente apartado describirá el método seguido para determinar la viabilidad del prototipo. Después, el punto siete describe los resultados obtenidos usando

el software, mientras el siguiente punto comenta el alcance, tanto presente como futuro, de esta investigación. Por último, se presentan las conclusiones, luego la planificación seguida para el desarrollo de la investigación y el presupuesto realizado.

3. Definiciones y Abreviaturas

3.1. Abreviaturas

- **.NET**: framework de Microsoft. Permite desarrollar aplicaciones independientemente de la arquitectura física y del sistema operativo.
- **BCI**: brain-computer interface, interfaz cerebro-computador.
- **DL**: deep learning, aprendizaje profundo.
- **EEG**: electroenfacelograma.
- **ELI**: estimulación luminosa intermitente. Es lo mismo que IPS, siendo estas últimas en inglés.
- **HMD**: Head-Mounted Display. Gafas de realidad virtual.
- **HTML**: HyperText Markup Language. Lenguaje de marcado para la elaboración de páginas web.
- **Hz**: hercio o hertz. Unidad de frecuencia.
- **INE**: Instituto Nacional de Estadística.
- **PPR**: photoparoxysmal response, respuesta fotoparoxística.
- **SDK**: Software Development Kit, Kit de desarrollo de software. Grupo de herramientas que permiten la programación de aplicaciones para dispositivos móviles.
- **TCP**: Transmission Control Protocol, protocolo de control de transmisión. Protocolo de red importante que permite que dos anfitriones (hosts) se conecten e intercambien flujos de datos.
- **vEEG**: vídeo-electroenfacelografía.
- **VR**: virtual reality. En español RV, realidad virtual.
- **XR**: extended reality, realidad extendida. Agrupación de las tecnologías inmersivas de realidad aumentada, virtual y mixta.

3.2. Definiciones

- **Algoritmo**: secuencia de pasos lógicos que permiten solucionar un problema.
- **Android**: sistema operativo para móviles.
- **Aprendizaje profundo**: una subcategoría del aprendizaje automático que hace uso de redes neuronales.

- **Arrastre:** aparición de actividad cerebral en regiones occipitales en relación temporal con el estímulo y a la misma frecuencia o a la de alguno de sus armónicos.
- **Artifacts:** señales registradas por el EEG pero no generadas por el cerebro.
- **Blueprint:** se refiere a las reproducciones en papel de un dibujo técnico, un plano cartográfico o un diseño de ingeniería.
- **Electrodo:** extremo de un conductor eléctrico que recibe una corriente eléctrica de un medio o que se la transfiere al mismo. En un EEG tienen forma de disco metálico.
- **Electroenfacelograma:** prueba que detecta la actividad eléctrica del cerebro.
- **Epilepsia:** trastorno del sistema nervioso central en el que la actividad cerebral se vuelve anormal, lo que provoca convulsiones o períodos de comportamientos o sensaciones inusuales y, a veces, pérdida de conciencia.
- **Epileptiforme:** Semejante a la epilepsia o a sus manifestaciones.
- **Estimulación con patrones:** estimulación luminosa que hace uso de patrones lumínicos, por ejemplo líneas horizontales o verticales.
- **Estimulación luminosa intermitente:** ELI/IPS. Pruebas específicas para detectar fotosensibilidad.
- **Estructura subcortical:** se refiere a las estructuras debajo de la corteza cerebral, entre la sustancia blanca, situándose cerca de la región lateral y ventral de los ventrículos laterales.
- **Experiencia sinérgica:** acción conjunta de varios órganos en la realización de una función.
- **Fotoparoxismo:** respuesta cerebral anormal durante la prueba de estimulación fótica intermitente.
- **Fotosensibilidad:** sensibilidad a la luz ultravioleta (UV) de la luz solar y otras fuentes de luz, ya sean naturales o artificiales.
- **Frame:** mínima imagen completa registrable para vídeo y televisión.
- **Hardware:** partes físicas y tangibles de un sistema informático, incluyendo sus componentes eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos.
- **Input:** entrada de información.
- **Inteligencia artificial:** Programa de computación diseñado para realizar determinadas operaciones que se consideran propias de la inteligencia humana, como el autoaprendizaje.

- **Interface:** conexión que se da de manera física y a nivel de utilidad entre dispositivos o sistemas.
- **Interfaz cerebro-computador:** tecnología que se basa en la adquisición de ondas cerebrales para luego ser procesadas e interpretadas por una máquina u ordenador.
- **Latencia:** tiempo que tarda en transmitirse un paquete dentro de la red.
- **Miotonía:** contracción muscular breve e involuntaria que afecta a un músculo o un grupo de músculos y ocasiona a veces un desplazamiento visible.
- **Neurofisiología:** rama de la fisiología que estudia el sistema nervioso.
- **Nits:** cantidad de luz que es capaz de emitir una pantalla. Candela por metro cuadrado.
- **Node:** entorno JavaScript de lado de servidor que utiliza un modelo asíncrono y dirigido por eventos.
- **Paroxismo:** fenómeno de comienzo y terminación brusca que irrumpe sobre el ritmo de base y que se suele presentar en los trazados epilépticos.
- **Plugin:** aplicación que se relaciona con otra para agregarle una función nueva.
- **Poligrafía:** captación una serie de reacciones fisiológicas como respuesta a un estímulo.
- **Prototipo:** primera versión desarrollada de un sistema.
- **Realidad aumentada:** conjunto de técnicas que permiten la aplicación de elementos virtuales sobre una representación de la realidad física.
- **Realidad virtual:** entorno de escenas u objetos simulados de apariencia real.
- **Shader:** pequeños scripts que contienen los algoritmos para calcular el color de cada píxel renderizado, en función de la entrada de iluminación.
- **Software:** conjunto de programas y rutinas que permiten a un ordenador realizar determinadas tareas.
- **Steam:** plataforma de distribución digital de videojuegos desarrollada por Valve Corporation.
- **Unity 3D:** motor de videojuego multiplataforma.
- **WebSockets:** tecnología que proporciona un canal de comunicación bidireccional y full-duplex sobre un único socket TCP.

4. Base teórica

Tal como se expuso en el apartado anterior, el objetivo de esta investigación es poder detectar si la realidad virtual, tanto contenidos como dispositivos, podría desencadenar respuestas fotosensibles por parte de los usuarios. Estamos haciendo frente a un período de cambios tanto medioambientables como tecnológicos que afectan a la sensibilidad visual, teniendo un mayor impacto en niños y adolescentes. Pero, ¿Qué significa que un niño sea fotosensible? ¿Es lo mismo fotosensibilidad que epilepsia fotosensible? ¿Cuál es el papel de la realidad virtual?.

En este apartado se dará respuesta a todas estas cuestiones clave en nuestra investigación, haciendo hincapié en los dos conceptos más importantes: la fotosensibilidad y los contenidos en realidad virtual.

4.1. Fotosensibilidad o epilepsia fotosensible

La epilepsia fotosensible es una afección que tiene una prevalencia estimada de 1,1 por 100.000 en la población general, teniendo un mayor impacto en niños y mujeres adolescentes, donde aumenta hasta un 5,7 por 100.000 [Ver+12]. Se trata de una forma rara de epilepsia refleja donde los ataques son producidos debido a estímulos visuales o cognitivos, al contrario que los ataques epilépticos comunes donde se producen sin razón aparente. Estos estímulos en su mayor parte están caracterizados por imágenes de colores intensos y brillantes, también con alto contraste.

Siguiendo esto, la fotosensibilidad se trata de una sensibilidad visual anormal que resulta en una respuesta foto-paroxística (PPR) del cerebro, es decir, una descarga epileptiforme cerebral producida por estímulos visuales. Está presente en al menos dos tercios de los pacientes que sufren epilepsia fotosensible [HEJ97], aunque también se ha detectado en individuos que no padecen este tipo de epilepsia o que nunca han padecido un ataque epiléptico, siendo sobre todo mujeres jóvenes y niños la población más susceptible a sufrir este tipo de respuestas cerebrales [Ver+12].

La diferencia entre estos dos términos es bastante importante en esta investigación. Queda claro que la fotosensibilidad es una afección que puede estar presente en cualquier individuo, padezca o no de algún tipo de epilepsia o epilepsia fotosensible en concreto. Dicho esto, ¿Cómo se detecta si una persona padece de fotosensibilidad?

La fotosensibilidad es un tipo de sensibilidad visual que se detecta mediante un electroenfacelograma (EEG) como una respuesta foto-paroxística (PPR) a estimulación luminosa intermitente (ELI) [Tat+18] [Tre19] [Ver+05]. Este tipo de respuestas tienen una mayor prevalencia en población de entre 7 y 19 años de edad, especialmente en el rango de 11-15 años [Ver+12], los cuales son también los mayores consumidores de tecnologías de la información. Los individuos fotosensibles generalmente no superan esta condición, y los que sí la superan lo

hacen normalmente entre los 20 y 40 años [Fer+21].

Aunque la forma más común de diagnosticar fotosensibilidad sea ELI, también se puede detectar haciendo uso de estimulaciones con patrones [Rub+04]. Este tipo de diagnóstico es útil para individuos especialmente sensibles a imágenes producidas por televisiones. Se trata de un método más específico que la ELI, donde los individuos sin historia de fotosensibilidad no son sensibles a ella, mientras que en el EEG un 5 % de ellos sí se vería afectado [Sil+21].

Los estímulos visuales con un alto contraste producen anomalías en los datos recogidos por un EEG en pacientes que padecen de fotosensibilidad [HTW17]. Esto significa que, cuando el cerebro está funcionando de forma normal se genera un ritmo regular de pulsos eléctricos, el cual se ve afectado cuando la persona es fotosensible. Las PPR aparecen en el EEG como pequeñas y repentinas ráfagas de actividad cerebral, interpretadas neurofisiológicamente como una descarga neuronal excesiva que se limita dentro de la estructura subcortical del cerebro. Experimentar PPRs no determina sufrir convulsiones epilépticas en situaciones cotidianas [Fer+21], es decir, si un niño refleja PPRs en las lecturas del EEG se considera que es fotosensible, pero en raras ocasiones significa que va a desencadenar epilepsia fotosensible.

Entre los estímulos luminosos se destacan los mencionados anteriormente (luces brillantes, con alto contraste y colores vivos) y también patrones oscilatorios, alteraciones del color y los cambios repentinos de brillo [WAI75]. Todos estos presentan un riesgo importante de producir fotosensibilidad mientras se consumen contenidos multimedia. En cuanto a los colores, tonos combinados de rojo y azul son más provocadores que la combinación de rojos y verdes [WBD80]; y una luz roja brillante producida en longitudes de onda largas es más probable que aumente el riesgo de sufrir una convulsión [TT76] [Cov05].

En cuanto a la frecuencia a la que se producen estos estímulos, destaca el rango entre 3-30Hz [CS21], lo cual es el equivalente a un monitor de ordenador que funciona a una frecuencia de 50-60Hz de refresco, que es el más común en las videoconsolas a día de hoy. Adentrándonos en el mundo de los videojuegos, el riesgo de ataque epiléptico es más común en hombres que en mujeres, e incluso se consideró que los patrones en los contenidos multimedia de los juegos eran más importantes que la distancia al dispositivo a la hora de provocar reacciones fotosensibles [Kas+99].

También es importante tener en cuenta factores no fóticos como son la fatiga, cansancio, la privación del sueño y la excitación, los cuales facilitan también la ocurrencia de PPRs [Cov05].

Teniendo dispositivos como las televisiones de plasma, monitores de ordenador y los videojuegos como factores de riesgo para personas fotosensibles [Fer+21], la realidad virtual goza de especial consideración. En este tipo de tecnología se mezclan factores como los videojuegos, el contenido inmersivo total sin distancias y las pantallas de reproducción, donde los estímulos visuales se

multiplican para el usuario. Esto da pie a considerarla como un riesgo nuevo a tener en cuenta.

4.2. Pruebas de estimulación luminosa intermitente

Tal y como se mencionó en el apartado anterior, la forma de detectar la fotosensibilidad es a través de una prueba de estimulación luminosa intermitente, conocida en español por las siglas ELI (IPS). El objetivo de estas pruebas es determinar la susceptibilidad de sufrir una crisis causada por luces intermitentes, cuantificar el grado de fotosensibilidad o asociar algún tipo de síndrome epiléptico relacionado [Rub+04].



Figura 2: Simulación de una prueba ELI/IPS en el Hospital Universitario de Burgos.

Durante esta prueba el paciente experimenta una serie de estimulaciones haciendo uso de un foco que trabaja en unas frecuencias de entre 1 y 50Hz, colocado a una distancia de 30cm de la cara (ver figura 2). Se llevan a cabo en un ambiente poco iluminado. Para detectar cualquier respuesta anómala se hace uso de un electroencefalograma (EEG), que registra la actividad eléctrica cerebral producida por las neuronas en la corteza cerebral. Normalmente, el EEG suele utilizarse asociado a un registro simultáneo de vídeo (VEEG) (ver

figura 3) que aporta más información sobre la situación del paciente durante la prueba y permite interrumpir la estimulación si se produce cualquier tipo de crisis. El tener el fotoestimulador a una distancia tan mínima del rostro permite al médico responsable poder detectar fenómenos clínicos sutiles como por ejemplo miotonía de los párpados [Neu].

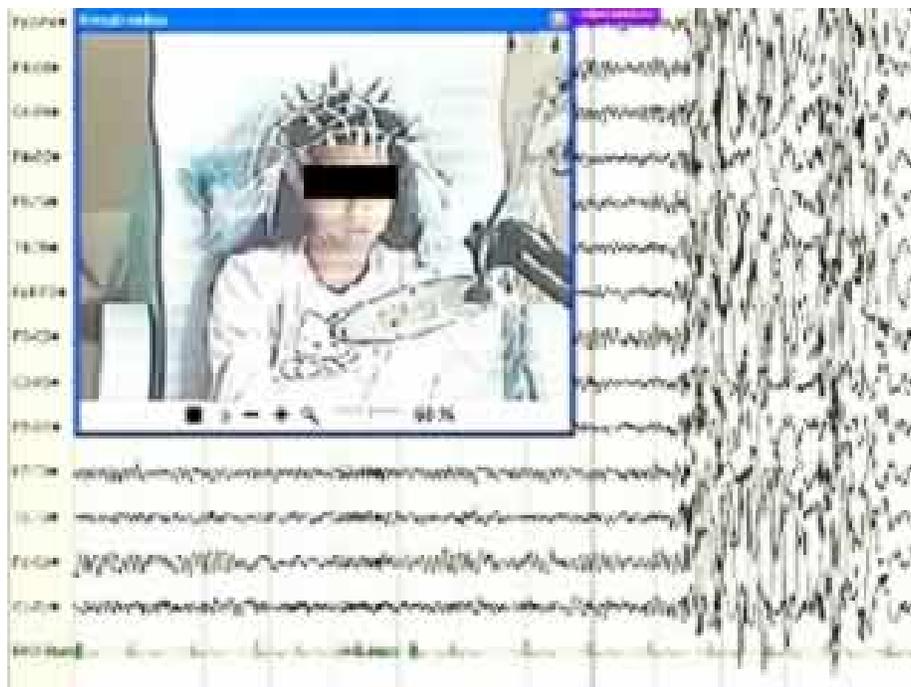


Figura 3: Escenario de prueba ELI con VEEG que muestra picos a los 20Hz [Vin14].

La secuencia de las luces intermitentes se establece en una fase de estimulación que dura unos 7 segundos, seguida de un período de descanso de 10 segundos. Durante la secuencia de estimulación el paciente debe mantener los ojos abiertos durante la primera mitad del tiempo mirando directamente a la luz. La siguiente mitad debe mantener los ojos cerrados.

Se conoce para este caso como respuesta anómala las denominadas respuestas fotoparoxísticas (PPR) (ver figura 4). De forma general un paroxismo epiléptico se expresa con una electronegatividad, es decir, una deflexión hacia arriba en el EEG en el electrodo más activo cuando este está en primera posición del canal registrado. La morfología suele ser de "punta" (menos de 70 ms). No obstante, puede presentarse de infinitas formas dado que cada cerebro responde de diferente manera y también hay otros factores a tener en cuenta, como si el paciente está bajo tratamiento antiepiléptico o el nivel de cansancio. A día de hoy hay

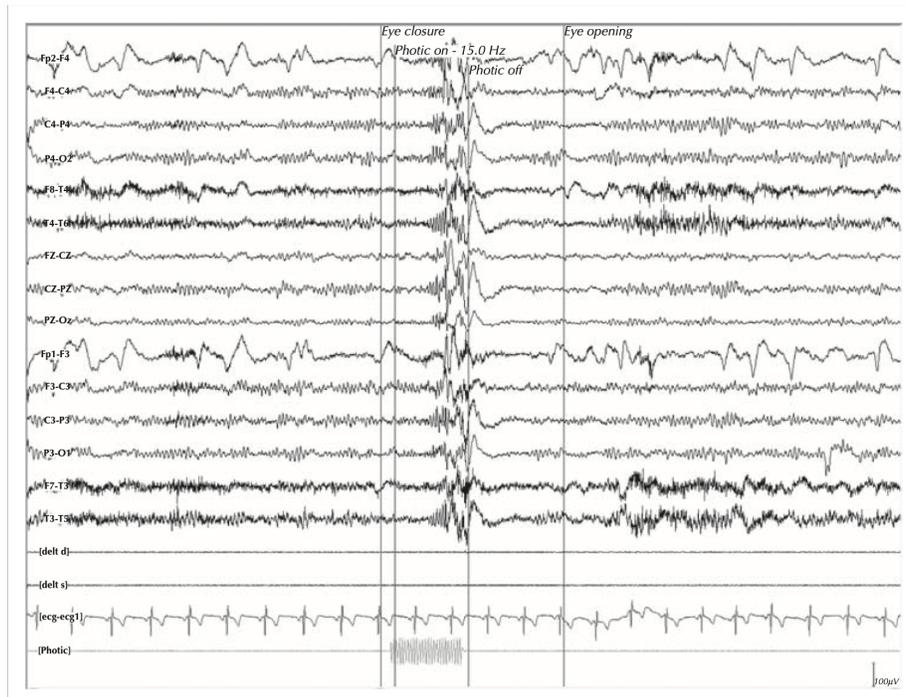


Figura 4: PPR ocurrida durante una prueba de estimulación luminosa intermitente [Ver+12] a 15Hz.

descritos cuatro patrones de respuesta foto-paroxística frente a la ELI [WCD92]:

- Tipo I: Puntas en regiones occipitales.
- Tipo II: Puntas parieto-occipitales con onda lenta bifásica.
- Tipo III: Puntas parieto-occipitales bifásicas con onda lenta bifásica y difusión a regiones frontales.
- Tipo IV: Puntas generalizada-onda lenta o polipunta-onda lenta.

En caso de que se produzca alguna de estas respuestas anómalas, la estimulación debería interrumpirse.

Las características técnicas del fotoestimulador están establecidas, siendo necesario que la intensidad de la luz sea alta y no varíe según se aumenta o disminuye la frecuencia de estimulación. Son las siguientes [Rub+04]:

- Intensidad máxima de 100 nits-s por flash, al menos 0.7 julios.
- Campo de diámetro circular.

- Lámpara de descarga de xenón.
- Difusor granular y carcasa para el foco/reflector.
- Punto de fijación centrada en el difusor.
- No hay patrón o rejilla en el fotoestimulador, pero se puede insertar.
- Se pueden insertar patrones delante del difusor según sea necesario.
- Capacidad de emitir un flash de 1 a 60 Hz en una intensidad constante.

4.3. Realidad Virtual

Las televisiones de plasma y los monitores de ordenador funcionan en frecuencias de refresco que son consideradas como provocadores de epilepsia fotosensible [CS21], y aunque la frecuencia de refresco a día de hoy sea bastante menos provocativa que las de televisiones antiguas, los contenidos que muestran estos dispositivos son igual de importantes, tal y como se comentó en el apartado anterior.

Dentro de la generación de nuevas tecnologías, la realidad virtual podría ser la que más atención capta. A día de hoy se trata de la tecnología del futuro, que se está popularizando en todos los sectores desde industria hasta medicina. Su uso combinado con la realidad aumentada se ha adentrado hasta las salas de operaciones en hospitales, donde provee a médicos de acceso intraoperativo en manos libres a datos complejos ayudando en la toma de decisiones [Tep+17]. Esto no se podía pensar hace casi 50 años, cuando surgió la idea del concepto de realidad virtual. Tras esto, concretamente en la década de los 90, se comenzaron a publicar artículos y encuestas realizadas a la industria sobre el uso de esta nueva tecnología, pero aún estaba en fases de iniciación [Bro99].

Concretamente la realidad virtual es un tipo de tecnología informática inmersiva que da al usuario un modo único de interacción con un entorno virtual. Con el paso de los años han surgido diferentes dispositivos para ofrecer al consumidor una experiencia sinérgica en este tipo de escenarios. Las gafas de realidad virtual, también conocidas como HMD (head-mounted displays), se dividen en dos tipos: con pantalla integrada y carcasas para el teléfono móvil, siguiendo todas más o menos la misma mecánica (ver figura 5).

Las primeras poseen lentes binoculares formadas por cristales y espejos incrustados que minimizan las unidades de visualización usando tubos de rayos catódicos (CRT), pantallas de cristal líquido (LCD), cristal líquido sobre silicio (LCos) o diodos orgánicos emisores de luz (OLED). Ejemplos de estas serían las famosas Rift S o Quest 2 de la empresa Oculus, las más usadas en el sector de los videojuegos, que usan pantallas LCD con una tasa de refresco máxima de 80Hz y 90Hz respectivamente. Por otro lado, los HDM de bajo coste usan como pantalla los teléfonos móviles, que normalmente funcionan a frecuencias

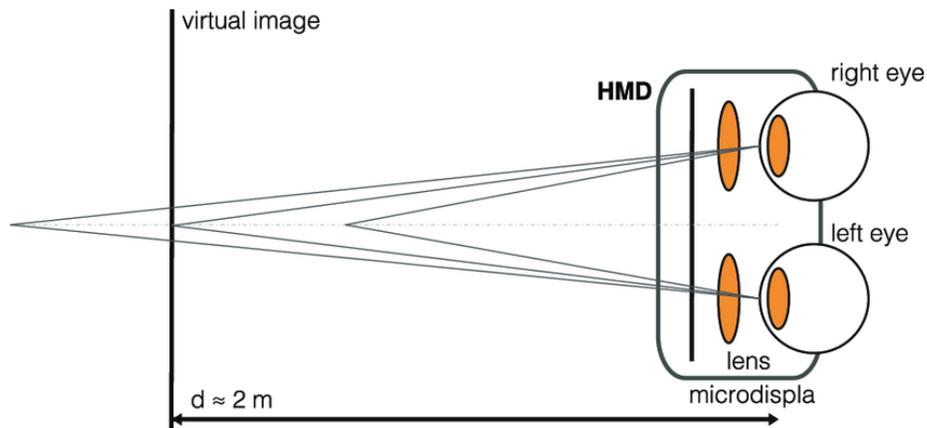


Figura 5: Ilustración del funcionamiento de un HMD simple.

de entre 90-120Hz, ofreciendo experiencias menos inmersivas.

Aunque en general el uso de HMD no producía efectos potencialmente perjudiciales para el sistema visual en comparación con los monitores de ordenador [Pel98], el uso de este tipo de dispositivos de realidad virtual implica una mayor estimulación en el campo visual y a nivel sensorial, lo cual está demostrado que incrementa el riesgo de padecer fotosensibilidad [Fer+21]. Los fabricantes de HMD y las compañías de videojuegos ya advierten del potencial que sus productos tienen para desencadenar ataques epilépticos, crisis y fotosensibilidad.

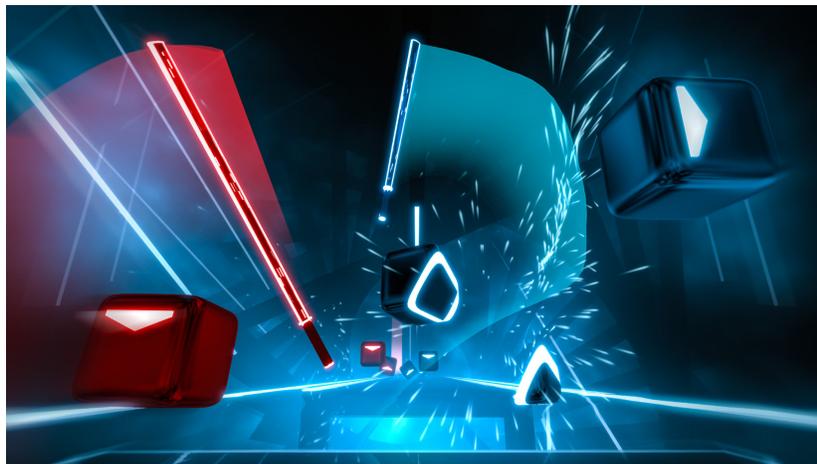


Figura 6: Escena del juego de RV llamado Beat Saber.

Esto es importante sobretodo de cara al contenido que se comercializa para los dispositivos RV, el cual también puede contener patrones provocadores de fotosensibilidad. Uno de los videojuegos para RV más famosos en este momento es el llamado "Beat Saber"[Gam], el cual en el año 2019 superó el millón de copias vendidas a nivel mundial. Este videojuego consiste en realizar cortes a objetos al ritmo de la música usando sables de luz, donde el jugador se encuentra en una base con un fondo completamente negro y los objetos y decoración del fondo aparecen en colores vivos. La combinación por defecto no es otra que rojo y azul, aunque dando al jugador la opción de realizar sus propias configuraciones customizadas (ver figura 6). Este tipo de contenidos son el ejemplo claro del riesgo existente para los consumidores de padecer alguna reacción fotosensible mientras hacen uso de estos famosos videojuegos.

Aun así, se desconocen muchos factores sobre el alcance de este problema y la probabilidad de que las características específicas de los escenarios de realidad virtual sean desencadenantes de respuestas foto-paroxísticas (PPR).

5. Solución propuesta: VR-Photosense

VR-Photosense es un software diseñado para detectar respuestas foto-paroxísticas mientras se hace uso de un HMD y realidad virtual. Como se ha mencionado en el apartado anterior, las luces intermitentes son uno de los principales provocadores de respuestas fotosensibles. VR-Photosense ofrece este tipo de escenario, junto con técnicas usadas en la estimulación luminosa intermitente (ELI) real como son la estimulación en distintas frecuencias y usando diferentes secuencias. El principal objetivo del desarrollo de este software es simular las pruebas ELI convencionales pero en un entorno de realidad virtual, tomando mediciones para determinar si esta tecnología es capaz de producir respuestas fotosensibles en el cerebro.

El sistema se divide en dos partes: el software de estimulación luminosa y la monitorización.

5.1. Software de estimulación luminosa

El software de estimulación luminosa se ha implementado en Unity 3D usando el lenguaje C#. Unity es un motor de videojuegos que permite desarrollar escenas a través de una interfaz gráfica y la programación se realiza via scripting. Los scripts están asociados a los objetos incluidos en la escena para que se comporten de la manera deseada.

Una de las ventajas de desarrollar con Unity es que hace que el software sea multiplataforma y, por lo tanto, el proyecto puede ser fácilmente exportado para su uso con diferentes hardware, desde los HMD de bajo coste que utilizan los teléfonos inteligentes hasta las tecnologías de alta gama como Oculus VR [Yao+14], que se utilizará en la siguiente etapa de creación de prototipos y pruebas de software.

Atendiendo a las necesidades expresadas por la cotutora del proyecto y neurofisióloga, las funcionalidades iniciales del software para simular una ELI son las que siguen. Se puede ver más en detalle toda la especificación de requisitos en el Anexo IV 12.4.

- El sistema incluye un foco de luz que parpadea en secuencias de 7 segundos de estimulación y 10 de descanso.
- La escena produce el mayor contraste posible, el fondo es negro y la luz blanca.
- Las frecuencias de parpadeo oscilan de los 2Hz a los 50Hz, aumentando 2Hz cada secuencia de estimulación. Traducido esto en segundos, la luz parpadea en intervalos de 1/Hz segundos por secuencia de estimulación.
- La estimulación se puede pausar en caso de que el médico neurofisiólogo lo considere oportuno. También puede reanudarse en la misma frecuencia y secuencia.

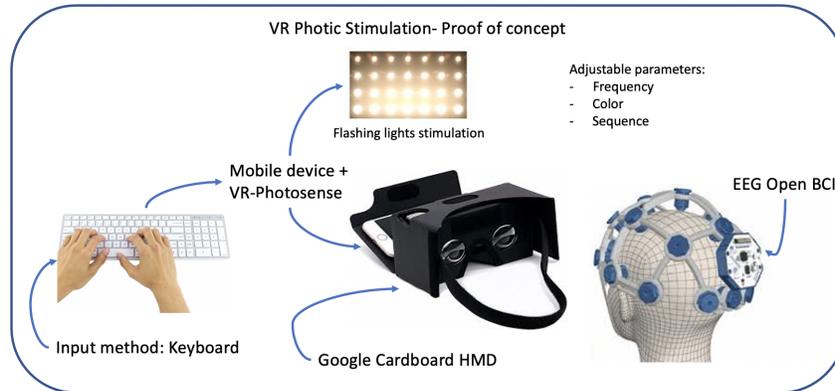


Figura 7: VR-Photosense prototype based on functionally expressed by neurophysiologist.

- Se incluye la posibilidad de resetear la estimulación haciendo que vuelva a comenzar la secuencia a 2Hz.
- Existen dos patrones de estimulación, ascendente y descendente. La ascendente trabaja en el rango 2-50Hz y la descendente en 50-2Hz.
- La frecuencia de estimulación puede aumentarse en 2Hz en cualquier momento.

Como novedad a la ELI convencional, se ha incluido la posibilidad de cambiar el color de la luz, pudiendo de esta manera trabajar con combinaciones de colores más provocativas como es la rojo-azul. La escena puede cambiarse a esta configuración, haciendo que la estimulación sea con el fondo azul y la luz parpadeante en rojo intenso. De la misma manera, la luz puede volverse a poner en la configuración por defecto negro-blanco.

Los assets incluidos en el proyecto se dividen según se muestra en la figura 8. Para más información al respecto, ver sección 12.3:

- Controls: script autogenerado e input system. Se ha empleado el nuevo InputSystem 1.0.2 de Unity el cual permite introducir los inputs deseados a través de una interfaz, generando automáticamente un script asociado haciendo que su acceso desde otros scripts sea más directo y cómodo. Se pueden introducir diferentes inputs desde dispositivos diferentes para una misma acción. De esta manera facilita y hace más inminente la configuración y la compatibilidad con diferentes tipos de hardware de entrada.

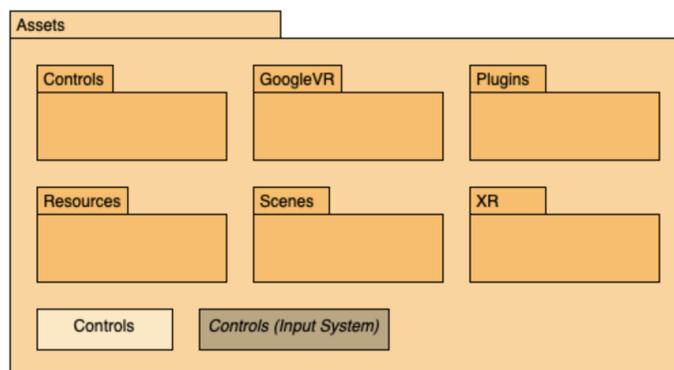


Figura 8: Diagrama de paquetes contenidos en el proyecto.

- GoogleVR: se trata de un SDK para Android que permite la creación de aplicaciones de realidad virtual usadas con Google Cardboard HMD.
- Plugins: aquí se incluyen los plugins Android para poder exportar aplicaciones para estos dispositivos.
- Resources: todos los scripts desarrollados para la iluminación y conexión con la parte de monitorización. También se incluyen los shaders y materiales usados en la escena.
- Scenes: escena de realidad virtual. (ver Figura 9)
- XR: configuración por defecto de Unity.

La escena desarrollada dispone de cuatro objetos o GameObjects: cámara, dos focos (Point Lights) y una esfera (ver figura 9). El objetivo de la esfera es proporcionar un fondo negro, situando la cámara dentro de esta e invirtiendo las normales, evitando de esta manera que transparente. Este proceso de inversión se realiza incluyendo un shader personalizado a un material nuevo asignándolo a la esfera (ver shader y material Resources/shaders/FlipNormals³⁷). En cuanto a los focos, uno de ellos es el principal de luz blanca y el otro proporciona un fondo azul para una combinación de colores explicada más adelante.

Al foco de luz blanca se le ha asociado el script Flash (ver script Resources/scripts/Flash). Este script es el principal que implementa todas las funcionalidades propias de la ELI convencional añadiendo la nueva prestación de combinación de color. Contiene toda la programación necesaria en cuanto al proceso de estimulación, se asocia cada input definido en Controls con su acción correspondiente y se abre comunicación con el servidor. De esta manera cuando la escena se inicializa y carga este componente, se abre comunicación con el servidor de monitorización y se cargan todos los inputs. A través de este

mismo script también se enciende y apaga la luz azul dependiendo del tipo de configuración establecida.

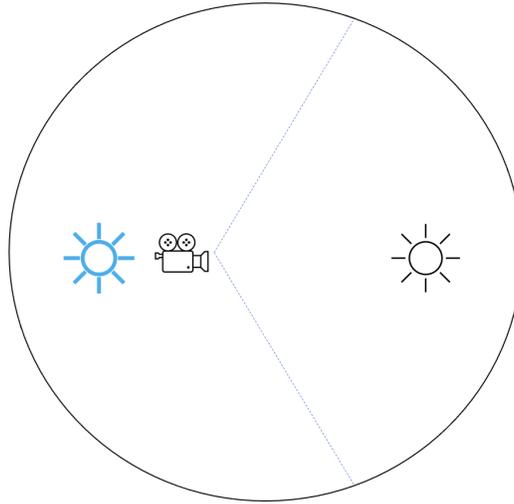


Figura 9: Diagrama de la escena implementada en Unity 3D

El script denominado ScreenTime está asociado con la esfera, evitando que la pantalla del teléfono entre en suspensión por no interactuar con él, en caso de que el dispositivo tenga esa configuración.

Todos los scripts desarrollados derivan de la clase integrada MonoBehaviour, dado que Unity usa una implementación del tiempo de ejecución Mono estándar. Estas clases son consideradas blueprints y cada vez que se asocian a un GameObject, se crea una nueva instancia del objeto definido por dicha blueprint. En ellas, se predefinen dos métodos: Start y Update. En este caso solamente se emplea el Start, que será llamada por Unity al cargar la escena.

También es importante notar el uso de corrutinas. Las corrutinas son funciones que permiten pausar y reanudar la ejecución en el frame en el que se pausó. En este caso se usan para implementar el efecto de parpadeo en las luces y las secuencias de estimulación.

En cuanto al sistema de input se valoraron dos opciones: mando a distancia y teclado. Viendo la cantidad de parámetros configurables y las acciones controladas a realizar por el responsable de la estimulación, el uso de únicamente un mando a distancia VR se consideró insuficiente. Atendiendo también al usuario final y la tecnología que usa de forma diaria se planteó el uso de un teclado bluetooth. De esta manera optamos a más configuraciones y los comandos serán establecidos según estos expertos consideren más cómodo para realizar la simu-

lación de la manera más eficiente posible. No obstante, con el objetivo de poder habilitar el uso del simulador para las gafas Oculus Quest 2, se ha introducido también esta configuración para los dos mandos a distancia asociados a este HMD. Finalmente, la lista de comandos establecidos es según se muestra en la tabla 1.

Lista de comandos		
Acción	Comando (Teclado)	Comando (Quest 2)
Start	Enter	right trigger
Pausa	Barra espaciadora	right grip
Reset	Backspace	secondary touched (R)
Aumentar herzios	Numpad +	primary touched (R)
Luz blanca	B	start (L)
Luz azul	A	left grip
Combinación rojo-azul	R	left trigger
Patron ascendente	Flecha arriba	primary touched (L)
Patron descendente	Flecha abajo	secondary touched (L)
Salir	Escape	start (R)

Tabla 1: Lista de comandos

5.2. Monitorización

Además de simular el entorno de ELI, se considera necesario poder ver lo que ocurre dentro de la escena durante las pruebas. Para abordar este problema se añadió al sistema una parte de monitorización, a través de la cual se pueda ver la evolución de las secuencias y los comandos introducidos por el usuario. Valorando las condiciones del entorno y las posibilidades actuales, se optó por habilitar una página web que permitiese al responsable ver en tiempo real lo que está sucediendo en la simulación. La página web donde se encuentra desplegado es <https://vrphotosense.herokuapp.com>.

También se valoró el implementar un sistema de sonido que comunicase a través de audio la situación, pero se consideró menos eficiente al ser volátil y no disponer de un registro visual de la simulación.

Como solución a este problema se presenta un sistema basado en WebSockets, lo cual permite tener una comunicación en tiempo real y rápida entre la aplicación móvil y la página web sin necesidad de hacer uso de una base de datos. El funcionamiento deseado es el que se establece en la figura 10. El cliente

1, la aplicación móvil, enviará información sobre la simulación al servidor, y este la pasará al cliente 2, la página web, que lo mostrará por pantalla junto con un código horario.

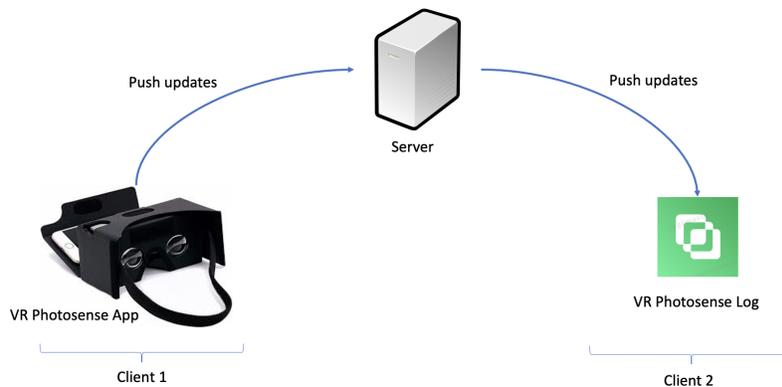


Figura 10: Esquema del funcionamiento teórico del sistema

WebSocket es un protocolo que proporciona comunicación bi-direccional y duplex completo sobre un único socket TCP. El entorno en el que se usa la aplicación VR-Photosense es uno bastante sensible al tratarse de pruebas médicas, y se necesita que la información recibida en el registro sea lo más rápido posible. Los WebSockets son probablemente el protocolo más popular para este tipo de casos de uso donde los datos necesitan ser enviados en tiempo real. Como hemos visto antes Unity se basa en la plataforma Mono como motor de scripting, lo que quiere decir que trabaja en .NET (C#). Este framework proporciona por defecto soporte para este protocolo que también está soportado por Mono, a través del namespace `System.Net.WebSockets`. El funcionamiento en este caso sería el representado en la figura 11.

Se han desarrollado en Unity dos scripts para habilitar su funcionamiento como cliente Stimulation. El script `WSClient` hace uso del namespace mencionado anteriormente para instanciar el cliente e implementar los métodos de conexión y envío de datos al servidor. Para establecer la conexión con el servidor se usa un método asíncrono de la clase `Task` obtenida de `System.Threading`. Para este caso solo se ha implementado el método asíncrono de envío de datos porque no se va a recibir ninguna información por parte del servidor. Por otro lado, el script `WSCommunication` es el encargado de establecer la conexión con el servidor haciendo uso de los métodos ya definidos en el script anterior. Será la clase que se use desde el script `Flash` para abrir la comunicación y enviar la información pertinente, dado que este script es el único asignado a un objeto (ver figura 12).

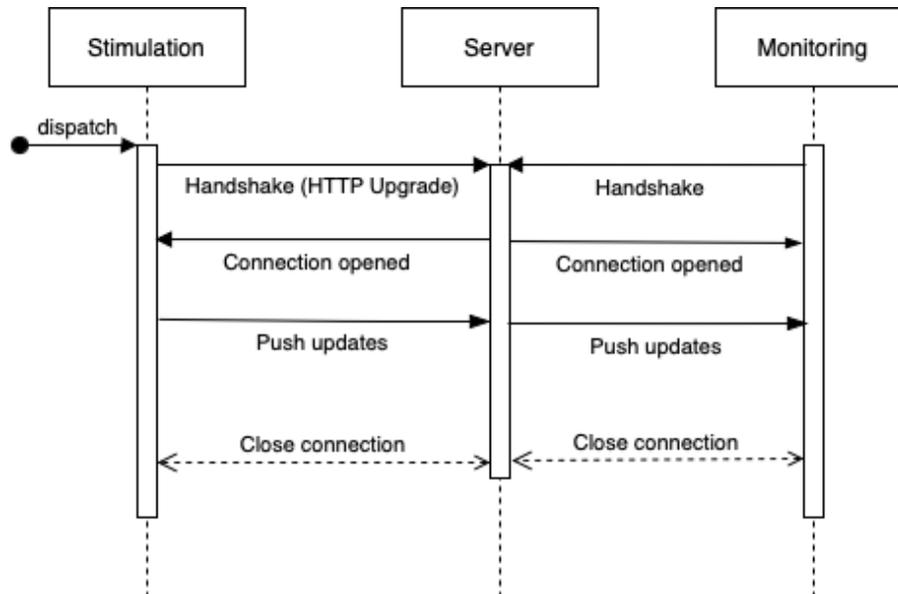


Figura 11: Diagrama de secuencia del sistema completo usando websockets



Figura 12: Diagrama de clases del cliente Stimulation

El servidor se ha desarrollado usando Node. Es un servidor simple que recibe la información del cliente y la devuelve. En este caso, en Unity no se hace nada con la información devuelta, sino que es el cliente Monitoring el que hace uso de esta información. Este cliente es una página HTML que se conecta al servidor, abre una conexión, obtiene los mensajes que llegan del servidor que forman parte de un mensaje y los muestra en la pantalla. Este cliente se ha implementado de la forma más sencilla posible dado que es un añadido al trabajo principal y su presencia en cuanto a diseño no es relevante para el personal médico responsable.

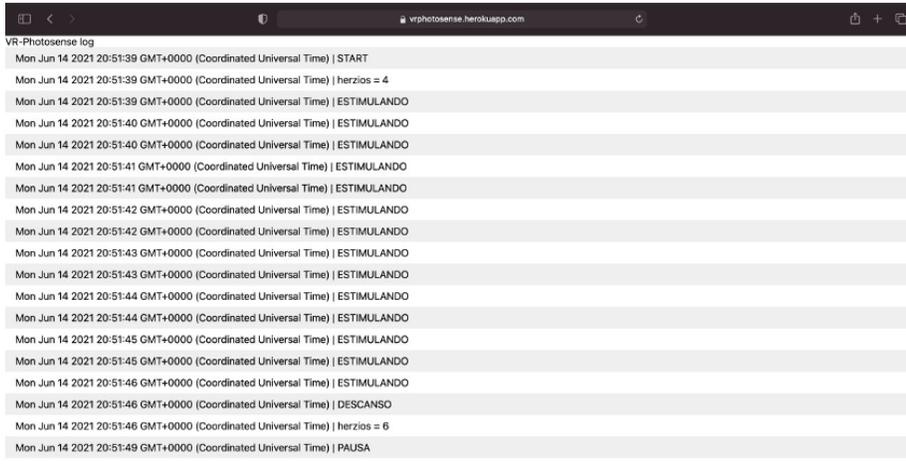


Figura 13: Visualización de la información desde la web

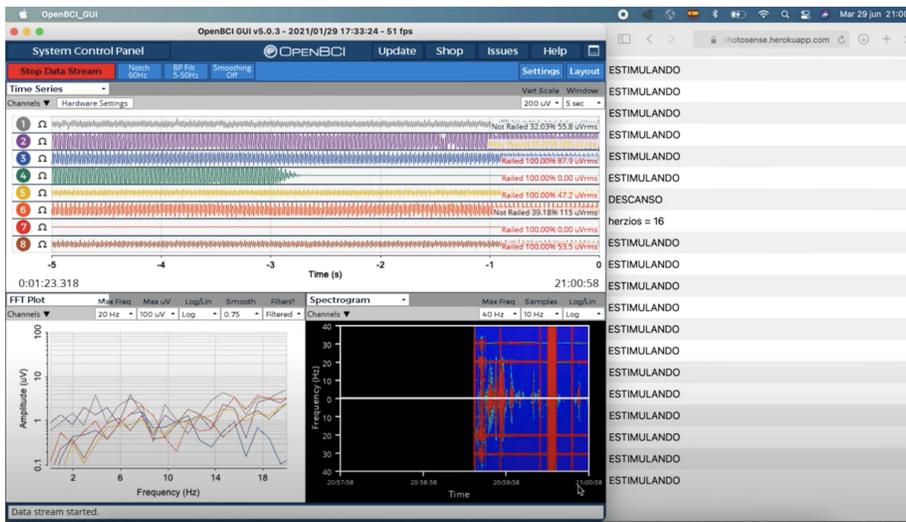


Figura 14: Monitorización de VR-Photosense y vista del resgitro del EEG OpenBCI.

6. Método

Para poder determinar si la Realidad Virtual tiene impacto en personas fotosensibles, se lleva a cabo una prueba de estimulación luminosa intermitente haciendo uso del prototipo VR-Photosense.

Como punto de partida, la respuesta más sencilla de buscar en un registro de EEG es la conocida como arrastre. Se trata de una respuesta fisiológica común a estímulos luminosos durante una ELI, que es provocada por una estimulación fótica intermitente de la retina que puede ser detectada en el ritmo alfa [Wal+44]. Consiste en una actividad cerebral que se ajusta al tiempo y a la misma frecuencia o a una frecuencia armónica de los estímulos de la luz intermitente [EP14] (ver figura 15). Suele ser mayor cuando la estimulación luminosa se aproxima al ritmo alfa del paciente.

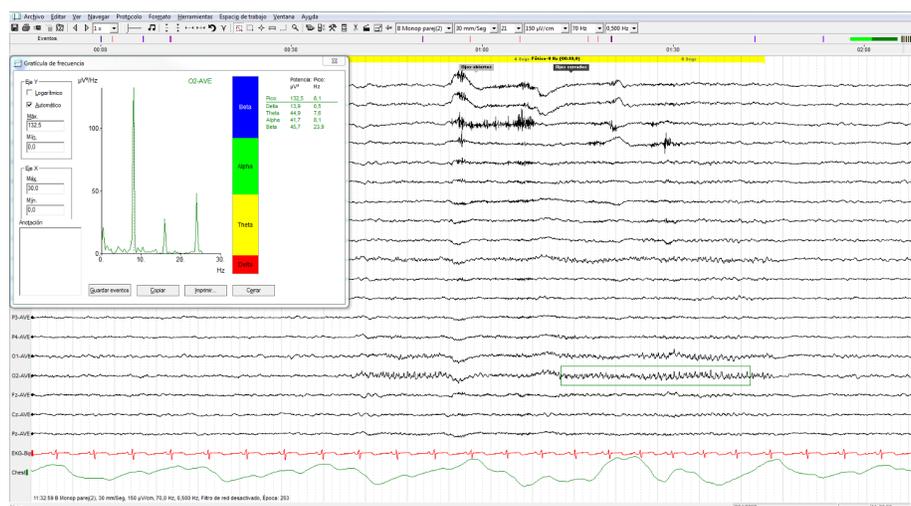


Figura 15: Montaje común. Respuesta de arrastre en las regiones occipitales, a la frecuencia del flash (8Hz) y a las frecuencias armónicas de 16Hz y 24HZ.

En esta recopilación inicial de datos, pretendemos comprender y proporcionar una primera evaluación estadística de las métricas del EEG relacionadas con el uso de nuestro software de ELI basado en RV. Para esta fase preliminar se realizarán una serie de pruebas con el software sobre sujetos que no padecen fotosensibilidad diagnosticada en un entorno menos profesional. El fenómeno de arrastre puede darse en algunas personas y otras no, no obstante, durante una visita al Hospital de Burgos disponemos de resultados realizados con un fotoestimulador convencional de al menos dos personas de nuestro equipo que manifiestan este tipo de respuesta. Una vez que esta herramienta esté adecuadamente probada y refinada, se requiere la realización de un estudio clínico para validar la funcionalidad completa de VR-Photosense y su valor clínico cuando

se realicen pruebas de detección de PPRs.

Este estudio se realizará a pacientes que padecen algún tipo de fotosensibilidad diagnosticada, estimando una muestra de unos 50 sujetos. Los participantes serán seleccionados por la doctora Beatriz García López (cotutora de este proyecto) de entre aquellos que han pasado por su servicio, incluyendo algunos nuevos. Para la realización de las pruebas se empleará la sala y maquinaria que el servicio de Neurofisiología Clínica del Hospital de Burgos emplea para la realización de EEGs (sala 7, 6 y 5 del servicio de Neurofisiología Clínica así como registros portátiles realizados a pacientes ingresados que así lo requieran).

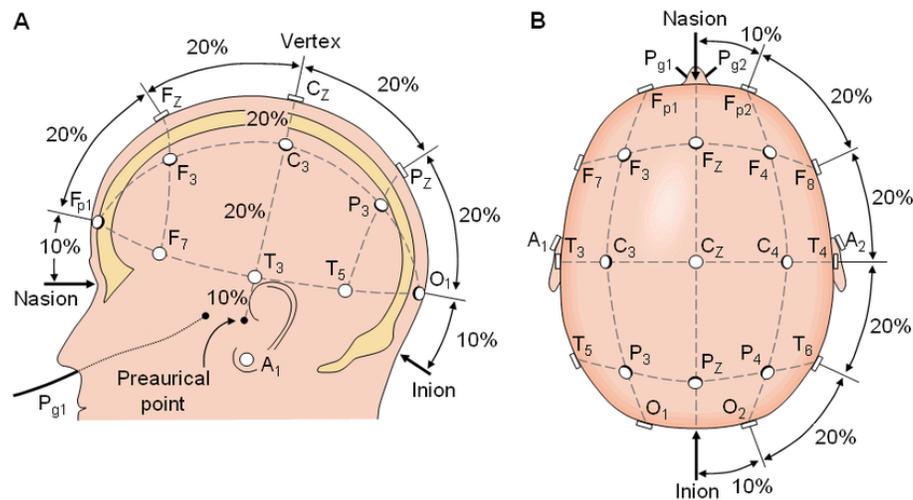


Figura 16: Registro de canales 10-20 de un electroencefalograma EEG [NGB10].

Para el análisis posterior se usarán todos los datos propios de un EEG, un registro de canales según el sistema internacional 10-20 con datos de poligrafía accesoria si se considera pertinente (ver figura 16), a partir de los cuales se podrá determinar la ocurrencia de PPRs u otros tipos de respuestas cerebrales.

6.1. Estimulación luminosa con VR-Photosense

Con todo lo definido anteriormente, VR-Photosense ha sido diseñado para facilitar el proceso a los neurotecnólogos mientras realizan pruebas de fotosensibilidad en el laboratorio utilizando EEG y pantallas de ordenador para seguir los resultados y la simulación de realidad virtual en tiempo real. Todas las configuraciones se realizan con el teclado, ya que resulta más familiar que el uso de los mandos a distancia y, además, ofrece una gama más amplia de opciones.

La interfaz de RV para el estudio clínico estará formada por un dispositivo móvil Oppo A72 insertado en unas gafas de realidad virtual tipo Google Cardboard de la marca LEHONG. En el dispositivo móvil se proyectará la estimulación luminosa intermitente. Se empleará un teclado inalámbrico con conexión Bluetooth al teléfono móvil que permitirá detener, pausar y controlar los parámetros de la fotoestimulación RV en cualquier momento que se desee, con solo pulsar una tecla.

También será probado haciendo uso del dispositivo Oculus Quest 2, que serán usadas durante las pruebas de verificación con arrastre. En este caso el input será a través de los mandos a distancia propios de las gafas.

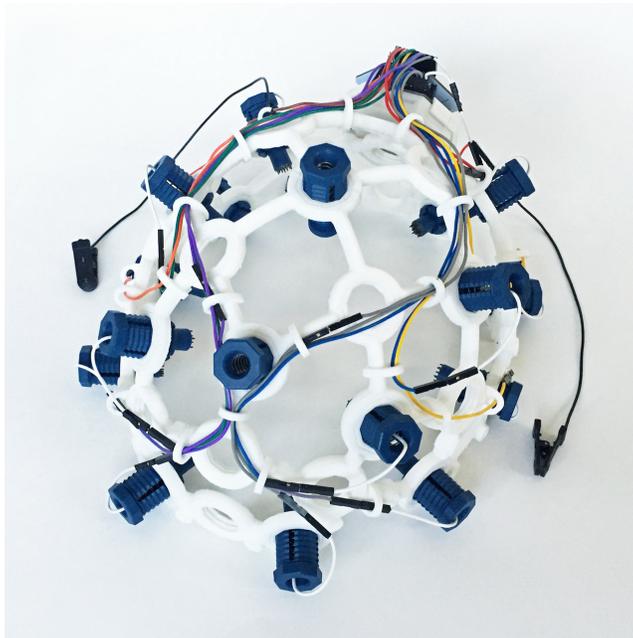
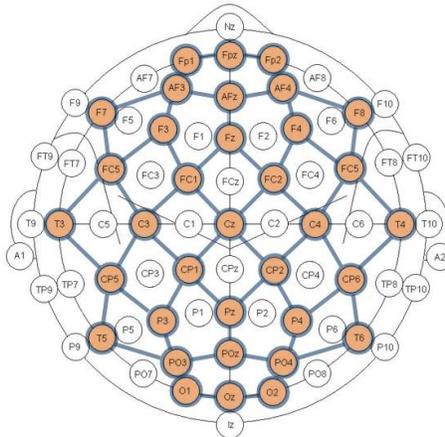


Figura 17: Ultracortex Mark IV de Open BCI

La configuración para las pruebas es sencilla. Tras descargar e iniciar la aplicación en un dispositivo Android, se inserta en el dispositivo y se coloca en la cabeza del paciente, fijando las correas adaptables. Posteriormente se le pondrá al paciente el electroenfacelograma elegido. En el caso de las pruebas realizadas en el Hospital de Burgos, se usará un electroenfacelograma convencional de la marca NATUS. Por otro lado, para las pruebas de arrastre se hará uso de una interfaz cerebro-computador de código abierto conocida como Open BCI [BCI], en concreto el modelo impreso en 3D Ultracortex Mark IV (ver figura 17).

Este modelo también se basa en el sistema internacional 10-20 para la colocación de los electrodos (ver figura 18), pero a diferencia del usado en el Hospital

Ultracortex Mark IV Node Locations (35 total)



Based on the internationally accepted **10-20 System**
for electrode placement in the context of EEG research

Figura 18: Colocación de los electrodos en el modelo Ultracortex Mark IV de OpenBCI según el sistema 10-20.

de Burgos, es en seco. Para estos últimos es necesario el uso de gel de contacto para la colocación de los electrodos en el paciente.

Con todo esto, la situación del paciente sería la que se ve en la figura 19. A partir de este punto, el neurotecnólogo será capaz de comenzar, pausar y reanudar la estimulación según los datos que vayan apareciendo en el registro. También podrá evaluar los diferentes colores y aumentar la frecuencia a su gusto, eligiendo entre un patrón descendente o ascendente.



Figura 19: VR-Photosnse set-up para pruebas de estimulación luminosa intermitente.

7. Evaluación y resultados

Con el objetivo de realizar un primer análisis de viabilidad de VR-Photosense, se han llevado a cabo pruebas realizadas por nuestro equipo empleando tanto el EEG de OpenBCI como el equipo profesional usado en el Hospital de Burgos. Teniendo en cuenta la sensibilidad de las pruebas de estimulación luminosa intermitente, nos hemos asegurado que ninguno de los sujetos padece ningún tipo de trastorno epiléptico o fotosensibilidad, siendo desarrolladas en personas sanas.

En una primera instancia se ha usado el dispositivo OpenBCI, donde únicamente se han realizado unas pruebas de estimulación en formato ascendente (2Hz,4Hz,6Hz,8Hz...22Hz) de pocos minutos de duración. El objetivo de este paso era poder llevar a cabo la grabación del registro obtenido por el dispositivo mientras se evalúa la disposición y comodidad del set-up tanto para el sujeto como para el responsable de la prueba. Esta prueba preliminar se puede ver en [Mara] y [Marb].

Posteriormente, se ha desarrollado una prueba completa a un sujeto sano voluntario con previa autorización, haciendo uso del equipo profesional y un HMD de bajo costo según lo especificado en el apartado anterior. Durante esta prueba se ha logrado detectar la respuesta de arrastre, donde se puede observar claramente que el ritmo alfa posee un pico en los 9.8Hz mientras se realiza la estimulación fótica a 10Hz.

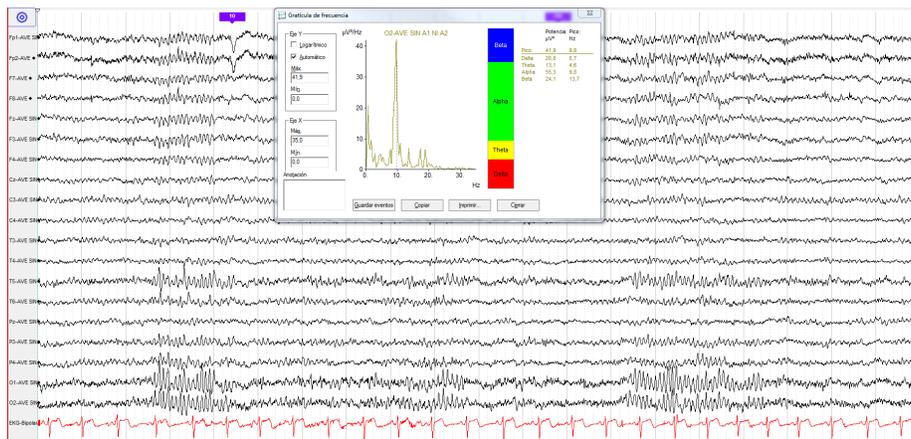


Figura 20: Respuesta de arrastre detectada en el ritmo alfa a una frecuencia de estimulación de 10Hz con VR-Photosense.

Esta evaluación del sistema llevada a cabo por la neurofisióloga del equipo ha servido para determinar que el sistema es capaz de producir respuestas fi-

siológicas en el cerebro. Además, desde el punto de vista de un neurofisiólogo profesional, solamente viendo los registros del EEG no hay forma de determinar si la estimulación esta siendo realizada con VR-Photosense o un fotoestimulador convencional.

Adicionalmente, en cuanto a la ergonomía del sistema físico, VR-Photosense es cómodo para el sujeto de la prueba y también es fácil de colocar para los profesionales. El control por teclado es intuitivo y se encuentra bien documentado y descrito. En cuanto a la monitorización, la latencia es mínima y la adecuada desde el punto de vista médico, además de que los mensajes son claros y concisos.

Como aspecto no conseguido, en la disposición convencional haciendo uso del fotoestimulador físico el sistema de monitorización está incluido en la pantalla de registro, haciendo que el neurofisiólogo tenga toda la información a su disposición en el mismo registro del EEG. Con VR-Photosense es necesario tener abierto el sistema de monitorización aparte del registro, haciendo que el responsable tenga que estar pendiente de ambas pantallas y pueda perderse información en el proceso. También se dificulta en cierto grado la facilidad de detección de respuestas fisiológicas.

Aspectos a evaluar	Cumple totalmente	Cumple	No cumple
Ergonomía (condiciones de adaptación a las características físicas y psicológicas del usuario)	X		
Eficacia (Capacidad de producir respuestas fisiológicas)		X	
Amigabilidad de los controles	X		
Sistema de monitorización		X	
Integración con el registro del EEG			X

Tabla 2: Características evaluadas de VR-Photosense.

La eficacia de VR-Photosense se considera que no cumple totalmente porque únicamente se ha realizado la prueba en unos pocos sujetos, con lo que no tiene validez científica al momento de redacción de esta memoria. En cuanto a la monitorización, en principio es suficiente pero a día de hoy únicamente se trata de texto plano con código horario, lo que podría mejorarse en un futuro haciendo un diseño más visual.

8. Alcance de la investigación

VR-Photosense es una parte de una propuesta de proyecto de investigación europeo de más calibre, donde se llevará a cabo el estudio clínico previamente mencionado. Esta propuesta de proyecto de investigación se realizaría en colaboración con hospitales y centros de investigación europeos que llevan años estudiando el impacto que las tecnologías tienen a la hora de desencadenar crisis epilépticas y fotosensibilidad.

Este proyecto propone desarrollar una interfaz de cerebro-ordenador (BCI) en estrecha colaboración con destacados neurofisiólogos y expertos para incorporar la realidad virtual y el aprendizaje profundo (DL) a la estimulación fótica. La BCI propuesta permitirá evaluar los efectos de la RV en la fotosensibilidad y la evaluación de su posible uso clínico para la detección de PPRs. Este proyecto consistiría en la conducción de pruebas de estimulación fótica intermitente usando VR-Photosense a una variedad representativa de sujetos enfermos y sanas. Los registros obtenidos por el EEG serán pasados por un algoritmo de inteligencia artificial, el cual detectará automáticamente en tiempo real si se producen respuestas fotoparoxísticas durante el proceso, pudiendo modificar la estimulación si se producen contratiempos o situaciones indeseadas. VR-Photosense contendrá tanto los patrones de fotoestimulación aquí presentados, como escenarios de la vida real definidos como potenciales desencadenantes de respuestas fotoparoxísticas, enriqueciendo la calidad de los datos obtenidos.

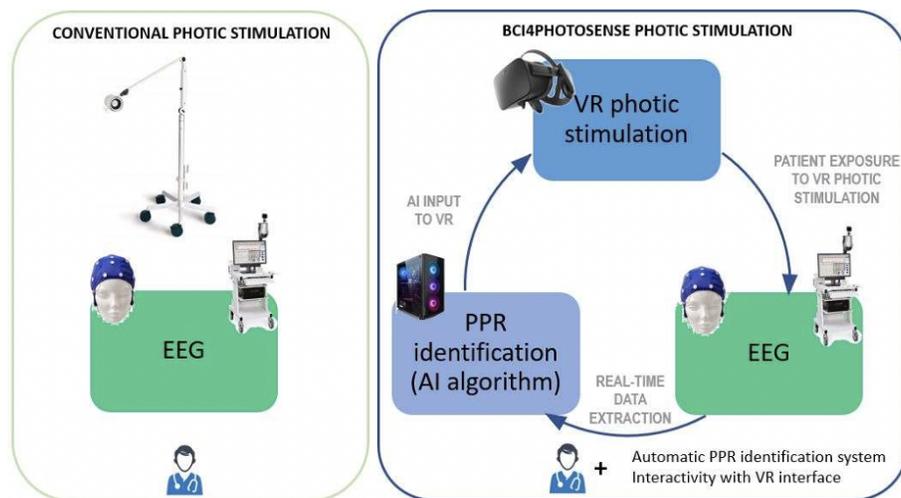


Figura 21: Nuestra propuesta vs estimulación convencional

Este enfoque alternativo a la detección de PPRs está permitiendo la realización de tres artículos de investigación, tanto de la parte de inteligencia artificial

como realidad virtual. Los dos primeros artículos se refieren al uso de inteligencia artificial para la detección de artifacts, que son señales registradas por el EEG pero no generadas por el cerebro. Ambos artículos están aceptados para su publicación en dos congresos y una invitación de revista del JCR. El artículo correspondiente al proyecto completo está siendo redactado para su presentación a principios de octubre en una conocida revista científica.

De la misma manera, durante la realización de este trabajo de fin de grado se ha redactado un artículo de investigación relativo a la parte de Realidad Virtual denominado "VR-Photosense: A virtual reality photic stimulation interface for the study of photosensitivity", que redacta de una manera más resumida lo contenido en este documento. Se ha presentado al congreso internacional SOCO 2021, la 16^a Conferencia Internacional sobre Modelos de Soft Computing en Aplicaciones Industriales y Medioambientales con sede en Bilbao. A día de hoy se ha superado la primera fase de aceptación, pudiendo llegar a ser aceptado y presentado en el mismo con las modificaciones que se han realizado durante estas últimas semanas. Se puede consultar en el anexo adjunto denominado "SOCO21_VR-Photosense". Además, al momento de la entrega de este trabajo, nuestro ensayo clínico propuesto en 50 sujetos está a la espera de aprobación ética por parte del Hospital de Burgos, pudiendo llegar a presentar pruebas concluyentes en el congreso antes mencionado.

Este desarrollo de VR-Photosense abre las puertas a un gran número de investigaciones que pueden contribuir en gran manera a un campo que aún se encuentra en desarrollo. El objetivo es poder seguir usando este prototipo participando en estas investigaciones que aportarán mucho tanto al campo de la neurofisiología como al de la realidad virtual.

9. Conclusiones

A medida que se descubren nuevas aplicaciones de la Realidad Virtual y se generaliza su uso, también se plantean nuevos retos y preguntas de investigación asociados al uso de contenidos visuales en un nuevo medio. Una de estas preguntas es si la exposición al uso de realidad virtual aumenta el riesgo de padecer convulsiones en los pacientes fotosensibles y en qué medida. En esta investigación, proponemos ampliar la investigación actual sobre el riesgo de fotosensibilidad mientras se consumen contenidos multimedia usando gafas de RV e introducimos VR-Photosense como un enfoque asequible de bajo coste para estudiar dichas respuestas, determinando la incidencia del arrastre y el impacto de los estímulos visuales de realidad virtual en los usuarios fotosensibles.

VR-Photosense es una solución de bajo coste al alcance de todos, siendo necesarios únicamente un HMD y un móvil Android. Esto es muy positivo dado el precio normal de los aparatos usados durante las pruebas de estimulación fónica intermitente, especialmente los electroenfacelogramas. Se presenta este prototipo validado en una primera instancia, permitiendo detectar respuestas fisiológicas en el cerebro de una forma ergonómica y cómoda tanto para el usuario como el médico responsable de la prueba. Aunque no exista una integración entre esta herramienta y el registro del EEG, esto hace que se pueda usar con cualquier tipo de electroenfacelograma. Dado que cada marca tiene un software propio, VR-Photosense contiene la monitorización via web, lo que permite a cualquier servicio de neurofisiología poder usarlo independientemente del equipo EEG que usen.

Este prototipo es el primer paso para poder determinar los efectos que la realidad virtual tiene en las personas epilépticas y fotosensibles, abriendo las puertas a estudios clínicos completos. Se ha confirmado que en los registros no se puede diferenciar de la fotoestimulación convencional, lo que es un paso muy significativo junto con la primera detección del arrastre en una persona sana.

En cuanto a las preguntas de investigación propuestas, estas son las conclusiones sacadas durante esta investigación al respecto:

1. *¿Es posible utilizar software y dispositivos Head-Mounted Display de realidad virtual para identificar respuestas fotosensibles?*

Todas las pruebas realizadas hasta el momento con VR-Photosense muestran cambios en las ondas cerebrales acordes a la estimulación. Esto hace que sea posible considerar el uso de realidad virtual y sus dispositivos para la realización de pruebas de estimulación luminosa intermitente. Además, el hecho de que el neurofisiólogo no sea capaz de determinar si se está usando VR-Photosense o un fotoestimulador físico es una señal que también refuerza esta conclusión.

2. *¿Permite nuestra solución propuesta identificar arrastre en individuos sanos?*

En un principio parece que sí. Se ha comprobado con una prueba en un entorno especializado y el resultado ha sido positivo, aunque es necesario aumentar la muestra para determinar si de verdad es posible identificar el arrastre con VR-Photosense.

3. *¿Permite la solución identificar PPR en pacientes con diagnóstico de epilepsia fotosensible?*

En este momento estamos esperando la aprobación del comité ético para llevar a cabo las pruebas que determinarán si VR-Photosense es apto para la detección de respuestas fotoparoxísticas en pacientes fotosensibles, con lo que aún no es posible dar respuesta a esta pregunta.

En conclusión, VR-Photosense presenta una gran contribución a un campo que aún está creciendo, como es la realidad virtual. Además, este trabajo hace posible el desarrollo de una investigación nunca antes realizada, publicando varios artículos en congresos y revistas internacionales, con el objetivo final de determinar si estos dispositivos tienen un impacto en personas fotosensibles y sus posibles efectos adversos. Las nuevas tecnologías deben ser seguras para los usuarios, y VR-Photosense ofrece la oportunidad de realizar un estudio clínico para hacer que la realidad virtual sea un poco más segura para todos.

10. Planificación

El plazo para completar el proyecto ha sido establecido en cinco meses, empezando en febrero y acabando en junio. Se han definido tres roles diferentes: investigador, tutor y neurofisiólogo.

	Horas	Días
Investigador	564	141
Tutor	72	18
Neurofisióloga	74	18,5

Tabla 3: Distribución del trabajo.

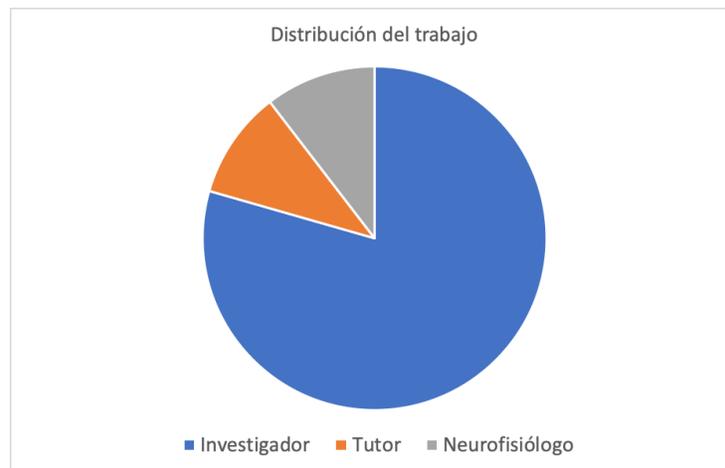


Figura 22: Distribución gráfica del trabajo entre roles

Teniendo en cuenta estas horas de trabajo y el tiempo inicial establecido, se ha dividido el trabajo en cuatro fases diferentes más la gestión del proyecto. La primera fase se trata de la adquisición del hardware, donde se identifican las necesidades existentes de hardware necesario para desarrollar la investigación y llevar a cabo la evaluación. La segunda fase es el grueso del proyecto, donde se lleva a cabo la investigación necesaria y se desarrolla el prototipo software. Las pruebas de viabilidad y evaluación del prototipo se engloba en la fase 3, siendo la documentación final del proyecto la última fase cuatro (ver tabla 4).

Dentro de cada una de estas fases, existen una serie de tareas asociadas a completar de manera secuencial, exceptuando la gestión que se llevará a cabo a lo largo de todo el proyecto (ver tabla 5).

Las tareas relativas a la gestión del proyecto consisten en reuniones semanales entre investigador y tutor, con participación puntual de la neurofisióloga.

Fase	INICIO	FIN	HORAS
Fase 1: Adquisición del hardware	2/2/21	5/2/21	11
Fase 2: Desarrollo del prototipo	8/2/21	29/5/21	497
Fase 3: Evaluación	1/6/21	1/7/21	60
Fase 4: Dcoumentación	1/6/21	1/7/21	90
Gestión	2/2/21	1/7/21	52

Tabla 4: Duración de las distintas fases planificadas.

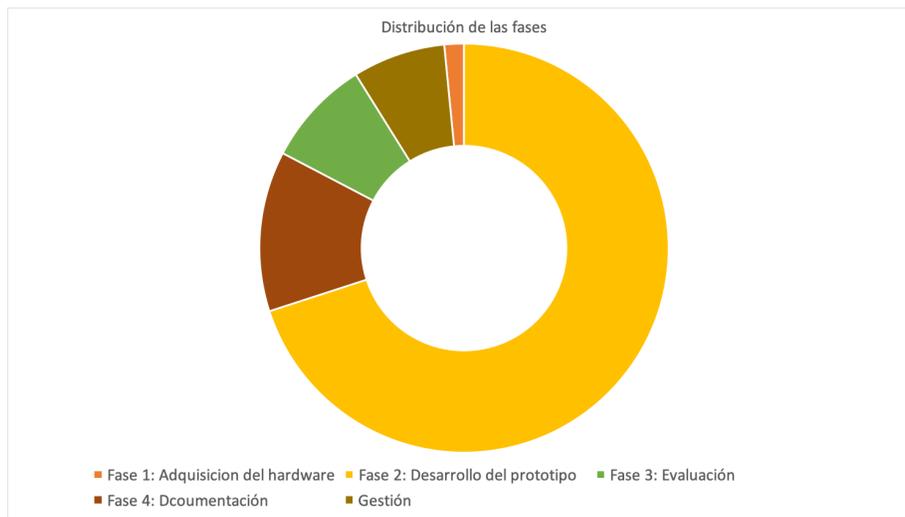


Figura 23: Distribución gráfica de trabajo en las distintas fases.

Estas tareas favorecen el desarrollo del prototipo y aportan soluciones rápidas a posibles preguntas o dudas relacionadas con el tema médico y su adaptación, así como el desarrollo del prototipo y su ajuste a la necesidad principal.

Las horas de trabajo son un total de 710, estableciendo la jornada laboral en una media de 4 horas diarias del investigador para completar las 564 asignadas.

Tarea	INICIO	FIN	HORAS
Identificar necesidades	2/2/21	2/2/21	5
Solicitar presupuestos	2/2/21	2/2/21	2
Elegir oferta	2/2/21	2/2/21	2
Solicitar pedido	3/2/21	3/2/21	1
Recepción	3/2/21	5/2/21	1
Investigación	8/2/21	9/4/21	270
Desarrollo prototipo Unity	9/4/21	4/5/21	110
Desarrollo monitorización	4/5/21	24/5/21	90
Integración	24/5/21	27/5/21	17
Despliegue	27/5/21	29/5/21	10
Evaluación de sujetos	1/6/21	16/6/21	30
Interpretación resultados	16/6/21	1/7/21	30
Desarrollo de documentación	1/6/21	1/7/21	90
Gestión	2/2/21	1/7/21	52

Tabla 5: Definición de tareas asociadas a cada fase y duración de cada una.

11. Presupuesto

El presupuesto final de cliente se detalla a continuación. Tanto la definición de empresa empleada y la propia elaboración del presupuesto completo se puede consultar en el anexo presupuesto.

Cod	Partida	Total
1	Adquisición del hardware	1.331,06 €
2	Desarrollo del proyecto	19.709,85 €
3	Documentación	2.654,95 €
TOTAL CLIENTE		23.695,86 €

Tabla 6: Presupuesto de cliente resumido.

Como se puede ver en la tabla 6, existen tres partidas diferentes. La primera partida engloba la fase 1 de adquisición del hardware, la segunda consiste en las fases 2 y 3, siendo la última partida la última fase del proyecto. El presupuesto de cliente desglosado queda como sigue:

Partida	Item	Partida	Importe	TOTAL
1		Adquisición del hardware		1.331,06 €
	01	Adquisición del hardware	434,06 €	
	02	Hardware adquirido	897,00 €	
2		Desarrollo del proyecto		19.709,85 €
	01	Gestión	1.854,25 €	
	02	Desarrollo	14.454,73 €	
	03	Integración	577,35 €	
	04	Despliegue del sistema	294,99 €	
	05	Evaluación	2.528,52 €	
3		Documentación		2.654,95 €
	01	Desarrollo de documentación	2.654,95 €	
			TOTAL	23.695,86 €

Tabla 7: Presupuesto de cliente desglosado.

Referencias

- [Wal+44] A Earl Walker y col. “Photic driving”. En: *Archives of Neurology & Psychiatry* 52.2 (1944), págs. 117-125.
- [WAI75] ARNOLD J Wilkins, Frederick Andermann y JOHN Ives. “Stripes, complex cells and seizures. An attempt to determine the locus and nature of the trigger mechanism in pattern-sensitive epilepsy.” En: *Brain: a journal of neurology* 98.3 (1975), págs. 365-380.
- [TT76] T Takahashi e Y Tsukahara. “Influence of color on the photoconvulsive response”. En: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 41.2 (1976), págs. 124-136.
- [WBD80] AJ Wilkins, CD Binnie y CE Darby. “Visually-induced seizures”. En: *Progress in Neurobiology* 15.2 (1980), págs. 85-117.
- [WCD92] S. Waltz, H.-J. Christen y H. Doose. “The different patterns of the photoparoxysmal response — a genetic study”. En: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 83.2 (1992), págs. 138-145. ISSN: 0013-4694. DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(92\)90027-F](https://doi.org/10.1016/0013-4694(92)90027-F). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001346949290027F>.
- [HEJ97] GFA Harding, A Edson y PM Jeavons. “Persistence of photosensitivity”. En: *Epilepsia* 38.6 (1997), págs. 663-669.
- [Wud97] Sheryl Wudunn. *TV Cartoon’s Flashes Send 700 Japanese Into Seizures (Published 1997)*. Dic. de 1997. URL: <http://query.nytimes.com/gst/fullpage.html?res=9E05E6D8103FF93BA25751C1A961958260&sec=&spon=&pagewanted=25>.
- [Pel98] Eli Peli. “The visual effects of head-mounted display (HMD) are not distinguishable from those of desk-top computer display”. En: *Vision research* 38.13 (1998), págs. 2053-2066.
- [Bro99] F.P. Brooks. “What’s real about virtual reality?” En: *IEEE Computer Graphics and Applications* 19.6 (1999), págs. 16-27. DOI: 10.1109/38.799723.
- [Kas+99] DG Kasteleijn-Nolst Trenite y col. “Video-game epilepsy: a European study.” En: *Epilepsia* (1999).
- [HT04] Graham FA Harding y Takeo Takahashi. “Regulations: what next?” En: *Epilepsia* 45 (2004), págs. 46-47.
- [Rub+04] Guido Rubboli y col. “EEG diagnostic procedures and special investigations in the assessment of photosensitivity”. En: *Epilepsia* 45 (2004), págs. 35-39.
- [Cov05] Athanasios Covanis. “Photosensitivity in idiopathic generalized epilepsies”. En: *Epilepsia* 46 (2005), págs. 67-72.

- [Ver+05] A Verrotti y col. “Human photosensitivity: from pathophysiology to treatment”. En: *European journal of neurology* 12.11 (2005), págs. 828-841.
- [NGB10] Carlos Novo-Olivas, Leticia Guitiérrez y José Bribiesca. “Mapeo Electroencefalográfico y Neurofeedback”. En: feb. de 2010, págs. 371-412. ISBN: 978-970-764-911-8.
- [Ver+12] Alberto Verrotti y col. “Photosensitivity: epidemiology, genetics, clinical manifestations, assessment, and management”. En: *Epileptic Disorders* 14.4 (2012), págs. 349-362.
- [EP14] John S Ebersole y Timothy A Pedley. *Current practice of clinical electroencephalography*. Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
- [Vin14] Pasquale Striano Vincenzo Belcastro. “Self-induction seizures in sunflower epilepsy: a video-EEG report”. En: *Epileptic Disorders* 16(1) (2014), págs. 93-95. DOI: doi:10.1684/epd.2014.0630.
- [Yao+14] Richard Yao y col. “Oculus vr best practices guide”. En: *Oculus VR* 4 (2014), págs. 27-35.
- [HTW17] Dora Hermes, Dorothée GA Kasteleijn-Nolst Trenité y Jonathan Winawer. “Gamma oscillations and photosensitive epilepsy”. En: *Current Biology* 27.9 (2017), R336-R338.
- [Tep+17] Oren M Tepper y col. “Mixed reality with HoloLens: where virtual reality meets augmented reality in the operating room”. En: *Plastic and reconstructive surgery* 140.5 (2017), págs. 1066-1070.
- [Tat+18] WO Tatum y col. “Clinical utility of EEG in diagnosing and monitoring epilepsy in adults”. En: *Clinical Neurophysiology* 129.5 (2018), págs. 1056-1082.
- [Tre19] Dorothee Kasteleijn-Nolst Trenite. “Photosensitivity and epilepsy”. En: *Clinical Electroencephalography*. Springer, 2019, págs. 487-495.
- [CS21] Athanasios Covanis y Jessica Solodar. “Photosensitive and Pattern-Sensitive Epilepsy: A Guide for Patients and Caregivers”. En: *The Importance of Photosensitivity for Epilepsy*. Springer, 2021, págs. 393-406.
- [Fer+21] Edoardo Ferlazzo y col. “Technical Issues for Video Game Developers and Architects to Prevent Photosensitivity”. En: *The Importance of Photosensitivity for Epilepsy*. Springer, 2021, págs. 407-412.
- [Sil+21] Luiz C Barreto Silva y col. “Epidemiology of Sensitivity of the Brain to Intermittent Photic Stimulation and Patterns”. En: *The Importance of Photosensitivity for Epilepsy*. Springer, 2021, págs. 3-25.
- [Vai21] Lionel Sujay Vailshery. *AR/VR headset shipments worldwide 2020-2025*. Mar. de 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/653390/worldwide-virtual-and-augmented-reality-headset-shipments/>.
- [BCI] Open BCI. *Open BCI*. URL: <https://openbci.com> (visitado 27-06-2021).

- [Est] Instituto Nacional de Estadística. *Utilización de videojuegos, ordenador o internet según sexo y grupo de edad. Población de 1 a 15 años*. URL: <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t15/p419/a2006/p07/10/&file=03092.px#!tabs-grafico>.
- [Gam] Beat Games. *Beat Saber*. URL: <https://beatsaber.com> (visitado 17-06-2021).
- [Mara] Sofía Martín. *Prueba preliminar 2 VR-Photosense*. URL: <https://youtu.be/e8xBgjDfILO> (visitado 29-06-2021).
- [Marb] Sofía Martín. *Prueba preliminar VR-Photosense*. URL: <https://youtu.be/U12lifyJ4ec> (visitado 29-06-2021).
- [Neu] Neurodidacta. *Pruebas de electroencefalografía (eeg)*. URL: https://www.neurodidacta.es/index.php?option=com_guru&view=gurutasks&catid=3&module=25-diagnostico&cid=124-las-pruebas-de-electroencefalograf%5C%C3%5C%ADa-eeg&tmpl=component&Itemid=0.

12. Anexos

12.1. Anexo I: Elaboración del presupuesto

12.1.1. Definición de empresa

La empresa se ha definido teniendo en cuenta tres perfiles: investigador, tutor y neurofisiólogo. Este personal supone un coste de 88.400€ (ver tabla 8).

PERSONAL				
Título	Num	Sueldo bruto anual	Coste Salarial año	TOTAL
Investigador	1	18.000,00 €	23.400,00 €	23.400,00 €
Tutor	1	23.000,00 €	29.900,00 €	29.900,00 €
Neurofisiólogo	1	27.000,00 €	35.100,00 €	35.100,00 €
TOTAL	3			88.400,00 €

Tabla 8: Personal definido en la empresa.

Teniendo en cuenta la productividad de cada uno de estos perfiles, el personal supone un total de 36.465€ en costes directos y 51.935€ en costes indirectos (ver tabla 9).

PRODUCTIVIDAD					
Título	TOTAL	Prod %	Coste Directo	CI%	Coste Indirecto
Investigador	23.400,00 €	95,00 %	22.230,00 €	5,00 %	1.170,00 €
Tutor	29.900,00 €	30,00 %	8.970,00 €	70,00 %	20.930,00 €
Neurofisiólogo	35.100,00 €	15,00 %	5.265,00 €	85,00 %	29.835,00 €
TOTAL	88.400,00 €		36.465,00 €		51.935,00 €

Tabla 9: Productividad del personal.

En cuanto a los medios de producción, se disponen de portátiles para llevar a cabo el desarrollo y las reuniones, así como dispositivos móviles destinados tanto a la comunicación como a la prueba de la aplicación (ver tabla 10). Suponen un coste anual de 1.200€.

MEDIOS DE PRODUCCIÓN					
Concepto	Num	Precio	Coste Total	Coste anual	Plazo
Portátiles	3	1.500,00 €	4.500,00 €	900,00 €	5
Móviles de pruebas	4	300,00 €	1.200,00 €	300,00 €	4
TOTAL				1.200,00 €	

Tabla 10: Medios de producción.

Por otro lado, los costes indirectos de la empresa suponen un total de 16.680€, donde se incluyen gastos relativos al consumo eléctrico, internet, materiales, agua y tasas (ver tabla 11).

COSTES INDIRECTOS

Servicio	Coste mensual	Coste anual
Mantenimiento y limpieza	100,00 €	1.200,00 €
Material de oficina	450,00 €	5.400,00 €
Dispositivos auxiliares (USB, CD, tóner...)	100,00 €	1.200,00 €
Conexión a internet	30,00 €	360,00 €
Consumo eléctrico	30,00 €	360,00 €
Tasas	650,00 €	7.800,00 €
Agua	30,00 €	360,00 €
TOTAL		16.680,00 €

Tabla 11: Costes indirectos.

Con todo esto, la empresa dispone de una facturación total de **106.280€**.

Para determinar el precio por hora de los distintos perfiles, se ha calculado las horas productivas de cada uno, quedando como sigue a continuación (tabla 12 y 13).

HORAS PRODUCTIVAS

Título	Num	Prod %	Horas/año	H. prod / año	Horas totales
Investigador	1	95,00 %	1.900	1805	1805
Tutor	1	30,00 %	1.900	570	570
Neurofisiólogo	1	15,00 %	1.900	285	285
TOTAL					2.660

Tabla 12: Horas productivas.

PRECIO HORA

Título	Precio / hora	Horas prod totales	Facturación	Precio/h
Investigador	35,00 €	1805	63.175,00 €	26,25 €
Tutor	45,00 €	570	25.650,00 €	33,75 €
Neurofisiólogo	55,00 €	285	15.675,00 €	41,25 €
TOTAL		2.660	104.500,00 €	

Tabla 13: Precio por hora del personal.

Con estos últimos precios/hora, se calculará el precio de cada una de las partidas en el siguiente apartado.

12.1.2. Partidas

Se han definido cuatro partidas diferentes. La primera partida trata sobre la adquisición del hardware, donde se presupuestan tanto las tareas como el hardware adquirido.

(1) ADQUISICIÓN DEL HARDWARE									
L1	L2	L3	Descripción	Cantidad	Ud	Precio	Subtotal(3)	Subtotal(2)	TOTAL
01			Adquisición de hardware	11 horas					386,25 €
	001		Identificar necesidades	5 horas				161,25 €	
		01	Investigador	2 horas		26,25 €	52,50 €		
		02	Tutor	2 horas		33,75 €	67,50 €		
		03	Neurofisiólogo	1 horas		41,25 €	41,25 €		
	002		Solicitar presupuestos	2 horas				75,00 €	
		01	Tutor	1 horas		33,75 €	33,75 €		
		02	Neurofisiólogo	1 horas		41,25 €	41,25 €		
	003		Elegir oferta	2 horas				75,00 €	
		01	Tutor	1 horas		33,75 €	33,75 €		
		02	Neurofisiólogo	1 horas		41,25 €	41,25 €		
	004		Solicitar pedido	1 horas				37,50 €	
		01	Tutor	0,5 horas		33,75 €	16,88 €		
		02	Neurofisiólogo	0,5 horas		41,25 €	20,63 €		
	006		Recepción	1 horas				37,50 €	
		01	Tutor	0,5 horas		33,75 €	16,88 €		
		02	Neurofisiólogo	0,5 horas		41,25 €	20,63 €		
02			Hardware adquirido						798,19 €
	001	01	HMD LEHONG	1		29,99 €	29,99 €	29,99 €	
	002	01	HMD Heromask	1		50,00 €	50,00 €	50,00 €	
	003	01	Oculus Quest 2	1		469,20 €	469,20 €	469,20 €	
	004	01	Teléfono Oppo A72	1		189,00 €	189,00 €	189,00 €	
	005	01	Teclado bluetooth	1		20,00 €	20,00 €	20,00 €	
	006	01	Adaptador USB/USB-C	2		5,00 €	10,00 €	10,00 €	
	007	01	Mando Playstation	1		30,00 €	30,00 €	30,00 €	
									TOTAL 1.184,44 €

Figura 24: Partida I: adquisición del hardware

Los dispositivos con id 02/001, 02/004, 02/005 y 02/006 son los usados en el Hospital Universitario de Burgos para verificar la viabilidad del prototipo. Ascende a un total de 1.184,44€ (ver figura 24).

La segunda partida comprende el grosor del proyecto, las fases 2 y 3. Se refiere al desarrollo del proyecto y supone un total de 17.538,75€ (ver figura 25).

La tercera partida calcula los costes para la fase 4, el desarrollo de la documentación final. Esta se determina en un total de 2.362,50€ (ver figura 26).

La última partida es la conocida como Otros Costes, donde se reflejan los costos relacionados con viajes y dietas, en este caso las realizadas al Hospital Universitario de Burgos. Supone un coste total de 456€ (ver figura 27). Esta partida no se incluye directamente en el presupuesto del cliente, sino que se promedia entre el resto de partidas.

El presupuesto total de costes asciende a **21.541,69€**, como se detalla en la figura 28.

(4) OTROS COSTES									
L1	L2	L3	Descripción	Cantidad	Ud	Precio	Subtotal(3)	Subtotal(2)	TOTAL
01			Viajes y dietas						456,00 €
	001		Viajes	1200	km	0,20 €	240,00 €	240,00 €	
	002		Dietas	18	dietas	12,00 €	216,00 €	216,00 €	
TOTAL									456,00 €

Figura 27: Partida IV: Otros costes.

PRESUPUESTO DE COSTES		
Cod	Partida	Total
1	Adquisición del hardware	1.184,44 €
2	Desarrollo del proyecto	17.538,75 €
3	Documentación	2.362,50 €
4	Otros costes	456,00 €
TOTAL COSTE		21.541,69 €

Figura 28: Presupuesto total de costes.

PARTIDAS DE CLIENTE SIN PROMEDIAR				
Partida	Item	Partida	Coste sin promediar	TOTAL
1		Adquisición del hardware		1.184,44 €
	01	Adquisición del hardware	386,25 €	
	02	Hardware adquirido	798,19 €	
2		Desarrollo del proyecto		17.538,75 €
	01	Gestión	1.650,00 €	
	02	Desarrollo	12.862,50 €	
	03	Integración	513,75 €	
	04	Despliegue	262,50 €	
	05	Evaluación	2.250,00 €	
3		Documentación		2.362,50 €
	01	Documentación del sistema	2.362,50 €	
TOTAL				21.085,69 €

Figura 29: Partida de cliente sin promediar.

Otros costes	456,00 €
Reservas 10 %	2.154,17 €
Valor a promediar	2.610,17 €
Total	21.085,69 €
Porcentaje	12,38 %

Tabla 14: Valores a promediar para el cliente.

12.2. Anexo II: Instrucciones básicas de uso

A continuación se presentan las instrucciones de uso del prototipo VR-Photosense que se entregaron al personal de neurología y los investigadores involucrados en el proyecto.

El primer paso consiste en conectar el teclado bluetooth al móvil. Para ello existen dos opciones:

1. Opción 1: Conectar el cable USB del teclado al teléfono (usando un adaptador USB-USBC como se ve en la figura 30). Settings ⇒ Additional settings ⇒ OTG Connection ⇒ ON.
2. Opción 2: Si es inalámbrico, en el teléfono, Ajustes ⇒ Bluetooth ⇒ ON. Seleccionar el nombre del teclado y se conectará.



Figura 30: Adaptador USB-USBC.

Para comprobar que la conexión se ha realizado con éxito, se recomienda entrar en Google desde el teléfono y probar a escribir en el buscador usando el teclado.

El siguiente paso es abrir la aplicación VR-Photosense instalada en el teléfono. Si aún no está instalada, únicamente es necesario abrir desde el dispositivo el archivo VRPhotosense.apk. De esta manera se instalará automáticamente. El icono de la aplicación es el que se muestra en la figura 31

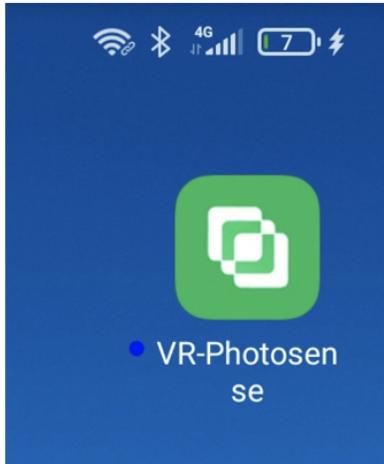


Figura 31: Icono de la aplicación móvil VR-Photosense.

Es necesario permitir que la aplicación cargue al completo. Se verá como se muestra en la figura 32.

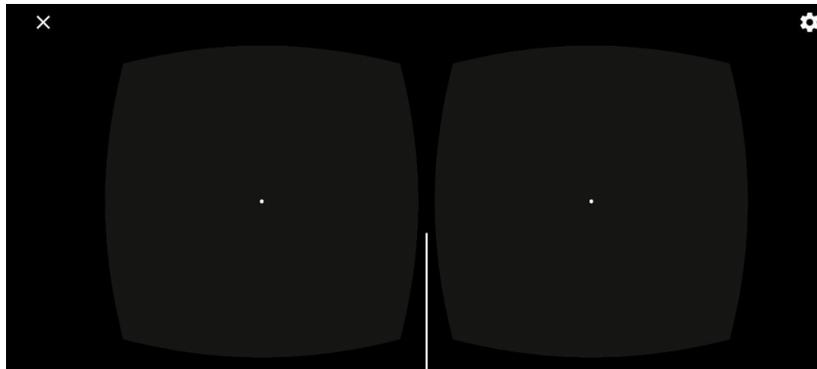


Figura 32: Aplicación VR-Photosense cargada y funcionando.

A continuación, se inserta el teléfono en las gafas de realidad virtual, tal y como se ve en la figura 33. De esta manera, el set-up para el paciente ya estaría finalizado.

Para el sistema de monitorización, el primer paso es entrar en la página web <https://vrphotosense.herokuapp.com/>. Para comprobar que funciona correctamente, en la pantalla debe mostrarse el texto "VR-Photosense log.^{en} la parte superior izquierda, tal y como se ve en la figura 34.



Figura 33: Forma de colocar el teléfono dentro de las gafas de realidad virtual.



Figura 34: Sistema de monitorización de VR-Photosense preparado.

Una vez todo este listo, los comandos ¹ de uso son los que siguen en la tabla 15.

Si todo está correcto, una vez se empiecen a pulsar los comandos, deberían verse a través de la monitorización de forma casi inmediata.

¹Cuando se pausa la simulación y se reanuda (RESET), vuelve a empezar en la frecuencia donde se pausó. Para volver a reproducir desde el principio es necesario darle a reset, donde volverá a comenzar en los 2Hz.

Comandos de teclado	
Comenzar / reanudar simulación	ENTER
Pausar	ESPACIO
Reset	BACKSPACE
Patrón ascendente 2-50Hz	FLECHA ARRIBA
Patrón descendente 50-2Hz	FLECHA ABAJO
Luz color blanco	B
Luz color azul	A
Combinación rojo-azul	R
Subir 2Hz	Numpad + // número 2
Salir de la aplicación	Escape

Tabla 15: Comandos mostrados en el manual de instrucciones básicas para VR-Photosense.

12.3. Anexo III: Manual para desarrolladores

VR-Photosense es una herramienta que ha sido desarrollada usando Unity 3D, lo que lo hace multiplataforma. A continuación se explica el procedimiento para compilar la aplicación para las distintas plataformas, así como la configuración de dispositivos de entrada y la localización de las clases si se desean modificar.

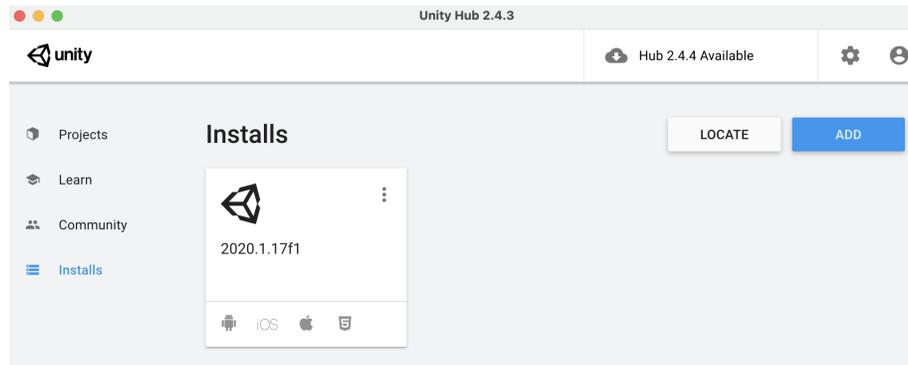


Figura 35: Captura de la instalación de la versión 2020.1.17f del motor Unity y los diferentes módulos.

Lo primero, la versión usada para realizar el proyecto se trata de Unity 2020.1.17f. Es necesario descargar tanto Unity Hub. Desde esta aplicación, en el menú de Instalaciones, será posible descargar esta versión de Unity. Una vez descargada la versión, desde el menú de los tres puntos en la propia versión se pueden añadir los módulos necesarios para realizar la compilación para los diferentes dispositivos. En este caso, nos interesa solamente la SDK de Android, aunque también existe soporte para iOS y Mac entre otros, tal y como se muestra en la figura 35.



Figura 36: Captura del menú Proyectos de Unity Hub.

Una vez se tenga la instalación completa, desde el menú de Projects se podrá añadir el proyecto con el código descargado desde el botón Add y abrirlo (ver figura 36).

12.3.1. Configuración de dispositivos de entrada

Para la gestión de los dispositivos de entrada se ha utilizado el nuevo Input System 1.0.2 de Unity, el cual dispone de una interfaz para añadir nuevas entradas. Para su manipulación, solamente es necesario abrir el archivo Input Action Asset llamado Controls (ver figura 37).

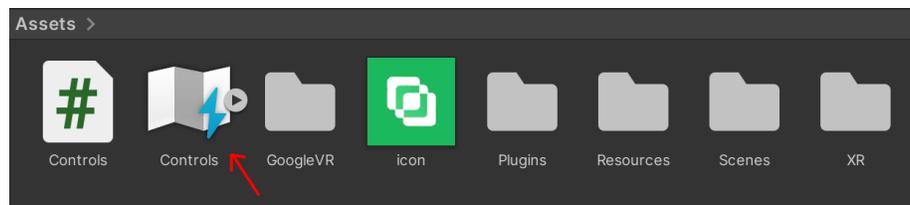


Figura 37: Archivo del tipo Input Action Asset que contiene las configuraciones de dispositivos y acciones de entrada.

Una vez dentro, se pueden observar los diferentes Action Maps, Actions y las properties de cada una de las acciones. Los Action Maps son agrupaciones de comandos, para tener de esta manera una organización mejor. Dentro de las actions existentes, para añadir un nuevo tipo de dispositivo de entrada debe modificarse las properties de las acciones. El icono "justo a la derecha del nombre de la acción permite añadir una nueva entrada de dispositivo (Add Binding). Aquí se puede elegir el Path correspondiente al tipo de dispositivo y el botón que se quiere asociar a la acción.

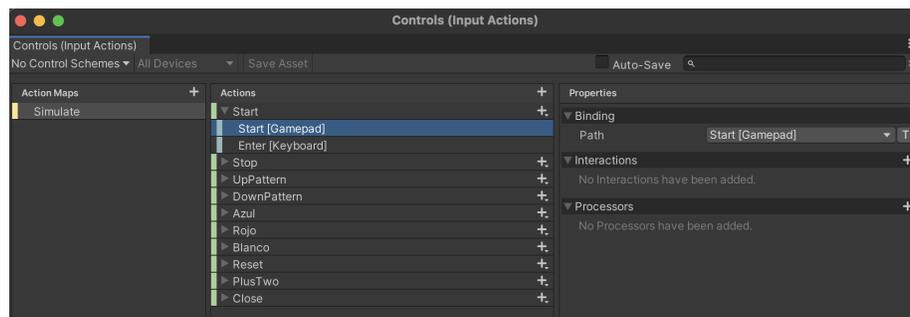


Figura 38: Interfaz que ofrece el Input System 1.0.2 para asociar acciones a los distintos dispositivos de entrada.

De momento se encuentra configurado para funcionar tanto con teclado como

con un GamePad o los controles de Oculus. Una vez se hagan las modificaciones que se quieran, se cierra y se guarda. De esta manera ya estaría preparado para funcionar.

12.3.2. Compilación

Para compilar la aplicación y descargar el archivo .apk hay que entrar en File ⇒ Build settings (o command mayus B en Mac). Desde aquí se seleccionan las escenas a incluir, en este caso es solamente una, la plataforma para la que se quiere realizar la compilación y una serie de parámetros a configurar (ver figura 39).

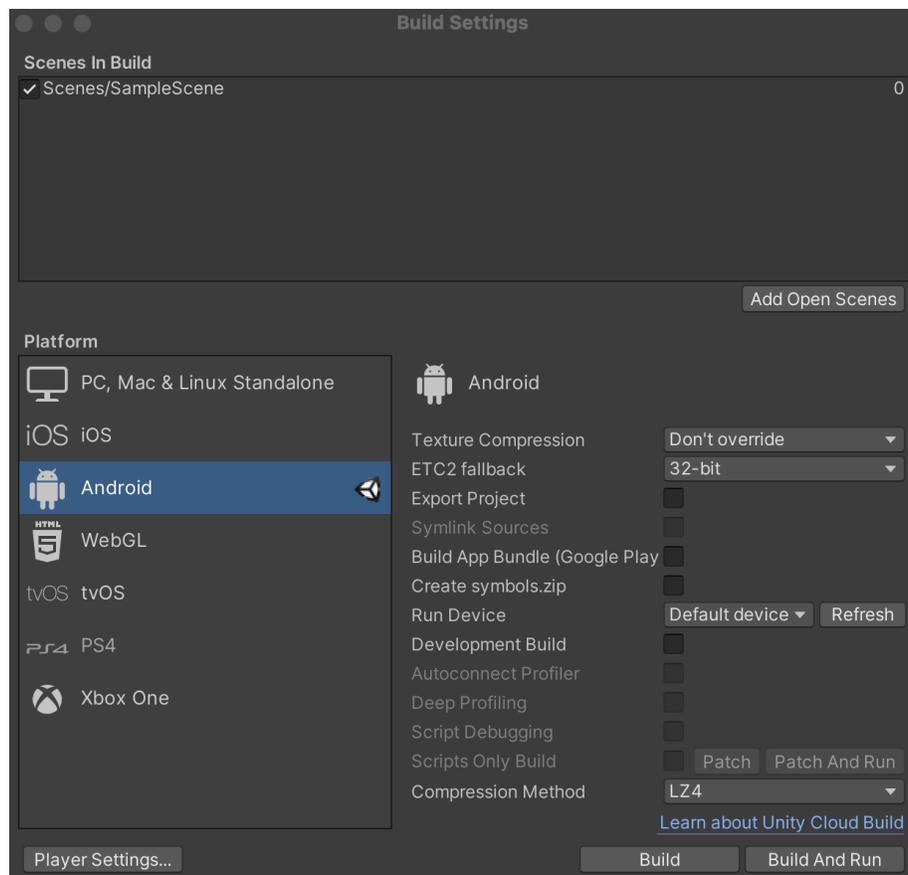


Figura 39: Ventana de configuración para compilar la aplicación desde Unity 3D.

En este caso la compilación se realizaría para Android, dado que funcionaría tanto en los dispositivos Android como para las gafas Oculus Quest 2. Si se

quisiera usar en iPhone, bastaría con cambiar la plataforma a iOS. Al darle al botón Build, se generaría el archivo .apk para poder posteriormente instalarla en el dispositivo Android que se desee.

12.3.3. Modificaciones en el código

Cada uno de los scripts desarrollados se asocian con un componente de la escena. Si se crea algún componente nuevo, debe crearse un nuevo script para definir sus funciones en la carpeta Scripts. Dentro de esta carpeta se encuentran todos los scripts desarrollados en este momento (ver figura 40). Los archivos contenidos en la carpeta Shaders se refieren a los usados para oscurecer el interior de la esfera en la escena, tanto el material como el shader correspondiente.

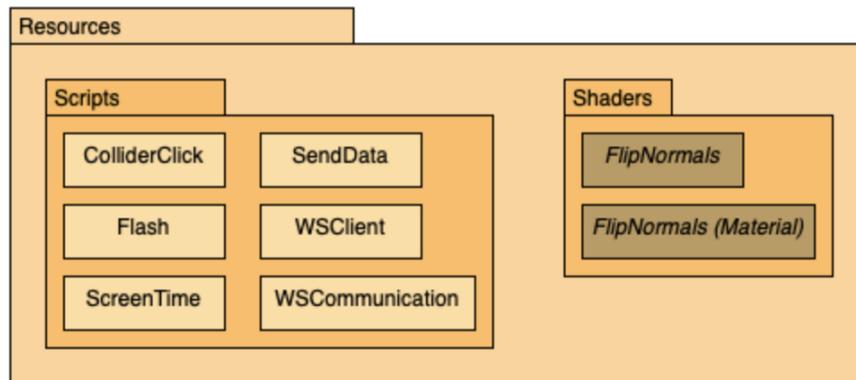


Figura 40: Paquetes y clases incluidas en la carpeta resources dentro del proyecto en Unity 3D.

La funcionalidad principal de VR-Photosense es la de emular un fotoestimulador, y todas las acciones al respecto se encuentran en el script denominado Flash, dentro de la carpeta Scripts. Aquí es donde se deberían añadir nuevas acciones relativas a la estimulación fótica intermitente, por ejemplo, añadir nuevos colores, cambiar el tiempo entre secuencias o asociar nuevos comandos a acciones.

En cuanto a la monitorización, la modificación del código del cliente Monitoring es posible con permisos del desarrollador principal. Actualmente se encuentra desplegado en la web <https://vrphotosense.herokuapp.com> usando Heroku CLI. La url del repositorio en Heroku es la siguiente <https://git.heroku.com/vrphotosense.git>. En local, el archivo principal se trata del index.html. Aquí se encuentra el código necesario para la conexión al WebSocket y la impresión de la información recogida.

12.4. Anexo IV: Requisitos del cliente

RDisp1. El sistema deberá poder utilizarse en dispositivos Android y Oculus.

RDisp2. El sistema deberá poder utilizarse con teclado.

RDisp3. El sistema deberá poder utilizarse con GamePad.

RDisp4. El sistema deberá poder utilizarse con XR Remote.

RPhoto1. El sistema deberá simular el funcionamiento de un fotoestimulador usado en las pruebas de estimulación fónica intermitente.

RPhoto1.1. El sistema deberá definir dos secuencias, estimulación y descanso.

RPhoto1.1.1. La secuencia de estimulación durará 7 segundos. $t = 7$ segundos.

RPhoto1.1.2. La secuencia de descanso durará 10 segundos. $t = 10$ segundos.

RPhoto1.2. El sistema deberá implementar el parpadeo del foco siguiendo un esquema de frecuencias ascendente.

RPhoto1.2.1. Las frecuencias deberán ir en pares desde 2 hasta 50 hercios.

RPhoto1.2.2. En unity es necesario traducir estos hercios a segundos. $\text{freq} = 1/\text{Hz}$.

RPhoto1.2.3. Esta configuración deberá poderse acceder con un comando.

RPhoto1.2.3.1 En teclado Up Pattern = up arrow.

RPhoto1.2.3.2 En gamepad Up Pattern = D-Pad/UP.

RPhoto1.2.3.3 En oculus Up Pattern = primary Touched (left hand).

RPhoto1.3. El sistema deberá implementar el parpadeo del foco siguiendo un esquema de frecuencias descendente.

RPhoto1.3.1. Las frecuencias deberán ir en pares desde 50 hasta 2 hercios.

RPhoto1.3.2. En unity es necesario traducir estos hercios a segundos. $\text{freq} = 1/\text{Hz}$.

RPhoto1.3.3. Esta configuración deberá poderse acceder con un comando.

RPhoto1.3.3.1 En teclado Down Pattern = down arrow.

RPhoto1.3.3.2 En gamepad Down Pattern = D-Pad/DOWN.

RPhoto1.3.3.3 En oculus Down Pattern = secondary touched (left hand).

RPhoto1.4. El sistema deberá implementar un comando para empezar la simulación.

RPhoto1.4.1. En teclado START = enter.

RPhoto1.4.2. En gamepad START = start.

RPhoto1.4.3. En oculus START = right hand trigger.

RPhoto1.5. El sistema deberá implementar un comando para parar la simulación.

RPhoto1.5.1. En teclado PAUSE = spacebar.

RPhoto1.5.2. En gamepad PAUSE = Button South.

RPhoto1.5.3. En oculus PAUSE = right hand grip.

RPhoto1.5.4. Cuando se pausa la simulación, debe repetirse desde el principio la secuencia en la que se encontraba.

RPhoto1.6. El sistema deberá implementar un comando para resetear la simulación.

RPhoto1.6.1. En teclado RESET = backspace.

RPhoto1.6.2. En gamepad RESET = Button West.

RPhoto1.6.3. En oculus RESET = Secondary Touched (right hand).

RPhoto1.7. El sistema deberá permitir manipular la frecuencia de estimulación añadiendo dos herzios a través de comando.

RPhoto1.7.1. En teclado Plus Two = Numpad + // 2.

RPhoto1.7.2. En gamepad Plus Two = Button North.

RPhoto1.7.3. En oculus Plus Two = primary Touched (right hand).

RPhoto1.8. El sistema deberá incluir una única fuente de luz blanca sobre fondo negro, produciendo el mayor contraste posible.

RPhoto1.9. El sistema no deberá permitir al usuario perder de vista la luz blanca.

RPhoto2. El sistema no deberá permitir que el móvil entre en reposo.

RPhoto3. El sistema deberá implementar en un comando específico la acción de cerrar la aplicación.

RPhoto3.1. En teclado Close = Escape.

RPhoto3.2. En gamepad Close = Button East.

RPhoto3.3. En oculus Close = start (right hand).

RPhoto4. El sistema debe implementar varios colores de luz.

RPhoto4.1 El sistema debe implementar un comando para cambiar la luz a color rojo.

RPhoto4.1.1 Cuando se pulse este comando debe cambiarse el fondo a azul.

RPhoto4.1.2 En teclado Rojo = R.

RPhoto4.1.2. En gamepad Rojo = Left Shoulder.

RPhoto4.1.4. En oculus Rojo = left trigger.

RPhoto4.2. El sistema debe implementar un comando para cambiar la luz a color azul.

RPhoto4.2.1. En teclado Azul = A.

RPhoto4.2.2. En gamepad Azul = Right Shoulder.

RPhoto4.2.3. En oculus Azul = left grip.

RPhoto4.3. El sistema debe implementar un comando para cambiar la luz a color blanco.

RPhoto4.3.1. En teclado Blanco = B.

RPhoto4.3.2. En gamepad Blanco = Right Trigger.

RPhoto4.3.3. En oculus Blanco = start (left hand).

RMonitor1. El sistema deberá implementar una visualización de lo que ocurre en la estimulación.

RMonitor1.1. Cada vez que se presione un comando, este debe mostrarse en pantalla junto con un código horario.

RMonitor1.1.1 La información debe ser lo más clara y concisa posible, resumiéndose en una palabra.

RMonitor1.2. La latencia debe ser la menor posible dadas las circunstancias del entorno.

RMonitor1.3. El sistema de monitorización debe ser accesible desde una tablet.

13. Contenido adjunto a la memoria

13.1. Artículo para SOCO 2021

Bajo el nombre de "SOCO21_VR-Photosense" figura la versión de autor del artículo completo presentado a la 16a Conferencia Internacional sobre Modelos de Soft Computing en Aplicaciones Industriales y Medioambientales con sede en Bilbao. En este momento se encuentra en fase de aprobación tras realizar modificaciones, siendo la comunicación final el 15 de julio.

13.2. Código fuente VR-Photosense

Se entrega el código fuente del sistema, tanto la estimulación fónica como la monitorización. Etiquetado como "VR-Photosense", en el interior figuran dos carpetas distinguidas como "Monitorizacion" y "Fotoestimulador". La primera contiene el código del servidor y el cliente web, y la segunda el código completo realizado en Unity 3D.