



ugr

Universidad
de Granada

DOCUMENTO DE TESIS DOCTORAL

Desarrollo de aplicaciones de Realidad Virtual y aplicación de interfaces cerebro-ordenador para reconocimiento de estados emocionales y neurológicos

Programa de doctorado en Tecnologías de la Información y la Comunicación (B25.56.1)

Autor

Miguel Ángel Vaquero Blasco

Directores

Miguel Ángel López Gordo
Christian A. Morillas Gutiérrez



Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Miguel Ángel Vaquero Blasco
ISBN: 978-84-1117-268-4
URI: <http://hdl.handle.net/10481/73972>



ugr

Universidad
de Granada

Desarrollo de aplicaciones de Realidad Virtual y aplicación de interfaces cerebro-ordenador para reconocimiento de estados emocionales y neurológicos

Autor

Miguel Ángel Vaquero Blasco

Directores

Miguel Ángel López Gordo
Christian A. Morillas Gutiérrez

Desarrollo de aplicaciones de Realidad Virtual y aplicación de interfaces cerebro-ordenador para reconocimiento de estados emocionales y neurológicos

Miguel Ángel Vaquero Blasco

Palabras clave: Realidad Virtual, EEG, BCI, estrés, emociones.

Resumen

Cuando nos imaginamos el futuro, siempre lo hacemos con la certeza de que existirán nuevas tecnologías y formas de comunicarnos. Entre estas tecnologías, la Realidad Virtual permite desarrollar mundos completamente virtuales en los que vemos fácilmente sumergidos e inmersos. De igual forma, existe un gran interés por comprender el cerebro y utilizar su información como una extensión de nuestra propia capacidad. Siguiendo esta línea de pensamiento, resulta sencillo visualizar un futuro donde ambas tecnologías compartan un mismo propósito, creando nuevas realidades capaces de adaptarse a nuestro estado cognitivo y emocional.

Actualmente, un problema inherente a la sociedad es que cuenta con multitud de estímulos, positivos y negativos, que afectan a nuestras emociones. Entre ellas, la más común es el estrés, el cual puede afectar a nuestra concentración y salud. Pese a que debemos ser capaces de gestionar estas emociones, existen personas incapaces de hacerlo. Un ejemplo claro lo encontramos en la educación especial, donde existen terapias para niños que presentan diferentes condiciones y trastornos. A algunos de ellos les imposibilita comunicarse, lo que dificulta saber con certeza la eficacia de la terapia. Así, la posibilidad de evaluar de forma objetiva su estado cognitivo y emocional se convierte en un problema con pocas soluciones actuales.

Por ello, este trabajo se centra en abordar esta problemática, con una solución que involucre Realidad Virtual y el estudio de las señales cerebrales a través de la electroencefalografía. En primer lugar, este proyecto aborda la idea de utilizar la Realidad Virtual como sustituto de algunas de las terapias actuales para reducir el estrés en un centro de educación especial, no solo replicando una terapia existente, sino presentando también una alternativa. Una segunda parte del proyecto estudia la posibilidad de integrar en un sistema como el descrito un modo de reconocer en tiempo real patrones de actividad cerebral asociados a distintos estados emocionales y cognitivos, como el estrés, la imaginación motora y la carga cognitiva. Todo ello con el fin de alterar el entorno virtual para adaptarse a estas nuevas circunstancias.

Finalmente, se espera que este sistema, además de ser útil y relevante en el ámbito de la educación especial, pueda ser aplicado en otras áreas de estudio. Así, campos como la rehabilitación, el marketing o la enseñanza podrían beneficiarse de este tipo de tecnologías que permitan conocer y adaptar las soluciones en tiempo real al estado cognitivo y emocional del usuario final.

Development of Virtual Reality applications and implementation of Brain-Computer Interfaces for neurological and emotional states recognition

Miguel Ángel Vaquero Blasco

Keywords: Virtual Reality, EEG, BCI, stress, emotions.

Abstract

When imaging the future, we always assume the existence of new technologies and ways of communicating. Among these technologies, Virtual Reality allow us to develop complete virtual worlds in which we can easily get immersed and bury ourselves. In the same way, there exists a great interest in understanding the brain and utilizing its information as an extension of our own capacity. Following this thinking line, it becomes easy to visualize a new future where both technologies share a same purpose, creating new realities able to adapt to our cognitive and emotional state.

Currently, an inherent problem in the society is that it is surrounded by a ton of stimulus, either positive or negative, that have repercussion in our emotions. Among them, the most common emotion is stress, which can affect to our concentration and wellbeing. Despite we should be able to manage these emotions, there exist people unable to do it. A clear example of this can be found in the special education area, where there are therapies for children who present different conditions and disorders. Some of them are not able to communicate, fact that can complicate to be certain of the effectiveness of the therapy. So, the possibility of objectively assessing their cognitive and emotional state becomes a challenge with few current approaches.

Therefore, this work is focused on tackle that problematic, with a solution based on Virtual Reality and the study of brain signals through electroencephalography. First, this research focuses on the idea of substituting actual stress-reducing therapies in a local special school through a Virtual Reality proposal. This proposal not only tries to replicate an existing therapy session, but to also offer an alternative. The second part of this project studies the possibility of integrating a system, like the one described earlier, and a way of recognizing in real time brain activity patterns related to different emotional and cognitive states, such as stress, motor imagery and cognitive workload. All of this has the goal of having its impact in the Virtual Reality environment, adapting it to these new circumstances.

Finally, it is expected that this system, beyond of being useful and relevant in the special education field, can be applied in other research areas. Thus, areas such as rehabilitation, marketing or learning could benefit from this type of technologies, allowing them to know and adapt the existing solution in real time, according to the emotional and cognitive end-user state.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mis tutores Christian y Miguel Ángel por su dedicación durante la realización del trabajo.

De igual forma, agradecer a mis compañeros, en especial a Eduardo, su implicación, ayuda y cooperación cuando ha sido necesaria. También agradecerles su paciencia en esos interminables desayunos y sus consejos en muchas ocasiones.

Considero necesario también hacer mención y hacer partícipes de este logro a mis amigos tanto de Almería como de Granada, esa segunda familia que he tenido el privilegio de encontrar y que no solo me ha dado su ánimo durante todo el camino, sino también su cariño y la confianza que muchas veces me ha faltado.

Finalmente, y lo más importante de todo, agradecerle a mi familia, a mi madre y a mi hermano su infinita confianza, su ayuda, por escucharme y aconsejarme continuamente, y por ayudarme en muchos momentos a retroceder dos pasos para ver las cosas desde otra perspectiva. También agradecerles ese apoyo diario desde el principio, enorgulleciéndose más que yo de cada logro y cada paso dado.

A todos vosotros, muchas gracias, este logro os pertenece también.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| 1.1. Las emociones en la actualidad..... | 1 |
| 1.2. El auge de la Realidad Virtual | 2 |
| 1.3. Las interfaces cerebro-ordenador..... | 3 |
| Justificación y objetivos | 5 |
| 2.1. Justificación e hipótesis | 5 |
| 2.2. Objetivos..... | 6 |
| Marco teórico | 9 |
| 3.1. Fundamentos y evolución de la Realidad Virtual..... | 9 |
| 3.1.1. Historia de la Realidad Virtual | 9 |
| 3.1.2. Fundamentos de Realidad Virtual | 11 |
| 3.1.3. Dispositivos comerciales y periféricos | 13 |
| 3.2. Neurometría: bases y conceptos de los BCIs..... | 15 |
| 3.2.1. Principios de la electroencefalografía..... | 15 |
| 3.2.2. El sistema internacional 10/20..... | 17 |
| 3.2.3. Procesamiento de señales EEG..... | 18 |
| 3.2.4. BCI: concepto y clasificación..... | 20 |
| 3.3. Bases del reconocimiento de emociones | 22 |
| 3.3.1. Fundamentos y teorías de las emociones..... | 22 |
| 3.4. Introducción al Machine Learning..... | 24 |
| 3.4.1. Conceptos básicos de Machine Learning | 24 |
| 3.4.2. Clasificación vs Regresión: Clasificadores más utilizados | 25 |
| 3.4.3. Validación cruzada (<i>Cross Validation</i>) | 27 |
| Estado del arte | 29 |
| 4.1. Usos de la Realidad Virtual | 29 |
| 4.2. Revisión de usos de los BCIs..... | 33 |
| 4.3. Reconocimiento de emociones | 35 |
| 4.4. Combinación de las tecnologías y herramientas..... | 38 |
| 4.4.1. BCIs aplicados en entornos de Realidad Virtual..... | 38 |
| 4.4.2. BCIs relacionados con el reconocimiento de emociones | 39 |
| 4.4.3. El uso de la Realidad Virtual en el campo de las emociones | 40 |
| 4.4.4. Tabla resumen..... | 41 |
| Desarrollo experimental I | 45 |
| 5.1. Contexto y objetivos | 45 |

| | | |
|--------|---|------------|
| 5.2. | Metodología..... | 46 |
| 5.2.1. | Participantes | 46 |
| 5.2.2. | Procedimiento experimental..... | 46 |
| 5.2.3. | Diseño experimental..... | 49 |
| 5.2.4. | Procesamiento de señal..... | 52 |
| 5.2.5. | Análisis estadístico | 53 |
| 5.3. | Resultados..... | 55 |
| 5.3.1. | Resultados del primer estudio | 55 |
| 5.3.2. | Resultados del segundo estudio..... | 62 |
| 5.4. | Discusión | 66 |
| 5.4.1. | Discusión resultados primer estudio..... | 66 |
| 5.4.2. | Discusión resultados segundo estudio..... | 68 |
| | Desarrollo experimental II..... | 73 |
| 6.1. | Contexto y objetivos | 73 |
| 6.2. | Arquitectura de la red | 73 |
| 6.3. | Metodología..... | 78 |
| 6.3.1. | Participantes | 78 |
| 6.3.2. | Procedimiento experimental..... | 78 |
| 6.3.3. | Diseño experimental..... | 81 |
| 6.3.4. | Procesamiento de señal..... | 84 |
| 6.3.5. | Algoritmo de clasificación..... | 86 |
| 6.3.6. | Análisis estadístico | 87 |
| 6.4. | Resultados..... | 88 |
| 6.5. | Discusión | 97 |
| | Conclusiones..... | 101 |
| | Anexos..... | 105 |
| | ANEXO I: Ejemplo de árbol de decisión de random forest | 105 |
| | ANEXO II: Ejemplo de archivo de configuración del entorno de RV y posibles configuraciones..... | 106 |
| | Bibliografía..... | 109 |

Índice de figuras y tablas

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Arquitectura del sistema integrado de RV y EEG planteado. Fuentes: Oculus.com/Bitbrain.com | 6 |
| Figura 2. 2. Cronología del trabajo realizado en la tesis doctoral. | 8 |
| Figura 3. 1. Pintura "El festival Qingming junto al río" de Zhang Zeduan. Fuente: Wikipedia.org | 10 |
| Figura 3. 2. A la izquierda, el simulador Blue Box. A la derecha, aeronave "Penguin Trainer" usada para el mismo propósito de entrenamiento. Fuentes: Britannica.com/Wingsofhistory.com..... | 10 |
| Figura 3. 3. A la izquierda, el sistema de RV conocido como "La espada de Damocles". A la derecha, el sistema Virtual Boy de Nintendo..... | 11 |
| Figura 3. 4. A la izquierda, representación gráfica de un sistema CAVE. A la derecha, ejemplo de un Head Mounted Display (HMD) de Oculus (modelo Go) con un controlador simple | 13 |
| Figura 3. 5. Visores HMD y periféricos utilizados en RV. (a) HTC VIVE Pro Eye. (b) Oculus Quest 2. (c) Bhaptics Tactsuit x40. (d) Dexta Robotics Dexmo. (e) KAT Walk. (f) HTC VIVE Tracker. (g) Cybershoes 3D-run. Fuentes: [12]–[17]..... | 15 |
| Figura 3. 6. Gráfica del potencial de acción de una neurona. Fuente: academiaplay.es/neuronas-electricidad/ | 16 |
| Figura 3. 7. A la izquierda, un ejemplo de montaje de un gorro EEG de Bitbrain. A la derecha, el esquema de las áreas del cerebro clasificadas en función de la actividad asociada. Fuentes: bitbrain.com/[22]. | 17 |
| Figura 3. 8. A la izquierda, sistema Internacional de colocación de electrodos 10/20 modificado. A la derecha, vista con el espaciado entre los electrodos, de acuerdo con el mismo sistema. Fuentes: wikipedia.org/[21]..... | 17 |
| Figura 3. 9. Ejemplo de señal EEG sin filtrar y tras la aplicación de un filtro paso banda entre 1 y 50 Hz..... | 18 |
| Figura 3. 10. Ejemplo de coeficientes del kernel (Izquierda) y respuesta en frecuencia (Derecha) de un filtro IIR Butterworth de orden 4 entre 1 y 50 Hz. | 19 |
| Figura 3. 11. Arquitectura clásica de un BCI. Se compone de varios sistemas que actúan en cadena para adquirir señales, procesarlas y reconocer patrones. Figura adaptada de [24]...... | 20 |
| Figura 3. 12. Clasificación de los interfaces BCI, de acuerdo con [25]. | 21 |

| | |
|--|----|
| Figura 3. 13. Esquema de teorías de emociones. Se diferencian dos vertientes principales, una que versa sobre su forma de manifestarse y la otra que aboga por su estructura..... | 22 |
| Figura 3. 14. Cuadrante de Russell o modelo circular de afecto. Divide el espacio en 4 partes, atendiendo a la valencia y excitación de las emociones. | 23 |
| Figura 3. 15. Diferencias entre clasificación y regresión. En la clasificación se intenta predecir la etiqueta de la muestra, mientras que en la regresión se intenta estimar un valor cercano al esperado. Fuente: blogdatlas.wordpress.com. . | 26 |
| Figura 3. 16. Esquema de validación cruzada (Cross Validation). Se destacan los datos usados para evaluar en cada iteración, dejando el resto de datos para entrenar el modelo. Fuente: Wikipedia.org | 28 |
| Figura 4. 1. Entorno virtual desarrollado en [44]. (a) Imágenes de uno de los escenarios. (b) Uso del escenario de control de emociones. | 30 |
| Figura 4. 2. Escenario de Realidad Virtual de una sala de operaciones de neurocirugía. (A) Vista general de la sala y su disposición. (B) Vista rotada y ampliada de la posición del paciente, cirujano, enfermera y microscopio. (C) Representación virtual de exposición craneal con instrumentos. Fuente: [54]. | 31 |
| Figura 4. 3. Escenario virtual de un aula de educación. Fuente: [59]. | 31 |
| Figura 4. 4. A la izquierda, vista de la plataforma OpenSim VR, obtenida de [69]. A la derecha, ejemplo de RV para la inspección virtual de una cámara de combustión, obtenido de [70]. | 32 |
| Figura 4. 5. Arriba, escenario de Realidad Virtual de una experiencia de resonancia magnética, incluyendo el montaje empleado en el espacio real. Abajo, vista del escenario virtual y montaje su montaje real para entrenamiento de trabajadores de construcción ante el riesgo de caídas. Fuentes: [78], [80].. | 33 |
| Figura 4. 6. A la izquierda, potencial P300 obtenido en [94]. La línea roja representa el potencial ante el estímulo deseado, mientras que la verde hace referencia al resultado de mostrar un estímulo no objetivo. A la derecha, el montaje de un teclado de distribución QWERTY basado en potenciales evocados visuales, obtenido de [96]...... | 34 |
| Figura 4. 7. Ejemplo de 5 emociones y 3 acciones para reconocimiento de emociones basado en gestos. Fuente: [121]...... | 37 |
| Figura 4. 8. Ejemplo de grafos del rostro asociados a dos emociones. A la izquierda, emoción de enfado y a la derecha, ejemplo de sentimiento de disgusto. Imágenes obtenidas de [124]. | 37 |
| Figura 4. 9. Imagen obtenida de [133], donde se usa RV para entrenar a personas en el uso de BCIs basados en Imaginación motora, utilizando un escenario de RV con objetos como feedback..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 10. Vista del laberinto desarrollado en [147]. Cada segmento muestra la misma zona, con usando metáforas visuales para representar diferentes emociones. (a) Fuego para enfado. (b) Caída de la noche para miedo. (c) Lluvia para tristeza. (d) Flores para alegría. | 41 |
| Tabla 4. 1. Resumen de los artículos más relevantes de esta sección. (*) La propuesta se encontraba en Desarrollo, por lo que aún no hay métricas de su rendimiento. (**) Se trata de una revisión bibliográfica, por lo que no hay métricas que analizar..... | 43 |
| Figura 5. 1. Diagrama temporal de una sesión correspondiente a cada uno de los estudios. Arriba, el proceso seguido en el primer estudio. Abajo, el análogo del segundo estudio. Fuentes: [138], [139]..... | 47 |
| Figura 5. 2. A la izquierda, imagen de la cámara de seguridad de la sala de cromoterapia. A la derecha, la recreación de la misma imagen en Realidad Virtual. Fuente: [138]..... | 48 |
| Figura 5. 3. Vista del participante de los diferentes escenarios en 360 grados ofrecidos. (a) Playa. (b) Cueva con cascada. (c) Aurora Boreal. (d) El espacio. Fuente: [139]..... | 49 |
| Figura 5. 4. Interfaz del MIST usada durante la fase de estrés. (a) Vista mostrada durante la resolución de las operaciones aritméticas. (b) Vista mostrada durante la encuesta sobre el nivel de estrés. Fuente: [139]. | 51 |
| Figura 5. 5. Evolución temporal del biomarcador del estrés, gamma relativo. El grupo 1 (gráficas superiores) corresponde a los participantes con una respuesta directamente proporcional al nivel de estrés, El grupo 2 (gráficas inferiores) muestra los resultados de los participantes con la respuesta opuesta. En el eje de abscisas se indica el tiempo en minutos, así como los comienzos de las distintas etapas de la sesión. Las zonas sombreadas indican el error estándar de la media (SEM). (a) Grupo de Control. (b) Grupo de Test. Fuente: [138]. | 56 |
| Figura 5. 6. Evolución temporal del gamma relativo en las distintas zonas de interés, promediando los datos de los participantes de los grupos 1 y 2. (a) Grupo de control. (b) Grupo de test. Fuente: [138]. | 57 |
| Figura 5. 7. Gamma relativo de los grupos de control y test, mostrados de forma conjunta. La curva sólida corresponde al grupo de control, mientras que la línea punteada hace referencia al grupo de test. Fuente: [138]. | 57 |
| Figura 5. 8. Ajuste polinómico de grado 6 las curvas del gamma relativo. (a) Grupo de control. (b) Grupo de test. (c) Comparación de las dos curvas obtenidas con el ajuste. Fuente: [138]. | 58 |
| Tabla 5. 1. Coeficiente de correlación de Pearson (PCC) e intervalos de confianza del 95%, entre las curvas promedio del RG del grupo de control y de test, así como de las curvas obtenidas en el ajuste polinómico. Fuente: [138]..... | 59 |

- Figura 5. 9. Respuestas medias de las encuestas SPSL relativas al estrés percibido, realizadas en cuatro instantes de interés (T1 a T4 de la Figura 5.1). Las líneas negras representan la desviación estándar de la media. Los asteriscos (*) indican, para ambos grupos, la existencia de diferencias significativas entre las respuestas dadas en RS1 (T1) y MIST (T2), así como entre las respuestas dadas en MIST (T2) y Relax (T3). Para ello, se usó el test del Wilcoxon signed rank, obteniendo un p-valor < 0.05 . Tras la comparación entre las respuestas de ambos grupos en los mismos instantes, no se encontraron diferencias significativas. En todos los análisis realizados, el nivel de significancia era 0.05 ($\alpha = 0.05$). Fuente: [138]..... 59
- Tabla 5. 2. P-valores obtenidos tras la realización de los test de Wilcoxon signed rank para comparar las respuestas a las encuestas SPSL de los participantes a lo largo del experimento. Se compararon las repuestas entre instantes sucesivos tanto para el grupo de control como el de test. Los asteriscos (*) indican la existencia de diferencias significativas entre los datos. En todos los tests, el nivel de significancia era igual a 0.05 ($\alpha = 0.05$). Fuente: [138]..... 60
- Tabla 5. 3. P-valores obtenidos tras la realización de los test de Wilcoxon signed rank test para comparar las respuestas a las encuestas SPSL de los participantes del grupo de control y de test. Se compararon las respuestas de ambos grupos en cada instante. Fuente: [138]..... 60
- Figura 5. 10. Curva de las respuestas medias a las encuestas de SPSL en los cuatro instantes de interés. Se calculó de forma adicional el valor medio del gamma relativo en el minuto que precedía a cada encuesta. No se incluyen unidades en el eje de ordenadas debido a que las magnitudes de ambas curvas eran distintas. (a) Grupo de control. (b) Grupo de test. Fuente: [138]. 61
- Figura 5. 11. Respuestas medias a la encuesta de satisfacción de la experiencia de Realidad Virtual. Las líneas negras indican la desviación estándar de la media. En el eje de abscisas se indican los tres puntos sobre RV evaluados (confort, inmersión y experiencia general). El eje de ordenadas indica la evaluación dada por los participantes, desde 1 (mínimo) hasta 5 (máximo). Adicionalmente, la totalidad de los participantes indicó que repetiría la experiencia. Fuente: [138]. 61
- Figura 5. 12. Evolución temporal del gamma relativo medio de todos los participantes. La zona sombreada indica el error estándar de la media (SEM) obtenido. En el cómputo de esta curva, solo se consideró la fase de test del MIST, obviando los 3 minutos previos de entrenamiento. Fuente: [139]..... 62
- Figura 5. 13. Evolución del gamma relativo medio de los participantes de cada una de las cuatro experiencias de 360 grados. La zona sombreada corresponde al error estándar de la media (SEM). (a) Experiencia de la playa. (b) Experiencia de la cueva con cascada. (c) Experiencia de la aurora boreal. (d) Experiencia del espacio. Fuente: [139]..... 63
- Figura 5. 14. Comparación de las curvas del gamma relativo de las cuatro experiencias de 360 grados. La línea sólida corresponde a la experiencia de la cascada; la punteada, la de la aurora boreal; la discontinua hace referencia a la

| | |
|--|----|
| experiencia de la playa; la punteada y discontinua, a la experiencia del espacio. Fuente: [139]..... | 63 |
| Tabla 5. 4. P-valores arrojados por los test de Wilcoxon rank sum realizados para comparar las respuestas a las encuestas de SPSL durante la fase de relajación, comparando todas las experiencias de 360 grados ofrecidas. Cada fila corresponde a la comparación entre las encuestas de dos de las experiencias y las columnas al instante de la encuesta. Fuente: [139]. | 64 |
| Tabla 5. 5. P-valores obtenidos con el test de Wilcoxon signed rank para comparar las respuestas de las encuestas de SPSL a lo largo de la sesión experimental. Los asteriscos (*) indican la existencia de diferencias significativas entre los dos conjuntos de datos. En todos los tests, el nivel de significancia era igual a 0.05 ($\alpha = 0.05$). Fuente: [139]..... | 64 |
| Figura 5. 15. Promedio de las respuestas de todos los participantes a las encuestas de SPSL. Las líneas verticales negras indican la desviación estándar de la media. Los asteriscos (*) indican la existencia de diferencias significativas, de acuerdo con los datos de la Tabla 5.5 (p-valor < 0.05). En este caso, existen diferencias entre T1-T2, entre T2-T3, entre T4-T5 y entre T5-T6. Fuente: [139]..... | 65 |
| Figura 5. 16. Promedio normalizado de las respuestas a las encuestas de SPSL, así como del valor del gamma relativo en el minuto que precede a cada una de las encuestas. Fuente: [139]. | 65 |
| Figura 5. 17. Respuestas medias a la encuesta de satisfacción de la experiencia de Realidad Virtual. Las líneas negras indican la desviación estándar de la media. En el eje de abscisas se indican los tres puntos sobre RV evaluados (confort, inmersión y experiencia general). El eje de ordenadas indica la evaluación dada por los participantes, desde 1 (mínimo) hasta 5 (máximo). Adicionalmente, la totalidad de los participantes indicó que repetiría la experiencia. Fuente: [139]. | 66 |
| Figura 6. 1. Arquitectura del sistema de adquisición y procesamiento de EEG. Fuente de las imágenes: bitbrain.com | 74 |
| Figura 6. 2. Arquitectura del entorno de Realidad Virtual desarrollado. Fuente de las imágenes: oculus.com/unity.com | 74 |
| Figura 6. 3. Arquitectura completa del entorno integrado de Realidad Virtual y EEG. Fuentes de las imágenes: bitbrain.com/oculus.com..... | 75 |
| Figura 6. 4. Diagrama de estados de los distintos componentes del sistema completo durante el ciclo de ejecución, incluyendo los mensajes enviados entre cada uno de ellos. Las líneas sólidas hacen referencia a las transiciones entre los estados, mientras que las líneas discontinuas indican los pasos de los mensajes..... | 76 |
| Figura 6. 5. Diagrama del ciclo de paso de mensajes del sistema completo. Este flujo de | |

mensajes se repite de forma cíclica durante toda el tiempo de ejecución. .. 77

- Figura 6. 6. Comunicación TCP entre el servidor RV y el cliente RV. Además del establecimiento de conexión (1), se muestran algunos mensajes enviados durante la conexión (2), con información el entorno..... 77
- Figura 6. 7. Petición de envío de los datos procesados en el servidor EEG al servidor RV y su respuesta, haciendo uso del método POST del protocolo HTTP. La parte sombreada indica los datos procedentes del procesamiento EEG enviados al servidor RV..... 77
- Figura 6. 8. Diagrama temporal de la sesión experimental. 78
- Figura 6. 9. Ejemplo y detalle de un participante con el gorro de EEG y el HMD colocados. 79
- Figura 6. 10. A la izquierda, vista del participante durante la prueba de imaginación motora. La flecha indica la dirección de la imaginación motora (mano derecha en este caso). A la derecha, la vista del participante durante la prueba de atención visual, durante uno de los trials del nivel 2..... 80
- Figura 6. 11. Vista aérea de la ambientación del entorno virtual durante la fase de relajación..... 80
- Figura 6. 12. Arquitectura específica utilizada durante la realización de las sesiones experimentales. En este caso, tanto el servidor EEG como el servidor RV se alojaron en la misma máquina. 81
- Figura 6. 13. Ejemplo de un trial de imaginación motora. Tras la aparición de la cruz para centrar la atención y la flecha indicando la mano con la que realizar la imaginación, se actualiza la puntuación. 82
- Figura 6. 14. Ejemplo de distribución de las pelotas de colores en cada uno de los niveles de dificultad o nivel de carga..... 83
- Tabla 6. 1. Valores de hiperparámetros considerados en el proceso de validación cruzada. 87
- Figura 6. 15. Evolución temporal del gamma relativo, biomarcador del estrés. Corresponde a la media de las curvas de todos los participantes. Las zonas sombreadas delimitan el error estándar de la media. 89
- Figura 6. 16. Media por ronda de la estimación de los resultados obtenidos durante la prueba de imaginación motora..... 89
- Figura 6. 17. Histograma con la estimación de la distribución de los resultados de todas las rondas y participantes..... 90
- Figura 6. 18. Importancia de todas las características extraídas para la clasificación. El nombre de la característica referencia a la banda de potencia que representa, salvo en el caso de 'RG' que indica que se trata del gamma relativo. Los números 1 y 2, de igual forma, indican si el cómputo de la potencia de esa

| | |
|---|-----|
| banda se realizó usando los canales prefrontales y frontales, o los occipitales, respectivamente. | 91 |
| Tabla 6. 2. Resumen de la precisión media alcanzada por los clasificadores obtenidos durante el proceso de validación cruzada. Se muestra la media y desviación estándar. | 92 |
| Figura 6. 19. Matrices de confusión de los participantes S02, S03, S04, S06, S07 y S08. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto). | 93 |
| Figura 6. 20. Matrices de confusión de los participantes S09, S10, S11, S12, S13 y S14. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto). | 94 |
| Figura 6. 21. Matrices de confusión de los participantes S15, S16, S17, S18, S19 y S20. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto). | 95 |
| Figura 6. 22. Matrices de confusión de los participantes S21 y S22. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto). | 96 |
| Figura 6. 23. Matriz de confusión global obtenida con el promedio de los datos de todos los participantes. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre la matriz se indica, además, la precisión media y desviación de todos los participantes. | 96 |
| Anexo 1. 1. Árbol de decisión usado por el clasificador random forest del sujeto S22. Cada color representa una categoría de la clasificación: marrón para el nivel 'Base', verde para el nivel 'L1', azul para el nivel 'L2' y morado para el nivel 'L3'. | 105 |

| | |
|---|-----|
| Anexo 2. 1. Ejemplo de archivo de configuración del entorno de RV..... | 106 |
| Anexo 2. 2. Tabla con las distintas configuraciones disponibles para cada estímulo y característica EEG | 107 |

Al creer apasionadamente en algo que todavía no existe, lo creamos. Lo inexistente es todo lo que no hemos deseado lo suficiente.

Franz Kafka

Introducción

1.1. Las emociones en la actualidad

El ser humano ha de entenderse como un sistema complejo, provisto de razón y de emociones, entre otros tantos factores. Esta complejidad nos obliga, no solo a entender a las personas, sino también a analizarlas desde diferentes puntos de vista, desde el plano más racional hasta el más sentimental. Los sentimientos y las emociones son factores, a menudo devaluados e infraestimados, que intervienen en todos los aspectos de la vida diaria, la toma de decisiones, la forma de enfocar un problema, los resultados obtenidos, etc. Es preciso, por ello, comprender este plano emocional y adaptar las soluciones actuales al mismo.

Es importante comprender la naturalidad de sentir, reaccionar e incluso tomar decisiones únicamente motivados por nuestras emociones. A pesar de la imposibilidad de otorgar una definición consensuada de las emociones, estas son descritas en [1] como “[...] *reacciones de valencia ante eventos, agentes, u objetos, cuya naturaleza particular se halla determinada por la forma en la que la situación que provoca es construida.*”. Es decir, tenemos que entender las emociones como algo propio y único, consecuencia directa de cómo percibimos las situaciones y cómo estas determinan, en numerosas ocasiones, las decisiones que tomamos.

Una de las emociones más representativas de la sociedad en la actualidad es, sin duda alguna, el estrés. Un estudio realizado por el instituto americano del estrés [2] (AIS por sus siglas en inglés) reveló en 2014 que más de un 70% de la población había sufrido regularmente síntomas tanto físicos como psicológicos provocados por este. Estas cifras se tradujeron en un gasto anual estimado de 300 mil millones de dólares solo en concepto de días laborables perdidos y atención médica requerida, todo ello relacionado con este problema. Este estrés se puede manifestar como fatigas (51% de los encuestados), dolores de cabeza (44%), problemas estomacales (34%) o tensión muscular (30%) entre muchos otros.

A estos datos hay que sumar la situación excepcional de vivir una crisis sanitaria sin precedentes en los últimos años, lo que ha llevado consigo el paso por una enfermedad y la pérdida de muchas vidas, así como las medidas de contención tomadas para frenar su avance: cierres perimetrales, toques de queda, estados de alarma y el confinamiento de toda la población. Todo esto no hace sino agravar la problemática que el estrés genera en la gente, repercutiendo directamente en su salud y en su vida laboral y personal. Se estima que las tasas de estrés postraumático quintuplicaron su valor respecto a las cifras reportadas habitualmente por la Organización Mundial de la Salud, durante este periodo de pandemia [3].

Finalmente, es preciso señalar la gran importancia que la salud mental debería tener en la sociedad actual, dados los hechos expuestos sobre esta problemática. Considerando

los números aportados, se evidencia la necesidad de contribuir con nuevas y más eficientes herramientas para ayudar en el correcto desarrollo emocional de las personas, así como fomentar la preocupación por tener una mejor gestión de nuestros propios sentimientos y emociones.

1.2. El auge de la Realidad Virtual

El término “Realidad Virtual” o RV, dado su acrónimo, fue acuñado a finales de los años 80 por Jaron Lanier junto con Tom Zimmerman, desarrollando lo que se conoció como “el guante de datos” [4]. Tras muchos años de avances, se ha impuesto como una tecnología a la orden del día, principalmente relacionada con la industria de los videojuegos. Entendemos por Realidad Virtual aquella tecnología capaz de crear, mediante técnicas informáticas, entornos que consigan “engañar” al usuario final y le generen una sensación de inmersión. No obstante, su uso es mucho más extendido, pese a esa relación directa con un ámbito más lúdico.

Debido a esa *vox populi* que otorga a la Realidad Virtual una funcionalidad directamente aplicada a los videojuegos, pasa desapercibida la gran variedad de áreas donde tiene cabida su uso y permite aportar nuevas y más efectivas soluciones. Entre ellas destaca la enseñanza, el marketing o su uso para el tratamiento de diversas fobias, ansiedad, o estrés postraumático. También es popular su uso para ayudar a preparar a profesionales de diversas áreas (desde la construcción hasta la cirugía), así como su extensión al ámbito de la rehabilitación de distintas dolencias o accidentes.

Por otra parte, merece la pena destacar que, debido a la amplia gama de dispositivos y marcas que ofertan este tipo de tecnología, encontramos visores de Realidad Virtual y periféricos a un cada vez más reducido precio. Esto permite que las soluciones desarrolladas bajo la premisa de usar esta tecnología tengan un alcance mucho mayor, llegando de forma más sencilla a aquellos entornos que puedan beneficiarse de la misma. Además, la tendencia a eliminar cualquier tipo de conexión tradicional o en forma de cable permite que este uso se pueda producir en cualquier entorno, con una independencia casi total del resto de medios con los que se cuente.

Todo esto ha convertido a la Realidad Virtual en una tecnología totalmente actualizada y en constante reinversión y uso. Cada vez se busca mejorar la tecnología para aumentar el grado de inmersión, el realismo o las capacidades de interacción con el mundo desarrollado. Esto permite que se acerque a ámbitos no antes considerados ya que, entre otras tendencias, resuena la intención de virtualizar diversos servicios y ofrecer nuevas experiencias basadas en este sistema como puede ser el caso de un coreógrafo que lo introdujo en un espectáculo de ballet [5].

En conclusión, resulta innegable que el uso de la Realidad Virtual está cada vez más extendido y trae consigo la posibilidad de generar nuevas y mejores soluciones, capaces de ofrecer nuevas experiencias al usuario y, por tanto, abriendo la puerta a mejoras en infinidad de campos.

1.3. Las interfaces cerebro-ordenador

Las interfaces cerebro-ordenador, comúnmente conocidas como *Brain-Computer Interfaces* o, simplemente, BCI, han sido descritas en [6] como “[...] un dispositivo que provee al cerebro de un sistema de comunicación y un canal de control nuevos y carente de una implicación muscular.”. Es decir, los BCIs permiten la comunicación con un dispositivo únicamente empleando patrones derivados de la actividad cerebral.

Esta forma de comunicación se concibió como una herramienta para ayudar a personas que carecían de los medios para comunicarse de una forma convencional, debido a cualquier tipo de accidente, diversidad funcional o daño cerebral. Además, cabe señalar que la puesta en marcha de un interfaz BCI involucra la medición y detección de patrones en la actividad cerebral analizando los datos medidos mediante Electroencefalografía – en adelante, EEG –, una tarea que no resulta sencilla. Todo ello da como resultado un medio de comunicación pobre, entendiéndolo como un sistema incapaz de generar grandes cantidades de información o de *bitrate* muy reducido (apenas 100 bits por minuto). Esto no lo desacredita como una herramienta muy útil, aunque limita su aplicación solo a aquellos casos donde quede patente la imposibilidad de comunicación de ninguna otra forma.

A pesar de ello, los interfaces BCI pueden ser aplicados a multitud de campos, más allá de su uso en casos como los mencionados. Un interfaz BCI implica la adquisición, tratamiento y evaluación de la actividad cerebral, lo que permite extraer información sobre nuestro estado cognitivo o incluso emocional. Es decir, posibilita obtener de forma directa información muy valiosa del usuario, sin que esta pueda ser modificada o juzgada de forma subjetiva e imprecisa. Esto lo convierte en una herramienta con mucho potencial, susceptible de ser aplicada a numerosos campos.

Actualmente, los interfaces BCI han cobrado fuerza a nivel mediático consolidándose nuevamente como tecnología en auge, considerando todos los años de investigación y desarrollo que le preceden. Numerosas personalidades actuales se han hecho eco de este auge y planean diversos escenarios de uso de los BCI, entre los que destacan su aplicación en el mundo de los videojuegos [7], o la empresa de neurotecnología *Neuralink* [8]. Así, se plantea la posibilidad de definir avatares acordes a nuestra personalidad o incluso conectar nuestro cerebro a la red y ampliar nuestras capacidades cognitivas.

Sin embargo, estas declaraciones han de entenderse como un reflejo del interés por esta tecnología y no tanto como una previsión fidedigna de sus prestaciones. Aun así, se manifiesta, no solo el interés que hay por los BCIs, sino también el potencial que tienen en diversas ramas de conocimiento ya sea el neuromarketing, la medicina y rehabilitación o su aplicación en la descripción y clasificación de las emociones.

Justificación y objetivos

2.1. Justificación e hipótesis

Una vez comprendido el contexto en el que se pretende ubicar este proyecto, resulta más sencillo justificar su necesidad. Así, se evidencia la necesidad de dar una solución a la creciente demanda de un sistema que aúne nuevas tecnologías como son la Realidad Virtual y el uso de la actividad cerebral del propio usuario para modular el entorno que se desarrolle. Así mismo, la posibilidad de desarrollar un sistema accesible a través de la red para su uso y/o exportación a cualquier sistema que cuente con una conexión de red amplia no solo la accesibilidad a dicho sistema, sino la capacidad de cómputo que este pueda tener.

Adicionalmente, se le está dando una mayor importancia a las emociones y al papel que juegan en nuestra vida diaria. Se puede afirmar que el estrés juega un papel esencial en el día a día y cada vez más gente se ve condicionada por sus efectos. Esto no hace sino secundar la necesidad de un trabajo de estas características, que pueda ofrecer ventajas en diversos campos, como el entrenamiento de profesionales que necesiten modular su nivel de estrés (cirujanos, bomberos, etc.), conocer el impacto de las soluciones actuales en áreas como la rehabilitación o educación, o como una herramienta adicional para aquellos casos donde las soluciones convencionales no puedan resultar tan efectivas, como puede ser el caso de la educación especial.

Respecto al último caso de estudio, cabe destacar que la educación especial se caracteriza por ser una educación muy individualizada, totalmente personalizada para cada niño, haciendo un especial hincapié en aquellos mecanismos que puedan estimular sus sentidos en mayor medida. Aun así, no son extraños los casos en los que no es posible conocer de forma directa cómo afectan dichas terapias en cada caso concreto, principalmente por una incapacidad del niño a la hora de manifestarlo. En la mayoría de los casos, los terapeutas y expertos han de interpretar los distintos comportamientos del niño y establecer conclusiones en base a los mismos, lo cual puede estar en ocasiones sujeto a errores de interpretación que pueden ir en detrimento de la propia terapia. Todo ello lo convierte en un campo donde la implantación de un sistema con las características presentadas podría jugar un papel clave y totalmente necesario en este tipo de educación.

Con todo lo anterior expuesto, la hipótesis de partida del presente proyecto se plantea de la siguiente forma: ¿Es posible la integración en tiempo real de las interfaces BCI y la Realidad Virtual para desarrollar un entorno completamente inmersivo donde la actividad cerebral asociada al estado cognitivo y a las emociones jueguen un papel determinante? ¿Es posible su adecuación para su uso con herramientas propias de la educación especial?

Así, la hipótesis plantea un escenario de uso para un sistema de RV en combinación con interfaces BCI (Figura 2.1) que permita la adecuación de un entorno inmersivo a las terapias desarrolladas para la educación especial. Esto, sin embargo, no exime a este

sistema de ser implementado en otros contextos o situaciones, pues, a pesar de intentar dar solución a una problemática concreta, se plantea como una herramienta capaz de usar los datos de la actividad cerebral en tiempo real, con independencia del propósito de uso.

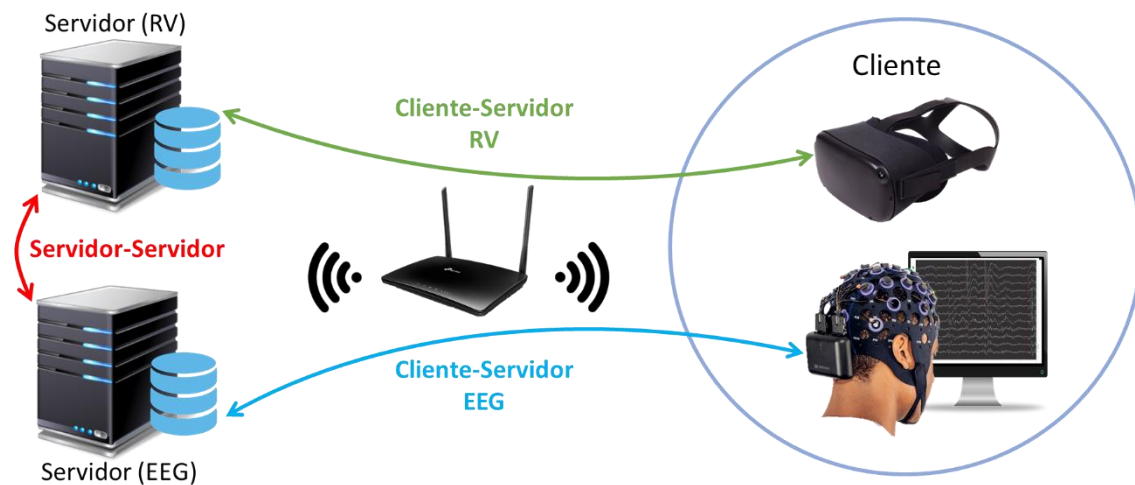


Figura 2.1. Arquitectura del sistema integrado de RV y EEG planteado. Fuentes: Oculus.com/Bitbrain.com

2.2. Objetivos

Para demostrar la viabilidad de la hipótesis planteada en el apartado previo, se pretende desarrollar un proyecto que contemple tres objetivos principales, si bien cada uno de ellos requerirá del cumplimiento de distintos requisitos u objetivos secundarios:

- **Objetivo 1:** Demostrar la viabilidad de usar la Realidad Virtual para replicar una terapia convencional de relajación y evaluar sus prestaciones en comparación con su análogo tradicional. Para ello, se consideran los siguientes objetivos particulares:
 - Replicar con Realidad Virtual una terapia existente basada en cambios cromáticos de la luz. Será necesario para ello cumplir con los requisitos de la terapia actual para conseguir una experiencia lo más cercana posible.
 - Realizar un diseño experimental que avale la propuesta en base al análisis y medida de datos EEG adquiridos durante las sesiones experimentales, comparando para ello datos de personas que experimenten la terapia tradicional con datos de sujetos que participen en la propuesta.
- **Objetivo 2:** Proponer y evaluar una nueva terapia basada en Realidad Virtual y en videos inmersivos de 360 grados que permita alcanzar resultados similares a los alcanzados con las terapias cromáticas tradicionales. En este caso, se tratará de una propuesta distinta a la anterior, pues no estará basada en ninguna terapia existente. Para ello, será necesario:

- Diseñar esta nueva terapia de relajación basada en RV y se preparará un escenario que permita evaluar sus prestaciones, de forma similar al desarrollo experimental propuesto en el primer objetivo.
- Adquirir y analizar las señales EEG provenientes de los sujetos que experimenten con nuestra propuesta, obteniendo los datos necesarios para evaluar y validar el sistema desarrollado.
- **Objetivo 3:** Desarrollar y poner en marcha un sistema integrado de Realidad Virtual y EEG que permita obtener en tiempo real datos acerca del estado emocional y cognitivo del usuario, siendo esta información susceptible de ser usada en el propio entorno en tiempo real. Para ello, se seguirán los siguientes pasos:
 - Desarrollar y poner en marcha un entorno de Realidad Virtual basado en un paradigma cliente-servidor que pueda modificar su comportamiento en tiempo real en función de las directrices de este mismo servidor.
 - Diseñar y poner en marcha un paradigma cliente-servidor EEG que procese en tiempo real la respuesta electrofisiológica de un usuario y extraiga diversas características de esta.
 - Integración final de los sistemas desarrollados en los dos primeros pasos. Como resultado, deberá obtenerse un sistema de RV capaz de recibir información procedente del EEG del usuario y la utilice en tiempo real en dicho entorno, completando el ciclo propuesto y consiguiendo la modulación en función de la actividad cerebral.
 - Plantear y llevar a cabo un paradigma experimental que permita evaluar las prestaciones del sistema completo, así como su impacto en el estado emocional y cognitivo del usuario final.

Para la consecución de estos objetivos se propone una metodología en la que es posible diferenciar dos etapas, que permiten abarcar por un lado los dos primeros objetivos, y, por otro, el tercero. Se entiende, por tanto, que estas dos etapas son el reflejo de todo el trabajo realizado, mostrando cada una de ellas una parte del mismo, de forma secuencial. Estas etapas se describen a continuación:

- **Primera etapa:** abarca el desarrollo de los dos sistemas de Realidad Virtual demandados por los objetivos principales 1 y 2. Dada su similitud a la hora de diseñar y evaluar las propuestas, la metodología planteada es muy similar en ambos casos, si bien cada uno de ellos tiene un fin distinto. Es por ello por lo que se consideran dentro de un mismo bloque metodológico y se presenten en una misma sección.
- **Segunda etapa:** implica todo el desarrollo y puesta en marcha de los sistemas requeridos en el tercer objetivo. Este objetivo, como se aprecia en su descripción, implica el desarrollo de varios sistemas (EEG y RV) que interactúan entre sí, siendo necesario ubicar dicho objetivo en una etapa independiente del desarrollo.

De esta forma, la metodología se compone necesariamente de dos partes, cada una de ella ligada a los objetivos descritos y permitiendo además entender de forma más sencilla la cronología del trabajo realizado. La cronología completa del trabajo de tesis doctoral realizado se muestra en la Figura 2.2.

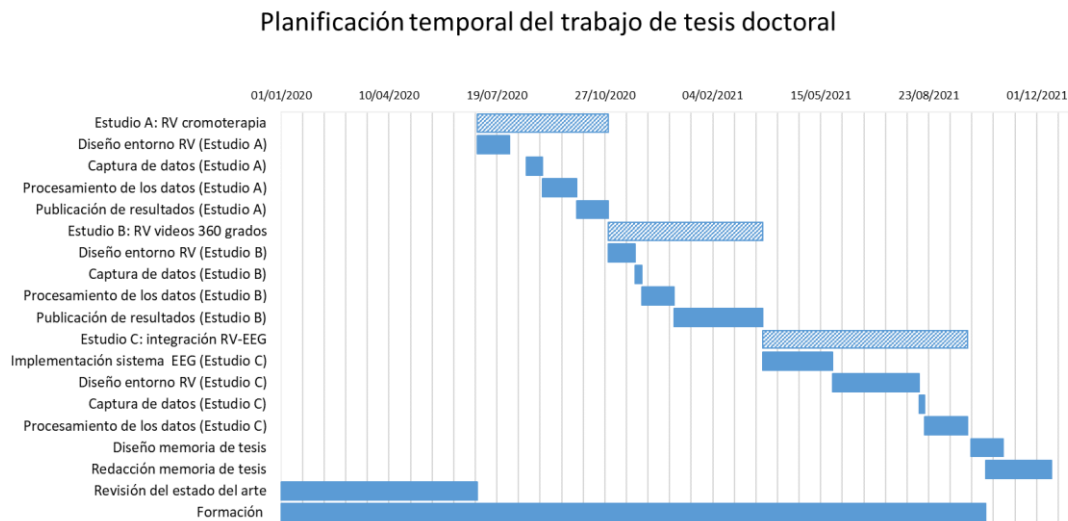


Figura 2. 2. Cronología del trabajo realizado en la tesis doctoral.

Finalmente, el resto del documento se estructura como sigue: en primer lugar, se presentará tanto el marco teórico como el estado del arte de las principales áreas de estudio que aborda este trabajo. Posteriormente, se detallarán las dos partes del desarrollo experimental, indicando en cada uno de ellos los objetivos, metodología y resultados obtenidos. Para concluir, se dedicará un último capítulo a las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto.

Capítulo 3

Marco teórico

A lo largo del tercer capítulo, se tratarán los conceptos fundamentales de aquellos temas considerados relevantes para la realización y comprensión de este trabajo. En concreto, este capítulo servirá como marco teórico para la Realidad Virtual, la neurometría y las emociones, siendo estos temas los pilares sobre los que se sustenta este proyecto. En adición, una última sección versará sobre los fundamentos y el uso del Machine Learning, pues estos conocimientos han sido demandados durante la última etapa del desarrollo experimental.

3.1. Fundamentos y evolución de la Realidad Virtual

La Realidad Virtual, tal y como se ha descrito en este documento, es considerada como todo aquel entorno, desarrollado mediante herramientas informáticas, capaz de “engañar” al usuario final y producirle una sensación de inmersión. Comúnmente, la Realidad Virtual está directamente asociada a un visor colocado sobre los ojos y que sirve como herramienta para presentar el entorno desarrollado. Sin embargo, existen numerosos medios de creación y presentación de estos entornos. En lo sucesivo, se desarrollarán los fundamentos y se proporcionarán ejemplos de ellos.

3.1.1. Historia de la Realidad Virtual

Considerando la definición de Realidad Virtual aportada, existe alguna representación artística susceptible de ser considerada como una precursora de la RV, dado su carácter inmersivo. De acuerdo con [4], la pintura panorámica de Europa del siglo XIX es una técnica artística apodada como la prehistoria de la Realidad Virtual, pues podría entenderse como un primer esbozo de aplicar esa concepción de inmersión. Se destaca de hecho al artista chino conocido como Zhang Zeduan (1085-1145) como precursor de esta técnica, siendo el autor de la obra “El festival Qingming junto al río” (Figura 3.1), realizado en un rollo de 528,7 x 24,8 centímetros. Este se concibió como una escena de la vida diaria de la gente durante el periodo Song.



Figura 3. 1. Pintura "El festival Qingming junto al río" de Zhang Zeduan. Fuente: Wikipedia.org

No obstante, pese a que esta técnica podía producir una ligera sensación de inmersión en aquellas personas que la contemplasen, no se tiene en consideración en la línea cronológica de la Realidad Virtual definida en [9]. Este autor determina que los comienzos de la RV se sitúan en 1916, con una patente concedida a un visor de periscopio montado sobre la cabeza, una idea de Albert B. Pratt. Esta idea sería el comienzo de distintos avances a lo largo de más de un siglo, entre los que se destacan algunos de ellos, pues una descripción completa de todos ellos no sería abarcable.

En 1929, Edward Link ideó el primer simulador de vuelo mecánico, llamado *Link Trainer* o *Blue Box*, que adoptaba de forma muy temprana algunos conceptos actuales de RV. Se concibió como un *cockpit* – cabina de aviación – que replicaba todos los paneles de instrumentación necesarios para preparar a futuros aviadores. Con este invento, se prescindía de la necesidad de realizar las prácticas en aeronaves reales y cumplió dicho propósito entrenando a no menos de medio millón de soldados.

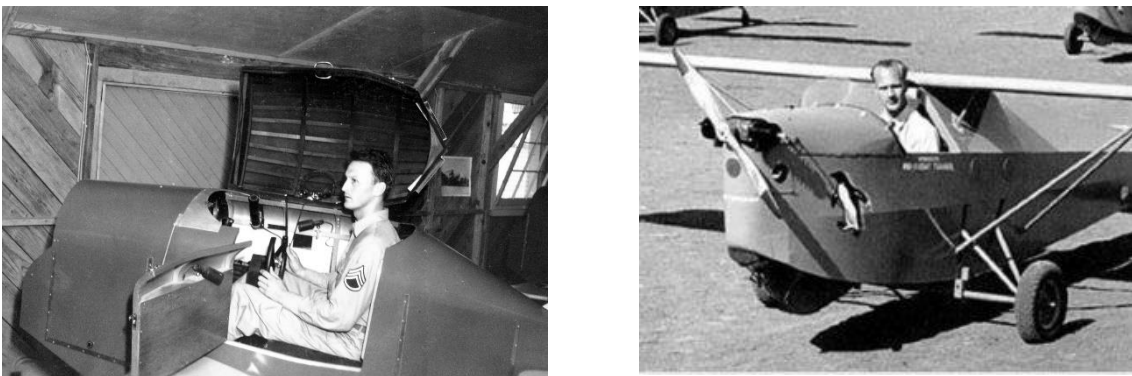


Figura 3. 2. A la izquierda, el simulador Blue Box. A la derecha, aeronave "Penguin Trainer" usada para el mismo propósito de entrenamiento. Fuentes: Britannica.com/Wingsofhistory.com

En 1963, Ivan Sutherland crea la primera aplicación de gráficos generados por ordenador interactiva, el *Sketchpad*. En esta aplicación, era posible dibujar usando de forma conjunta un teclado y un lápiz especial que emitía luz. En 1968, Ivan también

publicaría “*A Head-mounted Three-Dimensional Display*”, donde desarrollaría la idea de un visor de Realidad Virtual capaz de presentar dos imágenes distintas, una para cada ojo, usando la tecnología de tubos de rayos catódicos. También contaría con un sistema de posicionamiento mecánico y por ultrasonidos. Este sistema sería apodado como “La espada de Damocles” (Figura 3.3 izquierda).

En 1984, se acuñaría la primera definición de Realidad Virtual, de la mano de Jaron Lanier. A su vez, comenzaría una etapa de gran avance para los sistemas 3D y en especial, de la industria de los videojuegos. Durante las décadas de los 80 y 90 aparecerían diversos proyectos y empresas dedicadas al desarrollo de aplicaciones 3D interactivas, entre ellas Autodesk, cuyas herramientas software son muy usadas en la actualidad. También surgirían multitud de periféricos de Realidad Virtual enfocados a los videojuegos, como el *PowerGlobe* de la compañía Mattel, o la consola de Nintendo, *Virtual Boy* (Figura 3.3 derecha), un visor monocromático de estética similar a los actuales visores RV. Pese a su novedad, fue considerado un fracaso comercial.



Figura 3. 3. A la izquierda, el sistema de RV conocido como "La espada de Damocles". A la derecha, el sistema Virtual Boy de Nintendo.

Finalmente, desde comienzos del siglo XXI, la mayor parte de los esfuerzos han ido destinados a la mejora de los visores de Realidad Virtual, ofreciendo una cada vez mayor oferta de dispositivos, tanto dispositivos independientes como aquellos que se conectan a un ordenador y sirven para presentar los contenidos. Entre ellos se destacan empresas como Oculus, HTC o Valve, cada una con un catálogo bastante amplio de dispositivos de diferentes gamas y precios.

3.1.2. Fundamentos de Realidad Virtual

La Realidad Virtual no es sino una de las opciones dentro de lo que se conoce como Realidad Extendida, o XR, por su traducción al inglés. Llamamos Realidad Extendida a todas aquellas formas que permiten mezclar realidad y ficción, ya sea ampliando el mundo real o creando desde cero un entorno completamente inmersivo. Entre estas formas de extender la realidad se incluye la Realidad Virtual, aunque también destacan la Realidad Aumentada, o la Realidad Mixta. La Realidad Aumentada se compone de diferentes medios para ampliar la información que tenemos del mundo real,

principalmente en forma de texto o imágenes superpuestas sobre objetos o situaciones del mundo real. Sin embargo, no permite la interacción con ninguno de estos elementos, pues están concebidos solo para ofrecer información.

La Realidad Mixta, en cambio, es un paso intermedio entre la Realidad Virtual y la Aumentada, pues añade objetos o información al mundo real, pero permite una interacción con ellos. Así, es posible interactuar con objetos virtuales dentro de un contexto real, de ahí que se sitúe de forma equidistante a las otras realidades descritas. La Realidad Extendida, por tanto, es “*un término referido a todos aquellos entornos, reales y virtuales, combinados, así como a la interacción persona-máquina generada por ordenador y por dispositivos wearables*” [10]. También es entendida como una evolución necesaria de las actuales tecnologías de Realidad Virtual donde tengan cabida todas aquellas características que puedan ser relevantes en dicha realidad (olores, sonidos, emociones, ...), como se sugiere en [11].

Centrándonos en la Realidad Virtual, como ya se ha comentado, se concibe como un entorno completamente virtual que produce una sensación de inmersión y con el que se puede interactuar. Sin embargo, para conseguir esto no necesariamente se tiene que recurrir a un visor similar a los dispositivos comerciales. Existen diversas formas de genera una experiencia virtual, si bien pueden tener un mayor o menor efecto de inmersión. Las más importantes se listan a continuación:

- ***L-Display o semi-cave:*** esta forma de presentar un mundo virtual consiste en la unión de dos pantallas posicionadas en forma de “L”, es decir, formando un ángulo de 90 grados. Así, se colocan justo en frente del usuario de forma que, al proyectar las imágenes en cada una de ellas, estas se combinen y actúen como una única pantalla, dando cierta sensación de profundidad e inmersión. Este sistema suele ir acompañado de una cámara que registra la posición de la cabeza del usuario, de forma que la imagen presentada se adecúa a la posición de esta y pueda seguir sus movimientos. Considerando el resto de las alternativas que existen, si bien es una de las soluciones más baratas y sencillas de utilizar, no resulta eficiente, produciendo una carencia en la sensación de inmersión.
- ***Sistema CAVE:*** sus siglas hacen referencia a *Cave Automatic Virtual System*. Esta tecnología de Realidad Virtual se considera como la evolución de los sistemas *L-Display*. En este caso, se presenta como una sala conformada por varias pantallas dispuestas en forma de cubo o sala cerrada y en cuyo interior se sitúa el usuario, como se representa en la Figura 3.4. Al reproducir el contenido en todas las pantallas que conforman la sala, de forma conjunta, se crea un escenario virtual que rodea por completo al usuario, generando en él una sensación completa de inmersión. Entre sus desventajas se encuentra su coste económico, que puede llegar a ser muy elevado, además de requerir de un espacio físico suficiente para su despliegue.
- ***Head Mounted Display o HMD:*** los HMD se han consolidado como la solución más usada, tanto a nivel científico, como a nivel comercial. Se entiende por HMD un dispositivo colocado directamente sobre la cabeza del usuario (un ejemplo de visor se muestra en la Figura 3.4). Este visor cuenta con dos pantallas independientes que reproducen imágenes, cada una de ellas situadas delante de cada ojo. Así, cada nueva imagen se renderiza desde dos

perspectivas diferentes, que simulan ser cada uno de los ojos. Ambas imágenes se reproducen en el visor y, combinando ambas, se consigue crear una imagen estereoscópica, integrando ambas escenas como una imagen tridimensional y produciendo una “falsa” sensación de profundidad. Además, los visores suelen integrar un sistema de audio que reproduce sonidos alrededor de la cabeza del usuario. Todo ello en combinación se consolida como una de las experiencias más completas e inmersivas, a un precio más asequible que los sistemas CAVE. En la actualidad, existen numerosas empresas dedicadas a la venta de este tipo de dispositivos, como Oculus, HTC o Valve. Todos ellos suelen incorporar uno o dos controladores manuales para interactuar con el entorno virtual, incluyendo en los dispositivos de gama más alta, además, funcionalidades como control de la presión ejercida en el controlador o incluso actuadores hápticos, enfocados a producir estímulos táctiles en el usuario.

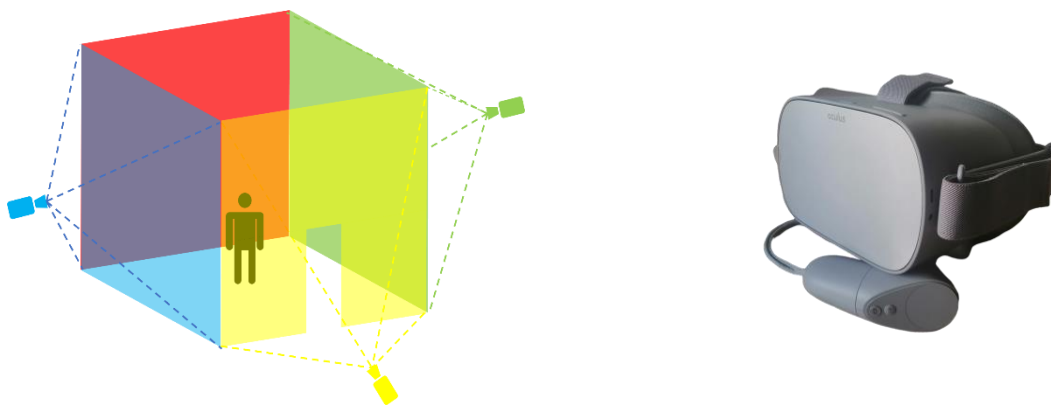


Figura 3. 4. A la izquierda, representación gráfica de un sistema CAVE. A la derecha, ejemplo de un Head Mounted Display (HMD) de Oculus (modelo Go) con un controlador simple

Para finalizar, es importante señalar que, pese a que el principio de funcionamiento es sencillo de comprender, existen muchos factores que pueden afectar a la experiencia o cómo el usuario la percibe. En lo sucesivo se presentarán algunos ejemplos de dispositivos comerciales, incluyendo sus características más reseñables. A su vez se darán a conocer algunos ejemplos de periféricos que pueden incorporarse a la experiencia para aumentar esta capacidad de inmersión.

3.1.3. Dispositivos comerciales y periféricos

Una vez comprendidas las bases de la Realidad Virtual y, más concretamente, el principio de funcionamiento de los HMDs, se utilizará esta subsección para dar a conocer algunos ejemplos de dispositivos comerciales actuales. Así mismo, también se presentarán algunos dispositivos que pueden ser usados como periféricos, influyendo en la experiencia y sus efectos. De entre los dispositivos comerciales más usados en la actualidad, se destacan dos:

- **HTC VIVE Pro Eye:** uno de los dispositivos HMD más actuales que

actualmente pueden adquirirse en el mercado [12]. Ha sido desarrollado por la compañía HTC y, entre sus características, destaca la capacidad de conseguir una resolución combinada de 2880 x 1600 píxeles, con un total de 615 píxeles por pulgada. Esto lo consigue mediante el uso de dos pantallas OLED, una por ojo, de gran resolución. Cuenta, además, con un sistema *eye-tracking* y un sistema de posicionamiento completo que facilita su uso en multitud de paradigmas y escenarios multiusuario. Finalmente, cuenta con una gran variedad de sensores y es compatible con los kits de desarrollo software (SDK) más comunes, como Unity o Unreal Engine. Esta versión del HMD tiene un precio de 999 dólares e incluye 2 mandos, todo el cableado necesario y dos estaciones base para garantizar el correcto seguimiento de la posición (Figura 3.5-a).

- **Oculus Quest 2:** este HMD, desarrollado por Oculus [13], cuenta con una resolución de 1832 x 1920 píxeles. Cuenta también con un sistema integrado de posicionamiento para evitar colisiones dentro del mundo real. Al igual que su análogo de HTC, es compatible con los SDK de Unity y Unreal Engine. Cuenta con dos versiones, en función del almacenamiento (64-256 GB) con un precio de 349 y 449 euros, respectivamente (Figura 3.5-b).

Por otro lado, existe una gran variedad de periféricos que ofrecen multitud de posibilidades a la hora de desarrollar una experiencia de Realidad Virtual. Pese a no ser un elemento imprescindible, su uso puede aumentar considerablemente el efecto y la inmersión de la experiencia desarrollada. A continuación, se proporciona un resumen de algunos de los que se anuncian:

- **Bhaptics TactSuit:** este periférico es un traje háptico diseñado para aumentar la forma de interactuar y recibir información del mundo virtual. Cuenta con un total de 16 a 40 motores y más de 300 patrones hápticos, lo que permite experimentar sensaciones como un abrazo, una explosión, etc. [14]. También es compatible con un PC convencional o el HMD Oculus Quest 2 (Figura 3.5-c). Este tipo de periféricos también son ofertados por la compañía Teslasuit.
- **Dexta Robotics Dexmo:** Dexmo es definido por sus creadores [15] como *“el guante háptico de fuerza más fácil de usar, diseñado de forma conjunta por investigadores, empresas y consumidores. Tiene una interacción natural e intuitiva, lo que posibilita a cualquier persona tocar y sentir sin dificultar el mundo de Realidad Virtual.”* (Figura 3.5-d).
- **KAT walk:** se trata de un sistema basado en una cinta de correr que permite al usuario caminar por el entorno virtual sin limitación de área [16]. Permite realizar distintos movimientos, desde caminar, hasta correr o saltar, siendo también compatible con aquellos juegos desarrollados en Unity o compatibles con Steam, entre otros (Figura 3.5-e). Se ofrecen distintos modelos adaptados a diferentes tallas y alturas.
- **VIVE trackers:** este dispositivo ha sido desarrollado por HTC para incluir objetos reales en el entorno virtual. Para ello, el dispositivo se coloca sobre un objeto real, permitiendo el control de su posición en la escena virtual [17] (Figura 3.5-f).

- **Cybershoes 3D-run:** este periférico es una versión de bajo coste del KAT Walk [18]. Estos “ciberzapatos” se atan a los zapatos del usuario, permitiendo ser usados para moverse e incluso saltar en el mundo virtual. Es una de las opciones más económicas que permiten la movilidad en el entorno (Figura 3.5-g).



Figura 3. 5. Visores HMD y periféricos utilizados en RV. (a) HTC VIVE Pro Eye. (b) Oculus Quest 2. (c) Bionics Tactisuit x40. (d) Dexta Robotics Dexmo. (e) KAT Walk. (f) HTC VIVE Tracker. (g) Cybershoes 3D-run. Fuentes: [12]–[17].

3.2. Neurometría: bases y conceptos de los BCIs

La neurometría se entiende como la ciencia que permite la medida y representación de las señales neurológicas, provenientes de la actividad cerebral. Estas señales pueden ser adquiridas de formas invasivas o no invasivas. Dentro de las formas de adquisición no invasivas, la más común es la Electroencefalografía o EEG, principalmente debido a que es capaz de obtener señales con una resolución temporal muy alta y a un coste no muy elevado. Otras técnicas, como la resonancia magnética, son capaces de obtener una resolución espacial muy alta, si bien su coste es mucho mayor y cada medida lleva mucho tiempo. Por tanto, el EEG se ha consolidado como una de las herramientas más útiles en el estudio de la actividad cerebral.

3.2.1. Principios de la electroencefalografía

La electroencefalografía puede definirse como la rama de la medicina que estudia la actividad cerebral, mediante la obtención e interpretación de corrientes eléctricas asociadas a la misma. Estas corrientes no son sino el reflejo de la actividad conjunta de

las neuronas, consideradas la unidad funcional del sistema nervioso. Estas neuronas reciben estímulos y son capaces de transmitir una respuesta en forma de impulsos eléctricos.

La actividad cerebral [19], [20], por tanto, se compone de la acción conjunta de grupos de neuronas (generalmente millones de ellas), que actúan de forma sincronizada al transmitir esos impulsos eléctricos, sumando su efecto y posibilitando su medida. Esta corriente se denomina corriente iónica y se produce como resultado de un proceso químico llamado potencial de acción. En el potencial de acción, las neuronas, inicialmente “polarizadas” o cargadas negativamente, reciben un estímulo, por lo que comienzan a cargarse positivamente mediante la adquisición de iones de sodio (Na^+). Este proceso se denomina “despolarización” y permite a las neuronas comenzar el proceso de emisión de información. Finalmente, alcanzado un pico de carga, las neuronas vuelven a su estado original, pasando antes por un periodo de reposo en el que no puede ocurrir otra despolarización. En la Figura 3.6 se puede apreciar el voltaje de la membrana neuronal durante el proceso definido.

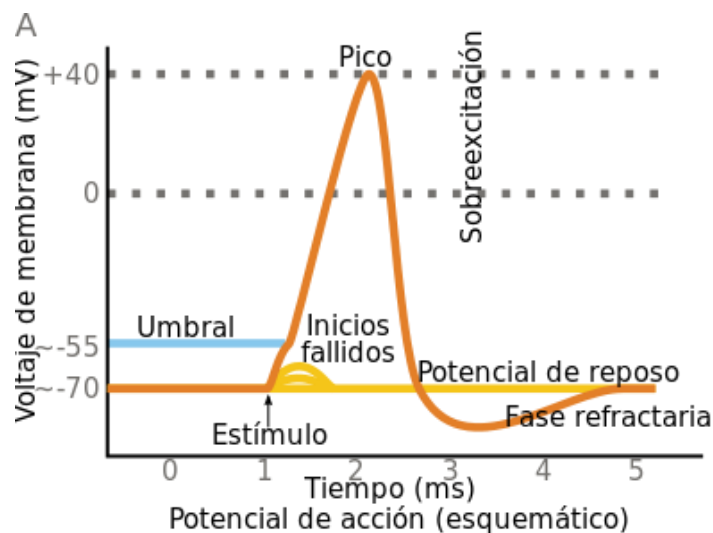


Figura 3. 6. Gráfica del potencial de acción de una neurona. Fuente: academiaplay.es/neuronas-electricidad/

Como se ha indicado anteriormente, la posibilidad de registrar esta actividad eléctrica mediante EEG se debe a que este efecto se produce en un numeroso grupo de neuronas al mismo tiempo. La forma de adquisición de esta señal se basa en el uso de electrodos, un conductor metálico situado directamente sobre el cuero cabelludo. Dadas las dimensiones de un electrodo (en torno a 6cm^2), es posible medir la actividad conjunta de aproximadamente 500 millones de neuronas [21], por lo que el EEG se considera el sumatorio o la envolvente de todos los impulsos generados por esas neuronas.

Por lo tanto, para medir la actividad cerebral completa mediante EEG, es necesario posicionar un número elevado de electrodos a lo largo de la cabeza, intentando adquirir la mayoría de las señales que se generan en el cerebro y conectados a una misma referencia. Lo más común es usar un gorro de electroencefalografía, un gorro en el que ya vienen dispuestas las posiciones de los electrodos, de forma que, al colocarlo sobre la cabeza, se cubren todas las zonas de medición relevantes. Un ejemplo de uso de un gorro de EEG se adjunta en la Figura 3.7, junto a un esquema que detalla las zonas más

relevantes del cerebro, en función de la actividad a la que están asociadas.

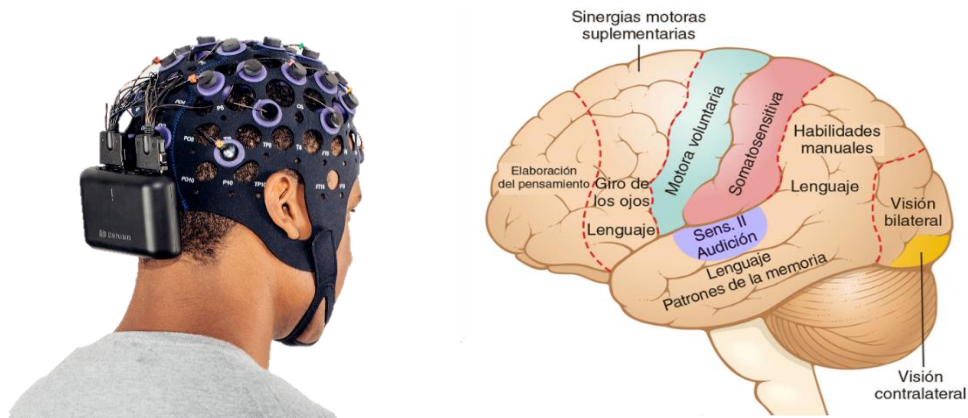


Figura 3. 7. A la izquierda, un ejemplo de montaje de un gorro EEG de Bitbrain. A la derecha, el esquema de las áreas del cerebro clasificadas en función de la actividad asociada. Fuentes: bitbrain.com/[22].

3.2.2. El sistema internacional 10/20

El sistema internacional 10/20 es una de las formas más conocidas y usadas para indicar la posición de los electrodos [23]. Se componen de una letra, que indica el lóbulo del cerebro al que hacen referencia, y un número, con el que indican la ubicación del hemisferio. Los números pares indican que se trata del hemisferio derecho, mientras que los impares hacen referencia al hemisferio izquierdo y la Z indica la posición central.

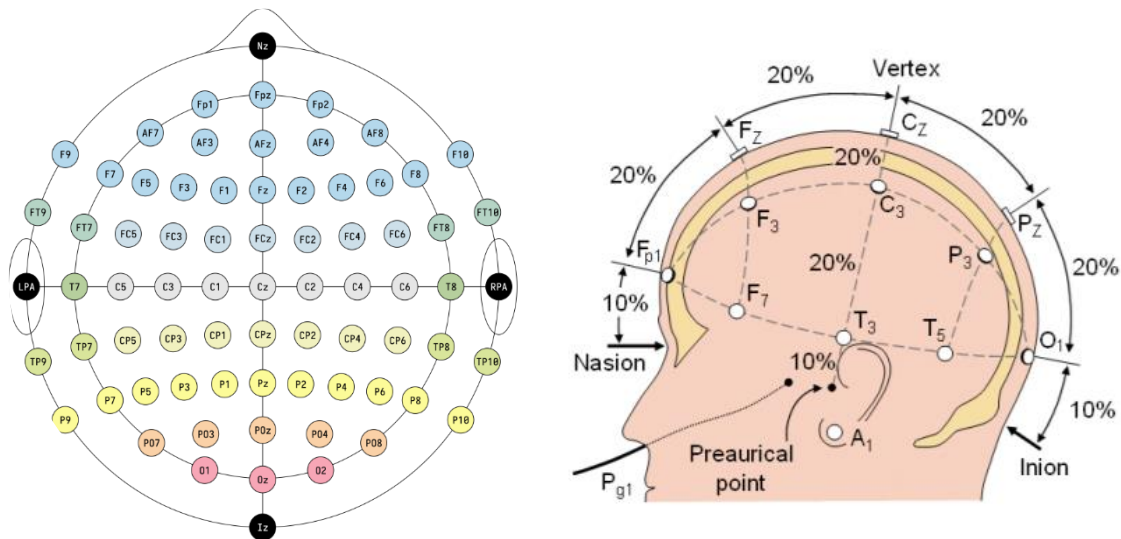


Figura 3. 8. A la izquierda, sistema Internacional de colocación de electrodos 10/20 modificado. A la derecha, vista con el espaciado entre los electrodos, de acuerdo con el mismo sistema. Fuentes: wikipedia.org/[21]

Así, la posición C4 indicaría la posición 4 en el hemisferio derecho del lóbulo Central y F4, su equivalente en el lóbulo Frontal. Hay que tener en cuenta que el punto que se visualiza en la parte superior se denomina nasión y está situado entre la frente y la nariz,

mientras que el cardinal opuesto, el inion, es el punto más bajo del cráneo. Por último, los números 10 y 20 indican el porcentaje de la distancia a la que deben ir colocados los electrodos, considerando la distancia total entre los puntos de referencia descritos. Todo ello se resume en la Figura 3.8.

3.2.3. Procesamiento de señales EEG

El siguiente paso en la extracción de las señales de electroencefalografía es el procesamiento y filtrado de estas. Si bien las señales EEG tienen una amplitud de algunas decenas de microvoltios, las señales e impulsos captados con los electrodos superan el orden de milivoltios. Es decir, las señales que se captan contienen tanto ruido que sin un procesamiento resulta imposible ninguna información acerca de la actividad cerebral.

Las señales EEG, debido a su reducida amplitud, pueden verse enmascaradas por cualquier clase de ruido o interferencia, tales como el ruido producido por una mala colocación de los electrodos, por espasmos musculares o incluso por la propia red eléctrica. Por ello, es necesario filtrarlas y procesarlas hasta eliminar todos los ruidos, denominados artefactos, ya sean fisiológicos (contracciones de músculos, latidos, etc.) o técnicos (red eléctrica, movimientos bruscos, etc.).

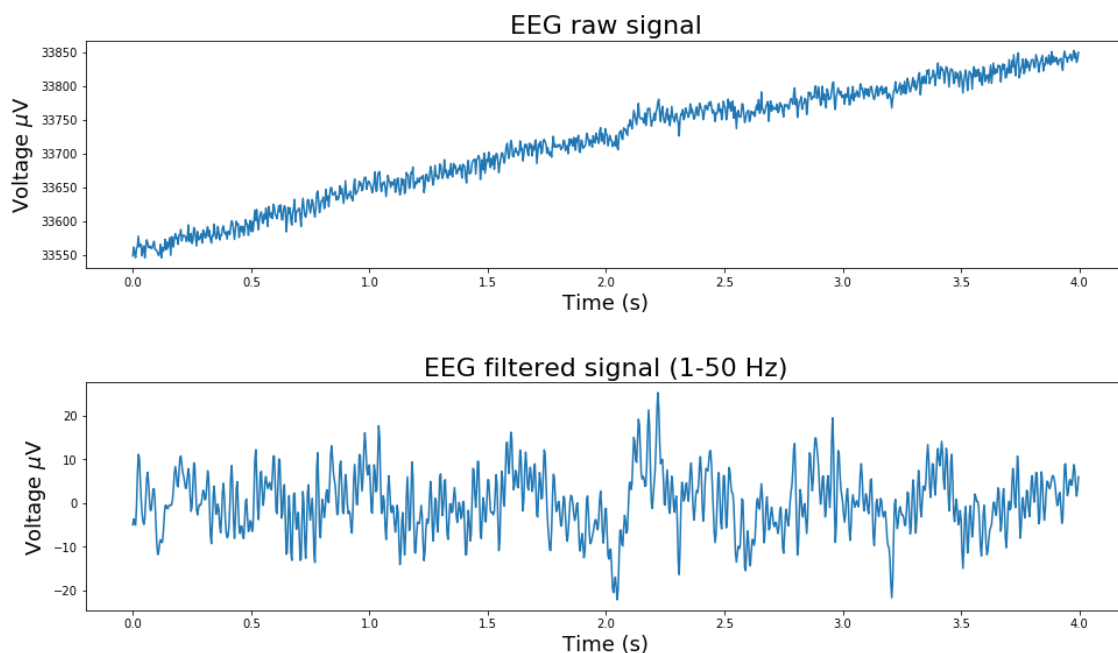


Figura 3. 9. Ejemplo de señal EEG sin filtrar y tras la aplicación de un filtro paso banda entre 1 y 50 Hz

El primer paso en el procesamiento implica un filtrado de la señal adquirida. Lo más común es un filtrado paso banda que elimine toda señal que no esté dentro del rango principal de frecuencias de las señales EEG. Este rango suele abarcar desde 1 hasta los 50 Hercios y contiene 5 bandas de frecuencia principales: Delta (1-4 Hz), Theta (4-8 Hz), Alfa (8-13 Hz), Beta (13-25 Hz) y Gamma (25-45). También es frecuente la aplicación de un segundo filtro que elimine toda señal cuya frecuencia sea de 50 Hz, ya que esta es la frecuencia de la red eléctrica en Europa. Un ejemplo de una señal EEG antes y después

de su filtrado se encuentra en la Figura 3.9.

Pese a la gran variedad de filtros que se pueden utilizar en el procesamiento de señales EEG, estos pueden dividirse en dos grandes grupos: los filtros FIR y los filtros IIR. Considerando su descripción más teórica, los filtros FIR (*Finite Impulse Response*) son aquellos cuya salida a una señal impulso tiene un número finito de términos, mientras que los filtros IIR (*Infinite Impulse Response*) tienen una salida infinita. Desde un punto de vista práctico, la diferencia a la hora de procesar señales radica en el tamaño del filtro y, por tanto, el tiempo que lleva su aplicación a una señal.

La forma de aplicar un filtro digital se basa en la convolución de la señal original y el *kernel* del filtro, un vector de datos que al aplicarlo dan como resultado una señal filtrada tal y como se deseaba (Figura 3.10). Los filtros FIR tienen un *kernel* de una longitud considerable, lo que incrementa el tiempo que llevaría aplicarlo a una señal. Sin embargo, son filtros muy estables, por lo que se recomienda su uso en procesamientos sin requisitos temporales (procesamiento *offline*). Por el contrario, los filtros IIR son mucho más cortos y de aplicación muy rápida, aunque por ello aumentan el riesgo de que la señal resultante contenga ruido derivado de su aplicación. Estos son usados en los procesamientos de tiempo real o procesamiento *online*.

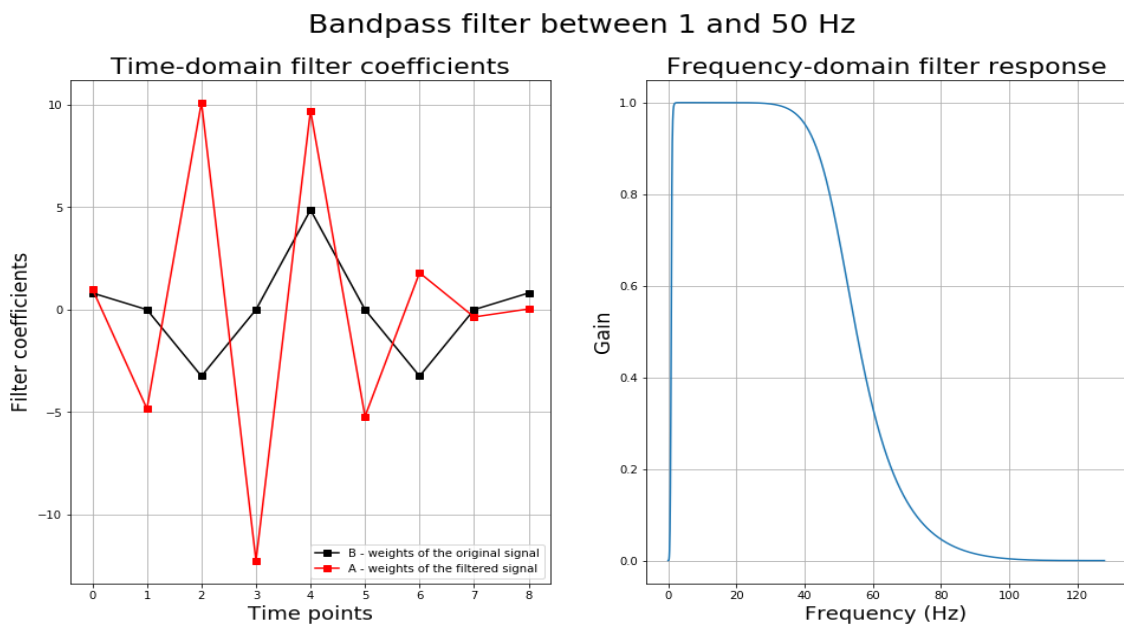


Figura 3. 10. Ejemplo de coeficientes del kernel (Izquierda) y respuesta en frecuencia (Derecha) de un filtro IIR Butterworth de orden 4 entre 1 y 50 Hz.

Una vez se obtiene una señal filtrada, el siguiente paso natural es eliminar aquellos datos con valores no esperados, generalmente los que superen un cierto límite, pues suelen ir asociados a ruidos. Después, se realiza una división por *epochs* o *epoching*, que implica la división de la señal en pequeños intervalos temporales (normalmente entre 1 y 4 segundos), lo que permite obtener datos asociados a la actividad cerebral en pequeñas franjas temporales. Así, se puede evaluar la actividad cerebral y su evolución a lo largo del tiempo que dure la adquisición de esta. Es común también aplicar ventanas a estos *epochs* para truncarlos y eliminar discontinuidades en la transformada de Fourier. Las ventanas son funciones cuya amplitud desciende hasta 0 en sus extremos, lo que aumenta

Esta arquitectura presentada es solo un ejemplo de la multitud de implementaciones de BCIs que pueden encontrarse en la literatura [26]–[34], si bien sus características y etapas comunes son las descritas. De acuerdo con [25], es posible clasificar los BCIs de acuerdo a tres aspectos: la sincronización de las señales de entrada, la naturaleza de dichas señales y la actividad que genera una respuesta en el BCI. Se puede ver un esquema de dicha clasificación atendiendo a la Figura 3.12.

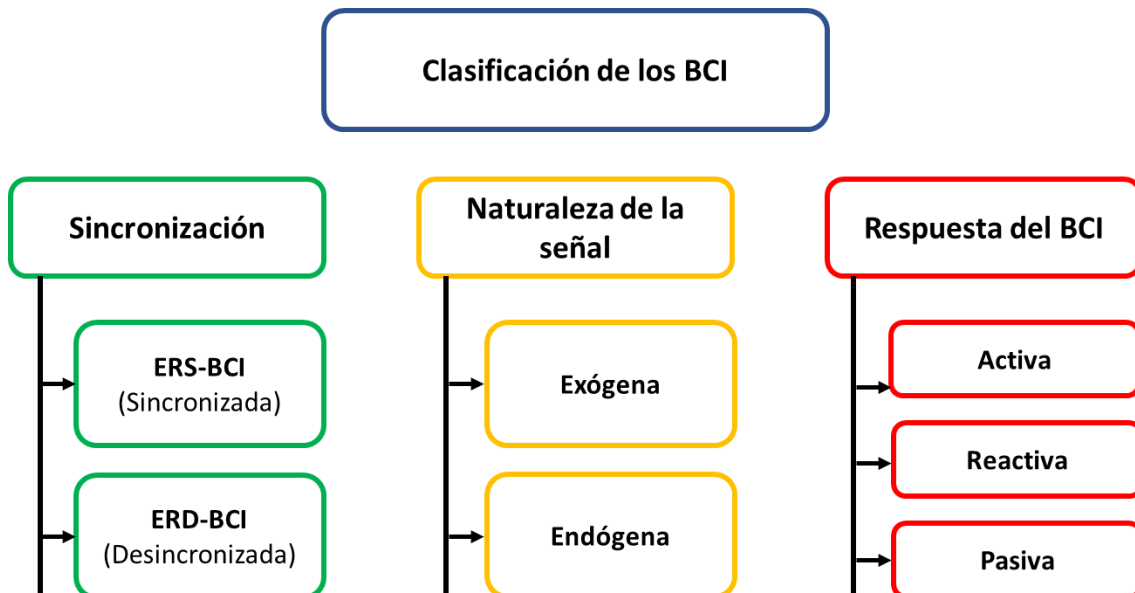


Figura 3. 12. Clasificación de los interfaces BCI, de acuerdo con [25].

El primer grupo en la clasificación se describe por la relación entre el cambio de las actividades o estímulos y la potencia de la señal adquirida. Si el cambio tiene un efecto positivo en la señal, aumentando positivamente su valor o amplitud, se dice que la señal está sincronizada y el BCI se denomina como *Event Related Synchronization BCI* (ERS-BCI). En el caso contrario, cuando la señal decrece en valor o amplitud, el sistema está desincronizado, siendo entonces un *Event Related Desynchronization BCI* o ERD-BCI.

El segundo grupo de clasificación depende de la naturaleza de la señal adquirida por el BCI, pudiendo ser de naturaleza exógena o endógena. Los BCIs de tipo exógeno (e.g. P300) generan una respuesta cuando se ha presentado un estímulo al usuario. Es decir, precisan de un estímulo al que la persona reacciona, midiendo esta reacción. En el caso contrario, los BCIs de tipo endógeno (e.g. imaginación motora), no es necesario que se produzca un estímulo, pues la señal adquirida proviene únicamente de la actividad cerebral del sujeto.

Finalmente, el último grupo se define según la respuesta que ofrezca el BCI. Aquí encontramos tres tipos de BCI: activos, reactivos y pasivos. Los dos primeros son muy similares a los BCIs endógenos y exógenos, respectivamente. En los BCIs activos, se genera una respuesta acorde a actividad cerebral voluntaria, mientras que en los BCIs reactivos, la respuesta se basa en uno o varios estímulos que generan diferentes respuestas, usadas para controlar una aplicación o sistema, por ejemplo. Por último, los BCIs pasivos son aquellos que responden ante actividad cerebral no intencionada, es decir, aquella relacionada con actividades no intencionadas (por ejemplo, reaccionar ante el estrés), y permite mejorar el sistema y adaptarlo a dicha actividad.

3.3. Bases del reconocimiento de emociones

Esta sección está destinada a ofrecer unas bases para entender las técnicas y métodos empleados por los investigadores para medir y reconocer emociones, ya sea de forma directa, o a través de su valencia y excitación. En lo sucesivo, se presentarán diferentes teorías sobre reconocimiento de emociones, así como varios diagramas que faciliten su comprensión. Una revisión exhaustiva de todas las teorías y técnicas puede encontrarse en [35].

3.3.1. Fundamentos y teorías de las emociones

Como seres humanos que viven e interactúan en la sociedad, constantemente nos vemos envueltos por distintas situaciones y contextos, los cuales producen emociones diferentes en cada uno. Así, una misma situación puede enfadar a unos, hacer felices a otros o resultar indiferente para el resto. Debido a esta naturaleza tan propia que presentan las emociones, otorgar una descripción precisa es una tarea desafiante. Su propia definición depende en la mayoría de los casos del autor o la temática que se revise. Aun así, estas son descritas en [1], como “[...] reacciones de Valencia ante eventos, agentes u objetos, cuya naturaleza particular viene determinada por la forma en la que la situación que las produce es interpretada.”.

Pese al gran número de teorías que existen acerca de las emociones y cómo comprenderlas, estas pueden categorizarse en dos grandes grupos, tal y como representa la Figura 3.13. Estos dos grandes grupos de teorías buscan categorizar las emociones, bien considerando su naturaleza y forma de manifestarse, o bien tratando de ofrecer una explicación acerca de su estructura.

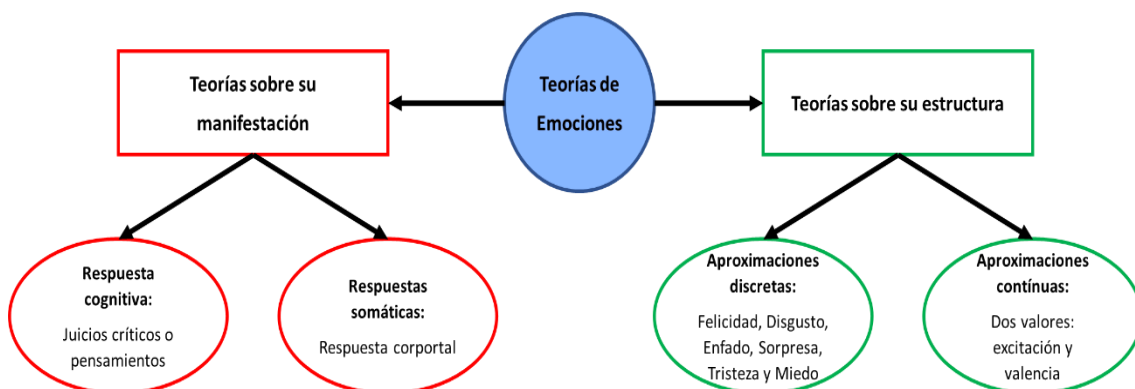


Figura 3. 13. Esquema de teorías de emociones. Se diferencian dos vertientes principales, una que versa sobre su forma de manifestarse y la otra que aboga por su estructura.

El primer grupo de teorías (parte izquierda del esquema mostrado en la figura) se centra en la naturaleza de las emociones, tratando de justificar la razón de las reacciones emocionales de dos formas distintas. La primera de ellas se basa en la idea de que las respuestas emocionales son producidas por factores cognitivos, ya sea de forma intencionada o no. Esto implica que las emociones se manifiestan como juicios críticos o

como pensamientos acerca de aquellos que nos ha producido dicha emoción. Así, estas teorías explicarían por qué, pese a tratarse de una emoción, somos capaces de distinguirla y describir dicha emoción, lo cual fundamenta el uso de cuestionarios o encuestas de satisfacción.

Otro enfoque dentro del mismo grupo sugiere que las emociones se manifiestan como una respuesta puramente somática, es decir, como una respuesta totalmente corporal. Así, nuestro cuerpo sería una manifestación de la emoción que sentimos, con total independencia de la razón que lo rodea. Estas teorías componen una férrea explicación para aquellos casos en los que nuestra fuerza, resistencia o cualquier capacidad se ve alterada, ya sea aumentándola o reduciéndola, en función de nuestro estado emocional.

El segundo gran grupo de teorías (parte derecha del esquema de la Figura 3.13) trata de abordar la estructura de las emociones. Al igual que con el otro grupo de teorías, existen dos vertientes de pensamiento principales. Pese a que su manera de aproximarse es diferente, ambas vertientes asumen que las emociones se pueden medir y clasificar en función de estos valores. La primera de ellas concibe la estructura de las emociones a través de una aproximación discreta, identificando seis emociones principales: felicidad, disgusto, enfado, tristeza, miedo y sorpresa. El resto de las emociones que sentimos no son sino una mezcla de estas emociones primarias, combinadas con distintas proporciones en cada uno de los casos. Así, una emoción podría expresarse como una suma ponderada de estas seis emociones.

La otra interpretación acerca de la estructura de las emociones sugiere, a diferencia de su análogo, una aproximación continua de estas. Así, las emociones se componen de dos aspectos: la valencia y la excitación. El primero de ellos, la valencia, indica si una emoción es positiva o negativa, por lo que se establece una primera división de las emociones, según este criterio. El segundo aspecto indica el nivel de excitación o de energía que esa emoción tiene, produciendo una segunda clasificación. De esta forma, cualquier emoción puede ser clasificada en función de estos dos aspectos. Esta combinación puede desarrollarse de forma gráfica en lo que se conoce como el “Modelo circular de afecto de Russell” o “Cuadrante de Russell” [36], representado en la Figura 3.14.

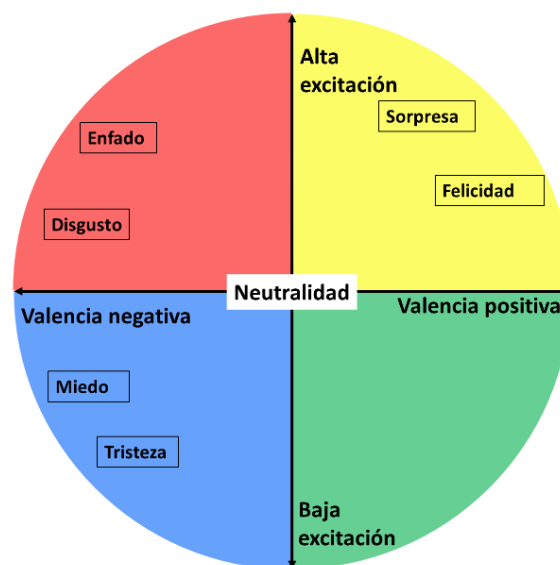


Figura 3. 14. Cuadrante de Russell o modelo circular de afecto. Divide el espacio en 4 partes, atendiendo a la valencia y excitación de las emociones.

Este cuadrante divide el espacio de emociones en cuatro grupos, atendiendo a los dos criterios desarrollados. Aunque se trata de una aproximación continua, las seis emociones definidas por las teorías discretas pueden identificarse dentro del cuadrante. Por tanto, suele ser habitual que los autores se refieran a este cuadrante para expresar las emociones.

3.4. Introducción al Machine Learning

Para finalizar este capítulo, es necesario entender los principios del Machine Learning (ML). En la actualidad, se emplean numerosas técnicas de ML para cualquier tipo de clasificación o predicción, pues la capacidad de estos algoritmos para la realización de estas tareas supera cualquier intento manual. Además, su capacidad de adaptación a los datos les permite adecuarse y resolver cualquier tipo de problemática, independientemente del tipo de datos de los que se disponga, siempre que sea posible relacionar los datos de entrada con las predicciones esperadas.

3.4.1. Conceptos básicos de Machine Learning

El Machine Learning se entiende como un subcampo de la Inteligencia Artificial que posibilita que los ordenadores establezcan conexiones entre los datos tal y como lo hacen las personas, con la diferencia de que son capaces de mejorar y aprender a lo largo del tiempo, con nuevos datos de entrada. Así, el ML es capaz de mejorar la capacidad que tienen las personas para clasificar y dividir los datos, además de ser capaces de interactuar con miles de datos de entrada en cantidades muy reducidas de tiempo.

En ML, los datos suelen estar dispuestos en lo que se conoce como *dataframes* o tablas de datos, donde cada columna identifica una característica o *feature* que el algoritmo usará, y donde cada fila determina una nueva muestra u observación de nuevos datos. Finalmente, la última columna suele ir destinada a identificar la clase a la que pertenece cada muestra, denominada etiqueta o *target*, pues es el objetivo de la clasificación.

Los algoritmos de ML, por tanto, tienen la función de evaluar cada muestra de datos, encontrando relaciones entre las distintas características y la etiqueta, de forma que, ante una nueva muestra de entrada, sea capaz de determinar la etiqueta que le correspondería. Esta etiqueta puede ser un nombre, una categoría o un número. En el caso de *targets* numéricos, es posible realizar una regresión en lugar de una clasificación, aunque las diferencias entre ambos tipos de algoritmos se verán más adelante. Finalmente, es importante destacar el hecho de que cada algoritmo posee una serie de características propias cuya modificación puede facilitar la adaptación de este a los datos proporcionados, denominados hiperparámetros, siendo inherentes al propio algoritmo.

Otro aspecto importante de los algoritmos de Machine Learning es el tipo de aprendizaje que usen para adaptarse a los datos. Así, los algoritmos de ML pueden ser clasificados en tres grupos:

- **Algoritmos de aprendizaje supervisado:** los modelos de ML pertenecientes

a esta categoría requieren de una etapa de entrenamiento previa. Se definen como “de aprendizaje supervisado” ya que en esta etapa de entrenamiento se proporcionan tanto las características como la etiqueta asociada a esa muestra, permitiendo así que el modelo se adapte hasta ser capaz de identificar correctamente las muestras proporcionadas. Es preciso realizar una fase posterior de test para comprobar la capacidad adquirida del modelo para generalizar y etiquetar correctamente muestras nuevas. Dentro de este grupo se incluyen la regresión y la clasificación.

- **Algoritmos de aprendizaje no supervisado:** este tipo de algoritmos tratan de agrupar los datos según sus características más significativas. En este caso, el algoritmo realiza una exploración y una agrupación de los datos sin contar con ninguna etiqueta que los relacione. Así, este proceso se adecúa a los datos sin necesidad de necesitar un entrenamiento previo y agrupando nuevos datos en función con su similitud o diferencias con el resto de los grupos. Dentro de esta categoría encontramos los algoritmos de agrupamiento o *clustering*, destinados a encontrar similitudes que permitan agrupar datos en distintos grupos; y los algoritmos de reducción dimensional, que permiten encontrar dependencias entre los datos, reducir el número de características y simplificar la posterior clasificación.
- **Algoritmos de aprendizaje profundo o *Deep Learning*:** los algoritmos de *Deep Learning* se basan en intentar replicar el comportamiento de nuestro cerebro, en base a estructuras jerárquicas denominadas redes neuronales. Estas redes, similares a nuestra organización neuronal se compone de nodos relacionados entre sí y organizados por etapas. Cada etapa recibe como entrada los datos procesados por la capa anterior, extrae nuevas características y las pasa a la siguiente capa. Así, el sistema completo recibe los datos brutos como entrada y es capaz de proporcionar una predicción. Esta predicción se suele comparar con el resultado esperado, de forma que el modelo pueda modificarse para adaptarse a proporcionar una nueva predicción.

3.4.2. Clasificación vs Regresión: Clasificadores más utilizados

Dentro de la categoría de algoritmos de aprendizaje supervisado encontramos dos tipos bien diferenciados: la clasificación y la regresión. Tal y como se ha desarrollado anteriormente, el *target* puede ser tanto una etiqueta, como un valor numérico. Los clasificadores se centran en encontrar una relación entre los datos de cada muestra y su etiqueta, de forma que den como resultado una predicción dentro de las posibles etiquetas que hay. Un ejemplo de clasificación lo encontramos en la Figura 3.15.

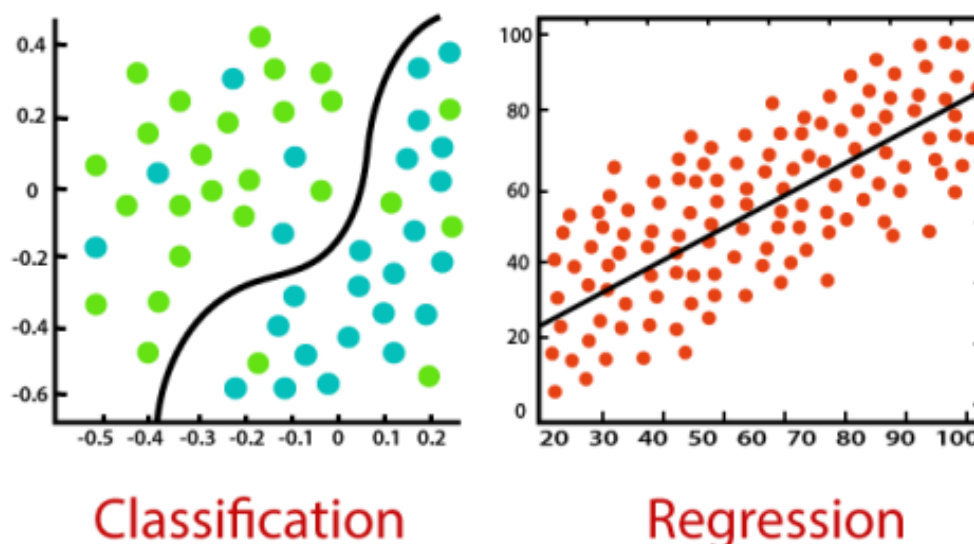


Figura 3. 15. Diferencias entre clasificación y regresión. En la clasificación se intenta predecir la etiqueta de la muestra, mientras que en la regresión se intenta estimar un valor cercano al esperado.
Fuente: blogdatlas.wordpress.com.

Por el contrario, los regresores se centran en obtener una fórmula matemática que, dados unos datos de entrada, y al aplicar esta, se obtenga una predicción lo más cercana posible al valor establecido como *target*. Así, la salida de una regresión da como resultado un valor continuo, mientras que en una clasificación la salida es una de las posibles categorías establecidas.

Para cada algoritmo, por tanto, existen métodos distintos para comprobar su rendimiento o capacidad de predicción. En el caso de los clasificadores, la medida más usada es el porcentaje de aciertos en la predicción o *accuracy*. Esta determina el número de casos donde se ha proporcionado una respuesta correcta frente al número de predicciones efectuadas. El umbral para determinar si un clasificador funciona (ya sea bien o mal) suele establecerse en el valor inverso del número de clases posibles. Así, un clasificador con únicamente dos etiquetas que predecir se considerará funcional cuando su índice de aciertos supere el valor de 0.5 o 50 por ciento.

En el caso de los regresores, se necesita un criterio distinto, pues al tratarse de valores continuos, es imposible dar una predicción exacta. Así, la forma de evaluar la eficiencia del modelo es en base a calcular el error en las predicciones realizadas. Uno de los criterios comúnmente usado es el MSE o Error Cuadrático Medio. Este error se calcula como la suma de los cuadrados de todos los errores cometidos en las predicciones. Este valor es dividido entre el número de muestras y permite estimar cómo de correctas son las predicciones efectuadas.

Respecto a los algoritmos de clasificación, los más usados en la actualidad se resumen a continuación:

- **Árboles de decisión (*Decision Tree*):** los árboles de decisión son algoritmos de clasificación basados en la elaboración de diagramas descendentes aplicados para la toma de la decisión (ver Anexo I). Estos árboles se definen por nodos donde se evalúan una o varias características. En función de esta

evaluación se continúa hacia el nodo que corresponda en el nivel inferior, hasta que sea posible determinar a qué clase pertenece dicha muestra. En cada nodo, denominados nodo-hoja se evalúa una característica de la muestra, generalmente comenzando por aquellas que guarden mayor relación con la etiqueta.

- **Bosques aleatorios (*Random Forest*):** los bosques aleatorios son una extensión de los árboles de decisión. Tal y como su nombre evoca, cada bosque se compone de varios árboles de decisión distintos, que evalúan la misma muestra y dan una predicción acorde a su estructura. La predicción del bosque, en este caso, viene determinada por la etiqueta que cuente con el mayor número de predicciones.
- **Máquinas de soporte vectorial (*Support Vector Machine*):** las máquinas de soporte vectorial establecen divisiones del espacio que permiten separar las muestras de las distintas clases. Así, en el caso más simple donde solo existen dos muestras nos encontramos un espacio de dos dimensiones que se puede dividir con una recta. Cuantas más características, el espacio contará con más dimensiones, dando lugar a divisiones más complejas del espacio. Cuando una nueva muestra se añade al modelo, se cataloga en función de la región donde se encuentre, siendo esta limitada por las distintas divisiones creadas.
- **K-vecinos más cercanos (*K-nearest Neighbors*):** este algoritmo de aprendizaje supervisado se basa en la búsqueda del grupo de datos más cercanos a la muestra a evaluar. Concretamente, ante un conjunto de datos etiquetados, evalúa la probabilidad de que una muestra pertenezca a una de las categorías existentes utilizando como criterio de medida la distancia entre esta y las muestras vecinas. Así a cada muestra se le atribuye una etiqueta en función del grupo más cercano a ella (generalmente evaluando la distancia euclídea).

3.4.3. Validación cruzada (*Cross Validation*)

Una vez entendidos los distintos tipos de algoritmos que existen, así como la forma de evaluarlos, se evidencia la existencia de una problemática en la que la predicción efectuada sea totalmente errónea pese a tener un alto grado de acierto en el entrenamiento. Se propone para entender este caso particular un ejemplo en el que tenemos dos clases para clasificar, etiquetadas como ‘Clase1’ y ‘Clase2’.

El primer paso sería coger un porcentaje de las muestras para entrenar el algoritmo escogido y usar el resto para evaluar el modelo ya entrenado. Se supone entonces que, dada la arbitrariedad en la selección, todas las muestras escogidas para entrenar pertenecen a la ‘Clase1’. Siendo este el caso, el modelo se adaptaría a los datos y consideraría que la mejor predicción es siempre ‘Clase 1’. Pese a obtener un 100% de aciertos en el entrenamiento, si ahora consideramos que todas las muestras para evaluar el modelo fueran de la clase ‘Clase2’, el modelo no sería capaz de acertar ninguna predicción.

Para evitar este problema, así como aquellos otros que puedan derivarse de un exceso o defecto de características, se utiliza la validación cruzada o *cross validation*. Esta validación consiste en realizar varias iteraciones del proceso de entrenamiento-evaluación, escogiendo de forma aleatoria los datos, pero garantizando que todos ellos se han usado tanto para entrenamiento como para evaluar. Los datos, por tanto, se dividen en grupos o *fold*s, de forma que haya tantos *fold*s como iteraciones del proceso de entrenamiento-evaluación. Así, en cada nueva iteración, se usa un *fold* distinto para evaluar y el resto para entrenar. Finalmente, los resultados de todos los modelos generados se promedian, obteniendo una medida mucho más fiable de las prestaciones del modelo desarrollado.

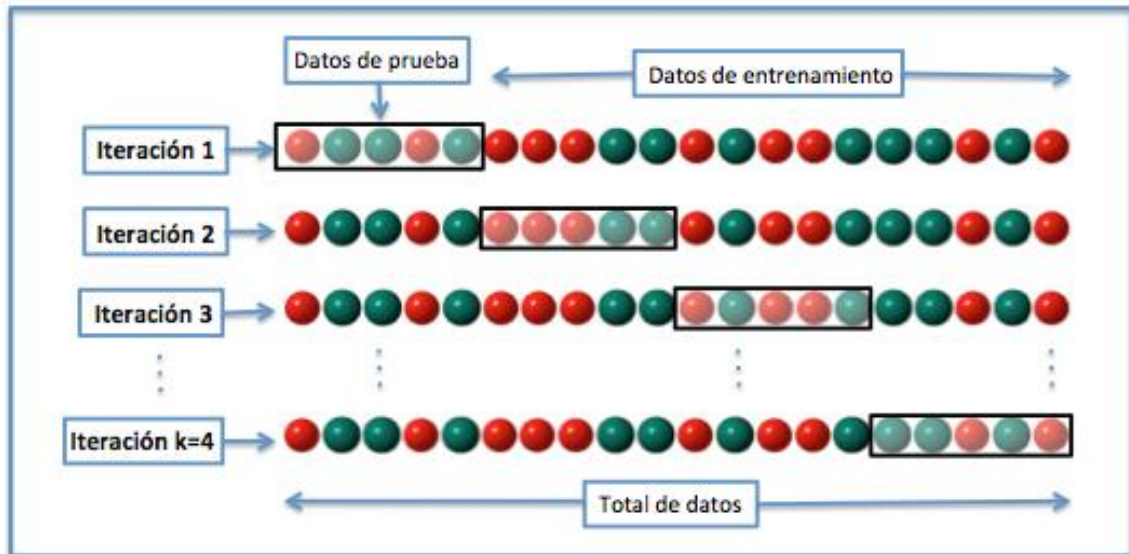


Figura 3. 16. Esquema de validación cruzada (Cross Validation). Se destacan los datos usados para evaluar en cada iteración, dejando el resto de datos para entrenar el modelo. Fuente: Wikipedia.org

Estado del arte

De acuerdo con la literatura, la Realidad Virtual es capaz de ofrecer una experiencia totalmente completa y nueva donde las señales provenientes de la Neurometría puedan ser analizadas en un contexto libre de distracciones para el sujeto. Estas posibilidades podrían extenderse también al reconocimiento de emociones. En lo sucesivo, se tratará de aportar una visión general de estos tres campos de estudio, así como aquellos estudios donde hayan sido aplicados de manera conjunta.

4.1. Usos de la Realidad Virtual

La Realidad Virtual se ha convertido de forma muy rápida en una herramienta muy demandada para la recreación de entornos y situaciones, proporcionando una experiencia completamente inmersiva en el usuario que la experimente. Esta tecnología permite desarrollar experiencias únicas o reproducir situaciones cotidianas usando únicamente un HMD y uno o dos controladores, aun con la confianza de generar una verdadera sensación de inmersión. Esta habilidad para crear situaciones o eventos de cualquier índole ha fomentado su uso e inserción en numerosas áreas de estudio, que abarcan desde la simulación de entornos industriales, hasta el tratamiento de fobias o trastornos, en forma de terapias inmersivas. A continuación, se presentan las principales ramas de estudio donde se ha involucrado a la Realidad Virtual.

- **Terapia:** las terapias inmersivas están principalmente enfocadas al tratamiento de fobias, mediante el entrenamiento de los pacientes a través de exposiciones controladas a la causa de esa fobia. Así, la persona es capaz de adaptarse progresivamente a ese miedo, enfrentándose a él o adquiriendo nuevas habilidades sociales, si la fobia estuviese relacionada con estas. Entre todos los campos donde se han implementado soluciones basadas en RV, se destacan el tratamiento de la ansiedad [37], [38], el miedo a las alturas y otras fobias [39], [40], el estudio de desórdenes alimenticios como la anorexia [41], o incluso el tratamiento de la psicosis y otros trastornos mentales [42]. Hasta donde se conoce, los investigadores abogan por el uso de la RV para el tratamiento de estos trastornos, reconociéndola como una herramienta prometedora y útil, destacando de hecho, dentro de esta área, el uso de la RV para ayudar a personas con Trastorno del Espectro Autista (TEA).
- **Trastorno del espectro autista (TEA):** en los últimos cinco años, numerosas investigaciones se han centrado en el estudio, entendimiento y la ayuda en la gestión de problemas relacionados con el TEA [43]–[46]. Una de las características de este trastorno está ligada a la reducción de la capacidad para identificar sentimientos y emociones en otras personas, lo que inevitablemente conduce a una reducción de la interacción social, dada esta imposibilidad de

reconocer lenguajes no verbales o expresiones faciales. La mayoría de los estudios más recientes tratan de averiguar cómo entrenar a estas personas para mejorar sus niveles de atención y el control del lenguaje no verbal en entornos hostiles para ellos o aquellas situaciones que les produzcan algún tipo de rechazo [43]–[45], así como ayudarles con la gestión de situaciones cotidianas, como entrevistas de trabajo [46].

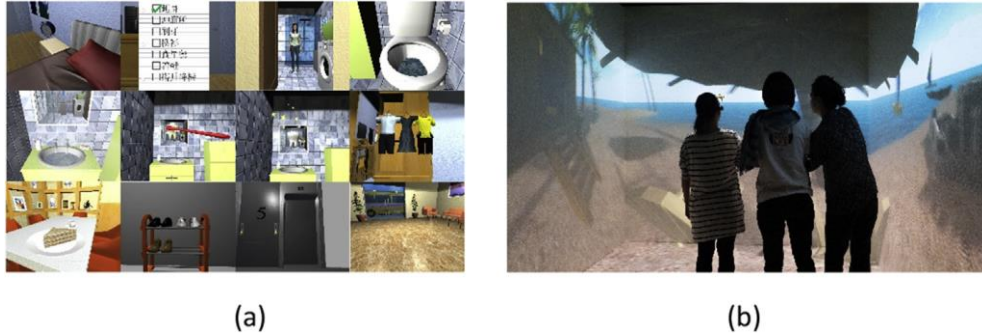


Figura 4. 1. Entorno virtual desarrollado en [44]. (a) Imágenes de uno de los escenarios. (b) Uso del escenario de control de emociones.

- Rehabilitación:** dentro del campo de la salud, la rehabilitación se ha consolidado como una meta, en la que el objetivo se centra en crear un espacio seguro para controlar, entrenar y verificar una correcta recuperación del paciente. Existen estudios cuya finalidad es ofrecer una revisión de la inclusión de la Realidad Virtual en este campo [47], mientras que otros centran sus esfuerzos en ayudar en la rehabilitación de casos concretos, como la rehabilitación cognitiva en aquellos pacientes que han sufrido daño cerebral como resultado de un accidente, así como la evaluación de los daños [48], [49], o aquellos que sufran de una parálisis cerebral [50]. Muchos otros artículos, emplean la RV en la rehabilitación solo con fines comparativos, como es el caso de un estudio que versa sobre la rehabilitación en pacientes con la enfermedad de Parkinson [51]; o bien para analizar la efectividad de esta herramienta [52]. A pesar de coincidir en que son necesarias más investigaciones, los resultados reportados corroboran la viabilidad de las terapias llevadas a cabo, basando estos resultados bien en la evaluación del paciente, o la comparación con los métodos clásicos. En todos ellos, para concluir, el principal objetivo es posibilitar a aquellos que han sufrido una merma en sus capacidades, ya sea debido a accidentes o a cualquier otra condición, puedan recuperar algunas funciones de nuevo, o por lo menos, sean capaces de aprender cómo adaptarse a estas nuevas condiciones físicas o cognitivas.
- Educación:** la enseñanza puede ser considerada un campo muy amplio de la vida diaria donde destaca la RV. La educación, ya sea en el instituto, o en el ámbito profesional, es un tema de interés para la comunidad científica. Así, la tecnología inmersiva es usada, en forma de Realidad Virtual o Aumentada, para enseñar, mejorar y entrenar a expertos como cirujanos [53]–[56], arquitectos [57], o incluso estudiantes de primaria [58]. Sin embargo, otros estudios centran sus esfuerzos en plantear dilemas relacionados con la educación [59], o en investigar la utilidad de incluir estas nuevas herramientas

educativas [60]. A pesar de que la mayoría de autores se muestran de acuerdo con la idea de que esta tecnología constituye un gran beneficio para el campo de la enseñanza, no es una opinión consensuada, pues algunos autores afirman que la inmersión de estos sistemas puede tener un efecto más lúdico que educativo, el cual no necesariamente reforzaría el aprendizaje [61].

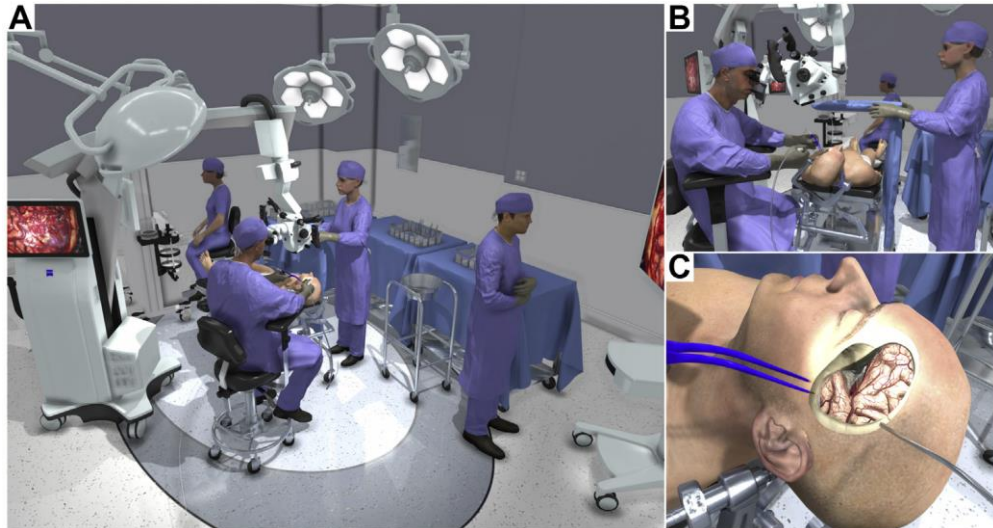


Figura 4. 2. Escenario de Realidad Virtual de una sala de operaciones de neurocirugía. (A) Vista general de la sala y su disposición. (B) Vista rotada y ampliada de la posición del paciente, cirujano, enfermera y microscopio. (C) Representación virtual de exposición craneal con instrumentos. Fuente: [54].



Figura 4. 3. Escenario virtual de un aula de educación. Fuente: [59].

- **Turismo y marketing:** las discrepancias mencionadas en el ámbito de la educación pueden extrapolarse a las áreas de turismo y marketing. Respecto al turismo, las experiencias inmersivas ofrecen al usuario final la posibilidad de visitar un lugar deseado, otorgándole más información para decidir si hacer o no ese viaje [62]. Aunque esta experiencia tiene un impacto claramente positivo en el turista (donde se consideraron lugares como Tokio, Porto o parque nacional del distrito de Lake en Reino Unido) [63], en algunos casos puede ser una hoja de doble filo, anulando el deseo de viajar [64]. Algo similar ocurre en el ámbito del marketing, donde la RV puede ser un poderoso aliado

para futuras investigaciones y colección de datos de compradores [65], [66]; o tener un efecto no deseado en el que los clientes siguen prefiriendo aquellos productos anunciados de forma tradicional [67]. El principal fin de este campo es, en conclusión, la obtención de herramientas y métodos que permitan simular un entorno real, como por ejemplo un hotel, y permita presentarlo al usuario final.

- **Industria 4.0:** la simulación de entornos industriales reales es, hasta donde se conoce, una de las principales metas de la Industria 4.0, siendo conocida como “La industria conectada”. Uno de sus objetivos es simular un entorno industrial con el propósito de usarlo como una herramienta más para los trabajadores. Este objetivo está ligado a la idea del “Gemelo Digital”, el cual se concibe como una virtualización de un producto físico o entorno [68]. En algunos casos, permite una reducción de costes en términos de desarrollo y mantenimiento, sin importar el campo de aplicación de este, ya sea de propósito general o más específico, como por ejemplo la industria aeronáutica [69], [70]. Estudios recientes se han centrado en la formación de los operarios usando técnicas de RV [71]–[74], o incluso el entrenamiento de trabajadores en un posible escenario de uso de exoesqueletos [75] para mejorar la eficiencia y la seguridad en la industria. A pesar de ser aún una tecnología en desarrollo, la simulación de este tipo de eventos y entornos tiene efectos positivos y permite un entrenamiento más seguro.

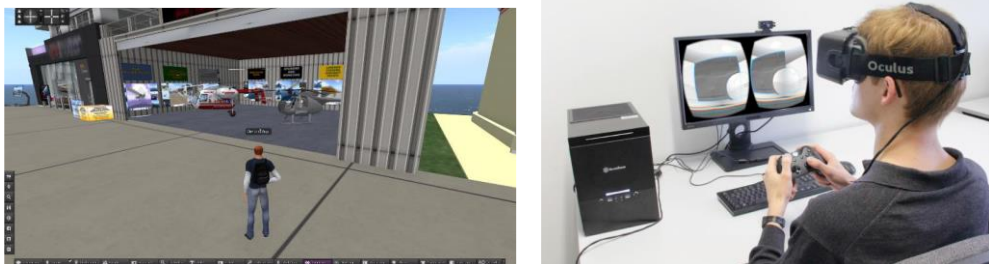


Figura 4. 4. A la izquierda, vista de la plataforma OpenSim VR, obtenida de [69]. A la derecha, ejemplo de RV para la inspección virtual de una cámara de combustión, obtenido de [70].

- **Simulación:** el deseo por recrear espacios físicos reales es algo que no solo se aplica a la industria. La simulación de entornos, situaciones o escenarios se ha consolidado como un campo de estudio donde destaca la RV. Así, la oportunidad de crear entornos inmersivos que se basan en lugares reales, como museos [76], o incluso una expedición al Everest [77], tienen un gran impacto entre las personas que lo experimentan. Esta inmersión puede tener un efecto positivo en personas que han de enfrentarse a alguna experiencia que pueda producir algún tipo de incomodidad o rechazo (como las resonancias magnéticas [78]) o en aquellas que tienen que aprender a comportarse en situaciones que presenten algún riesgo [79], [80]. También puede brindar beneficios al análisis de espacios en busca de un mejor diseño o distribución, o servir como herramienta extra en los softwares de diseño, sin necesidad de reemplazar los métodos tradicionales [81].

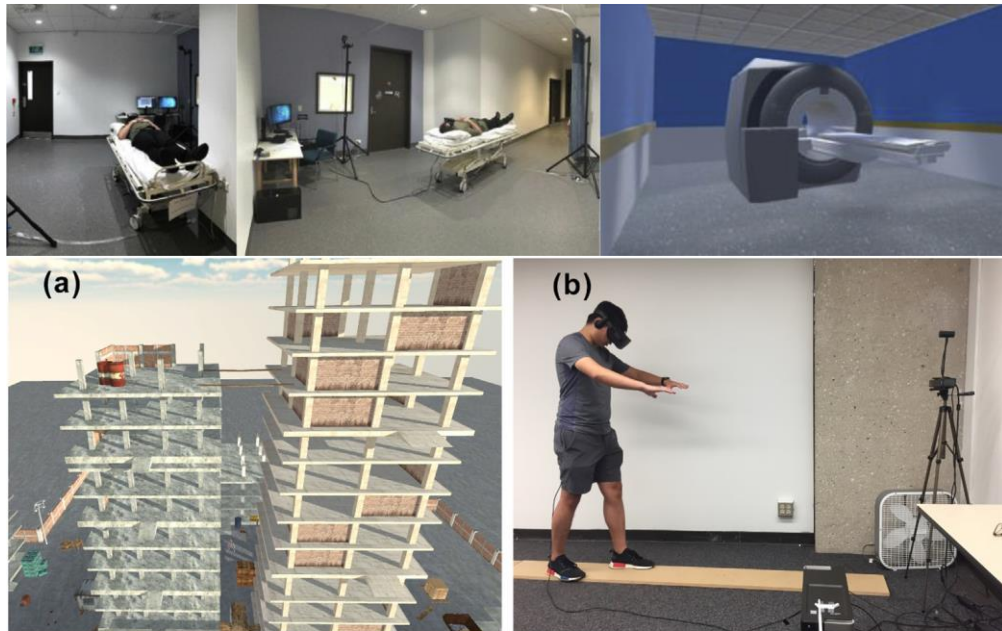


Figura 4. 5. Arriba, escenario de Realidad Virtual de una experiencia de resonancia magnética, incluyendo el montaje empleado en el espacio real. Abajo, vista del escenario virtual y montaje su montaje real para entrenamiento de trabajadores de construcción ante el riesgo de caídas. Fuentes: [78], [80].

- **Ámbito militar:** el último campo donde la RV está ganando popularidad es el militar. A pesar de la idea general que pueda existir acerca del uso de la RV en soldados o nuevas armas, la RV se ha incorporado a este campo para ayudar en el tratamiento de problemas derivados del servicio militar, como puede ser el Síndrome de Estrés Postraumático (SEPT), a través de terapias de exposición [82], [83]. Además, la RV está involucrada en el posible tratamiento de otras patologías que pueden aparecer tanto en veteranos [84], como en soldados aún en servicio [85], como la ansiedad al volante o en la idea del suicidio.

4.2. Revisión de usos de los BCIs

En la actualidad, existen numerosas señales provenientes de la actividad cerebral susceptibles de ser aplicadas en el desarrollo de los BCIs. Este apartado pretende ofrecer una visión general de las señales cerebrales más comunes y usadas, dando ejemplos de estudios que empleen cada tipo de señal:

- **Potenciales corticales lentos:** los potenciales corticales lentos son descritos como potenciales relacionados con eventos que se suelen encontrar en los periodos temporales que preceden a movimientos voluntarios [86], [87]. Se producen debido a las células gliales y tienen una frecuencia de aproximadamente 1 Hertzio, lo que se traduce en señales con una duración de varios segundos. Son observados en el EEG como un potencial negativo (también conocido como potencial premotor) que precede a un movimiento. Son muy útiles para regular la atención, especialmente en el área de

rehabilitación [88] o en casos de personas con déficits o trastornos de atención [89].

- Potenciales evocados:** los potenciales evocados se describen como respuestas eléctricas provocadas por la presentación de un estímulo controlado. Existen dos tipos de potenciales evocados: los potenciales evocados de estado estacionario, que se describirán más abajo, y los potenciales evocados relacionados con eventos, que se producen cuando hay un cambio en el estímulo presentado. El potencial evocado relacionado con eventos más representativos es el potencial P300 [90], que sigue siendo muy usado por los investigadores [91]–[94]. Este potencial se describe en [95] como “*una respuesta parietal-central que ocurre cuando un sujeto detecta un estímulo informativo relevante para la tarea*”. Su pico de actividad se produce a los 300 milisegundos, siendo este hecho el que le brinda su nombre. El estímulo objetivo suele ser aquel que difiere de los demás, que se van presentado de forma sucesiva. Esta diferencia en el estímulo es lo que produce la respuesta esperada.

Los potenciales evocados visuales son señales cerebrales generadas en del córtex visual primario (V1 dada su nomenclatura) cuando se produce un estímulo visual (una luz que parpadea, o diseños más complejos como un damero). Un dato curioso sobre estos potenciales estacionarios es que la señal adquirida oscila a la misma frecuencia que el estímulo visual, siendo más notable en amplitud en aquellos estímulos sobre los que se centre la atención. Los potenciales evocados visuales de estado estacionario son los potenciales más comunes de esta categoría, donde los estímulos, normalmente más de uno simultáneamente [96], [97], tienen frecuencias entre los 3 y los 40 Hz. Hay numerosos estudios en la literatura que versan sobre este tipo de potenciales [98], [99], así como su aplicación a los BCIs [100]–[103], lo que evidencia el atractivo de usar este potencial en estas soluciones. Este tipo de BCIs normalmente proporcionan mayores tasas de transmisión de información – ITR por sus siglas en inglés –, como puede verse en [104], donde se alcanzó una tasa de 68 bits por minuto; o tasas incluso superiores a 100 bits por minuto, de acuerdo con la simulación realizada en [105].

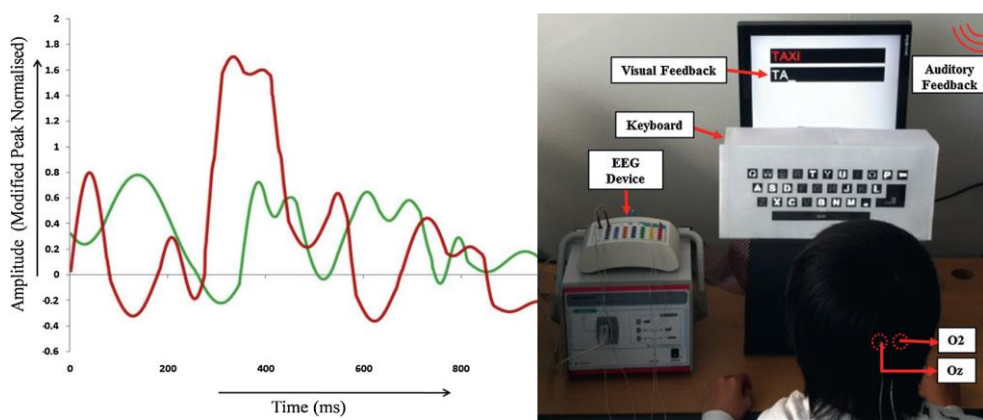


Figura 4. 6. A la izquierda, potencial P300 obtenido en [94]. La línea roja representa el potencial ante el estímulo deseado, mientras que la verde hace referencia al resultado de mostrar un estímulo no objetivo. A la derecha, el montaje de un teclado de distribución QWERTY basado en potenciales evocados visuales, obtenido de [96].

- **Ritmos sensoriomotores:** los ritmos sensoriomotores se definen como fluctuaciones en las señales cerebrales inducidas tras imaginar movimientos voluntarios. Se localizan sobre el área sensoriomotor del cerebro en dos bandas de frecuencia principales: la banda mu (μ) y la banda beta (β). Estas fluctuaciones en la señal también se producen cuando se observan o imaginan movimientos corporales, hecho por el que son muy útiles en el desarrollo de interfaces BCI. En la literatura, esta condición se conoce como Imaginación Motora [106], [107], y está normalmente asociada al ritmo mu (μ), que se traduce en un efecto de desincronización (cuanto mayor es la imaginación u observación de un movimiento, mayor es el decrecimiento de la señal). Este tipo de señales ha sido ampliamente estudiadas en la literatura [106], [108]. En [109], se usó un BCI basado en imaginación motora para la rehabilitación de un paciente de un infarto cerebral, obteniendo un porcentaje de aciertos medio de 87% en la distinción de la imaginación de movimientos del brazo derecho o izquierdo, demostrando la viabilidad de este tipo de BCIs.

Tal y como ha quedado patente, existe una gran diversidad de configuraciones para el desarrollo de un BCI, desde la forma de adquirir las señales hasta la selección de aquellas que mejor se adapten a los requisitos. Es por ello por lo que se precisa de una medida común para evaluar y comparar el rendimiento de los distintos sistemas desarrollados. En los BCIs, es común usar el ITR, que hace referencia a la capacidad de un BCI de transmitir información, expresado en bits por minuto (BPM). Es calculado [6], atendiendo a las fórmulas 4.1-4.3, como el producto de la información transmitida en un intento (4.2) y los intentos hechos por minutos (4.3). Estas ecuaciones precisan de información del BCI: el número de *targets* (N), la precisión de la clasificación (P) y los intentos o *trials* (S) hechos en un determinado tiempo (T). Con el ITR, un BCI puede ser descrito en términos de su rendimiento, así como ser comparado con otras soluciones, sin la necesidad de tener una misma configuración ni usar las mismas señales.

$$ITR \left(\frac{Bit}{Min} \right) = B * Q \quad (4.1)$$

$$B \left(\frac{Bit}{Trial} \right) = \log_2 N + P * \log_2 P + (1 - P) * \log_2 \left(\frac{1 - P}{N - 1} \right) \quad (4.2)$$

$$Q \left(\frac{Trials}{Min} \right) = \frac{S}{T} \quad (4.3)$$

4.3. Reconocimiento de emociones

De acuerdo con la literatura, a pesar de los grandes esfuerzos por clasificar emociones, los estudios actuales solo son capaces de discernir entre tres grandes áreas: las emociones positivas, negativas o neutras [110], [111]. Para conseguir esta clasificación, se emplean diversas técnicas, categorizadas en seis grupos (sin tener en cuenta los métodos híbridos que combinan dos o más técnicas). Así, encontramos:

- **Encuestas:** a pesar de los avances en el campo del reconocimiento de

emociones gracias a diferentes técnicas, todavía existe la necesidad de contar con un método para verificar los resultados y las clasificaciones. La forma más sencilla de verificación viene dada por encuestas, preguntando directamente al sujeto acerca de cómo se siente durante la sesión experimental. Generalmente, los investigadores suelen preguntar sobre diferentes emociones, que deben ser evaluadas con un número (normalmente de 1 a 5, donde 1 es desagradable y 5 es muy agradable, por ejemplo). Esto es usado en la mayoría de los experimentos para verificar los resultados, aunque no se considera del todo como una fuente fiable de datos, dado su carácter subjetivo. Sin embargo, existen cuestionarios estandarizados y verificados que intentan solventar este problema de objetividad, siendo aceptados en la literatura [112].

- **Bioseñales:** una fuente de datos sobre las emociones, muy usados y fiables, son las bioseñales. Este término hace referencia a las señales que nuestro cuerpo puede producir y, de forma más precisa, aquellas señales altamente correlacionadas con las emociones. Existen numerosos estudios sobre el reconocimiento de las emociones a través de señales EEG [110], [113]–[115], EEG en combinación con la respuesta galvánica de la piel (GSR) [116], la frecuencia cardíaca [117] y otras muchas señales adquiridas del cuerpo [111], [118], [119]. Todos estos métodos buscan la correlación entre estas señales y las emociones sentidas (normalmente mostrando imágenes de un archivo ya preparadas para producir una emoción concreta, como el *Affective Picture System*) para estudiar el efecto de la emoción sentida en estas señales. La forma más frecuente de reconocer emociones suele ser en base al uso de BCIs para medir y correlacionar señales neurológicas, siendo esta combinación analizada más adelante. La precisión que otorgan este tipo de técnicas normalmente supera el 70%.
- **Parámetros implícitos:** este método para reconocer emociones surgió como una técnica prometedora dado que se concibió para obtener cualquier parámetro o datos susceptibles de ser usados en el reconocimiento, tales como los movimientos y pulsaciones del ratón, la velocidad de escritura con el teclado o incluso información obtenida de comentarios de YouTube [120]. El principal problema con esta técnica, tal y como indica la literatura, es que es posible confundir correlación con causalidad, lo que implica que se pueda errar con los resultados del experimento llevado a cabo. Hasta donde se sabe, no hay referencias de interés en esta temática concreta.
- **Reconocimiento de gestos:** esta técnica de reconocimiento de emociones fue concebida como una forma de entender e identificar emociones a través de respuestas corporales, detectando diferentes movimientos y posiciones, y comparándolas con bases de datos estandarizadas (GEMEP) de diferentes registros como se hace en [121]. Es una herramienta útil en entornos donde otros métodos no puedan ser muy precisos, como en el reconocimiento de emociones en niños con TEA [122], o en otros casos como complemento a otro tipo de técnicas (generalmente expresiones faciales o gestos de manos) [123]. Puede también aparecer en otros contextos, ya que no es considerado como uno de los métodos más relevantes para detectar emociones. Los resultados suelen mostrar una alta precisión detectando patrones de movimiento como saltos, personas andando o sentada, como es el caso de [121], que alcanza una

precisión del 95.4% reconociendo emociones con la base de datos de la Figura 4.7. No obstante, el hecho de reconocer gestos no necesariamente va ligado a la capacidad de reconocer emociones.



Figura 4. 7. Ejemplo de 5 emociones y 3 acciones para reconocimiento de emociones basado en gestos. Fuente: [121].

- Reconocimiento facial:** esta técnica se ha usado a lo largo de los años principalmente como medio para reconocer a personas. Sin embargo, se ha vuelto útil para reconocer emociones [124], incluso intentando categorizarlas dentro del cuadrante de Russell, estimando su valencia y excitación [125]. Para conseguir esto, se construye un grafo del rostro (una red de diferentes puntos localizado en la imagen, como los ojos o la boca) y se compara usando un algoritmo de aprendizaje automático y una base de datos validada. Además, existen herramientas comerciales (como Face API de Microsoft) para realizar este reconocimiento, siendo usadas por investigadores en sus experimentos [126]. A pesar de ello, es necesario tener en cuenta la capacidad de alterar las expresiones faciales para mentir, lo que conocemos como “cara de póker”.

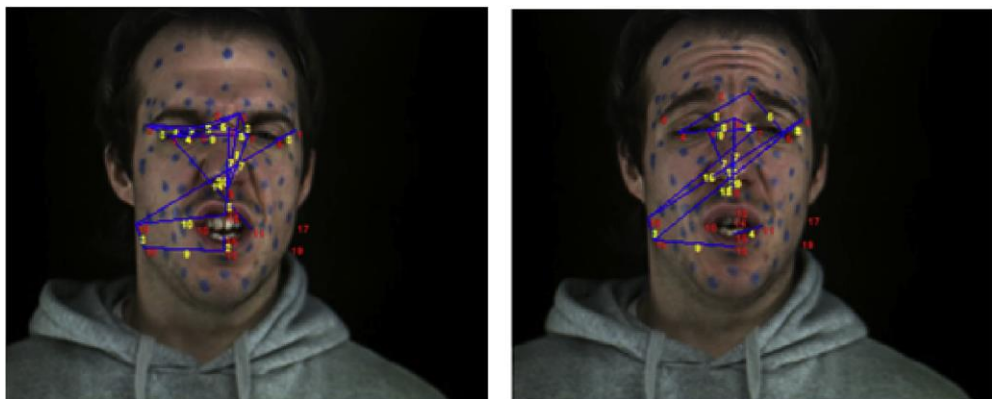


Figura 4. 8. Ejemplo de grafos del rostro asociados a dos emociones. A la izquierda, emoción de enfado y a la derecha, ejemplo de sentimiento de disgusto. Imágenes obtenidas de [124].

- **Reconocimiento de la voz o el discurso:** la comunicación es la forma más efectiva para expresar los sentimientos y emociones. Es un hecho que los seres humanos tienen la capacidad de modular el tono y nivel de la voz cuando están enfadados, tristes o sorprendidos, por lo que el reconocimiento de las emociones a través del discurso es uno de los métodos más usados, a pesar de ser una aproximación desafiante. La literatura muestra diversos mecanismos [127]–[131] para mejorar e intentar identificar emociones a través de grabaciones de audio. A pesar de ser aproximaciones distintas, es común entrenar los algoritmos que van a clasificar con bases de datos y registros estandarizados, normalmente provenientes de audios de actores y actrices (EmoDB, IEMOCAP o SAVEE, por ejemplo). Una vez entrenado, el algoritmo es capaz de clasificar nuevas grabaciones. Aunque este tipo de técnicas son capaces de alcanzar precisiones muy altas, llegando incluso al 95% [128], su forma de entrenar al algoritmo normalmente proviene de bases de datos ficticias, lo cual podría ir en detrimento de los resultados, tal y como sucede con el reconocimiento de gestos.

Como se ha mencionado, el reconocimiento de emociones suele ir ligado a tres estados básicos: positivo, negativo o neutro. Algunos estudios intentan una clasificación dentro del cuadrante de Russell. Sin embargo, una precisión aceptable en la clasificación se entiende como un alto porcentaje de aciertos en la clasificación sin haber empleado una base de datos ficticia para entrenar al modelo. No debemos olvidar que las bases de datos actuales provienen en su mayoría de actores y actrices, por lo que se trata con emociones que han sido fingidas.

4.4. Combinación de las tecnologías y herramientas

4.4.1. BCIs aplicados en entornos de Realidad Virtual

La combinación más común de los tres campos descritos en la sección anterior es aquella formada por la Realidad Virtual junto con las interfaces cerebro-ordenador. Tal y como se muestra en la literatura [132], la RV se ha aplicado, entre muchas otras muchos campos, a la creación de entornos seguros para personas que necesitan entrenamiento en el uso de sillas de ruedas, especialmente para aquellos casos en los que su condición les imposibilita controlarlas a menos que sea mediante BCIs y señales neurológicas.

La RV se ha aplicado también en los casos de estudio [133], [134] cuyo objetivo principal radicaba en entrenar a personas en el uso de BCIs basados en imaginación motora, así como evaluar este entrenamiento, respectivamente. En estos estudios, se usaban entornos 3D o virtuales a modo de guía visual para mejorar la señal adquirida por el BCI. En ambos experimentos, los resultados resaltaron el impacto del entorno virtual, así como la influencia de la inclusión de información háptica en la respuesta cerebral.

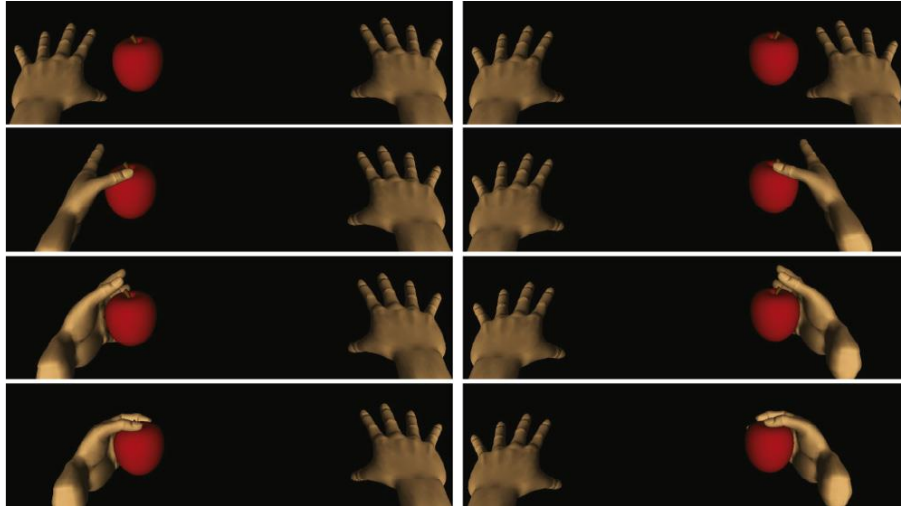


Figura 4. 9. Imagen obtenida de [133], donde se usa RV para entrenar a personas en el uso de BCIs basados en Imaginación motora, utilizando un escenario de RV con objetos como feedback.

Otra área donde la RV y los interfaces cerebro-ordenador actúan en simbiosis es en el campo de los juegos. En [135], se desarrolló un juego de carreras basado en RV donde múltiples jugadores podían jugar en línea usando solo dos electrodos. La posibilidad de conectar a varias personas con BCIs de forma simultánea se bautiza como “Internet de los Cerebros” en este estudio.

El Internet de las Cosas o IoT está también ligado a estas soluciones basadas en la tupla RV-BCI. Existe una propuesta [136] donde se usó un BCI para controlar las características de un entorno virtual, con intención de ser aplicado en el uso y control de dispositivos IoT. Esto brindaría la posibilidad de controlar multitud de dispositivos de una forma más sencilla, sobre todo para aquellas personas con problemas de movilidad o autonomía, tal y como se ha descrito en los casos donde se desarrollaban aplicaciones para rehabilitación basados en RV.

La RV es especialmente útil en el campo de la telemedicina y el entrenamiento de cirujanos, proveyendo de un entorno libre de riesgos o agravios para los pacientes. Los BCIs se incluyen en estas soluciones para mejorar la interacción humano-máquina en los entornos virtuales desarrollados [137], proporcionando una herramienta completa y con potencial de ser usada en este o en otros campos, como el del entretenimiento.

Finalmente, fruto del trabajo desarrollado en esta tesis, se destacan dos investigaciones en las que se usa un entorno de RV para replicar una terapia basada en cambios cromáticos de la luz [138], así como proponer un nuevo sistema que utiliza experiencias en 360 grados [139]. En ambos casos, la finalidad del estudio era ofrecer una herramienta de prestaciones similares a las soluciones convencionales para reducir el estrés, utilizando un dispositivo de adquisición de señales EEG para la medición de este nivel.

4.4.2. BCIs relacionados con el reconocimiento de emociones

Como se ha descrito anteriormente, una forma de reconocer emociones es mediante el

uso de bioseñales. Esto se refiere al reconocimiento de las emociones mediante el uso de señales provenientes del cuerpo, como la respuesta galvánica de la piel o la electroencefalografía.

De entre las señales que se pueden usar, el EEG es una de las fuentes de datos más usadas para el desarrollo de BCIs y para este reconocimiento. De hecho, existen en la literatura diversos artículos que tratan de ofrecer una visión general del reconocimiento de emociones mediante la adquisición de señales EEG [113], [140], lo que refuerza la relación entre estos dos campos. También se encuentran estudios que tratan de implementar modelos y entrenarlos para reconocer emociones (positivas, negativas o neutras), haciendo hincapié en aquellos que usan algoritmos de aprendizaje automático [110], [115]. Otros estudios hacen uso de sistemas BCI para estudiar el estado emocional de la atención [141], [142], estrés [143], o incluso mecanismos para acelerar la relajación [144].

En estos estudios, así como en muchos otros que se pueden encontrar en la literatura, las emociones, al menos en términos de su valencia, pueden ser reconocidas con una alta precisión. Este hecho demuestra las posibilidades y el potencial de estas herramientas y técnicas, si bien los autores coinciden en que aún se necesitan mayores esfuerzos e investigaciones.

4.4.3. El uso de la Realidad Virtual en el campo de las emociones

La RV es una tecnología aplicada también al campo de las emociones, ofreciendo diferentes percepciones sobre lo que se ve o se experimenta. Se ha introducido en diferentes escenarios para evaluar el impacto de su inclusión o para generar distintas emociones en el usuario. Esto no se puede considerar como reconocimiento de emociones *per se*, aunque se ubica dentro del contexto de generación y control de las emociones, el cual está ampliamente relacionado con el reconocimiento de emociones.

Incluyendo aquellos artículos de revisión sobre la inclusión de la RV en este campo de las emociones [145], existen varios ejemplos en la literatura donde se usa la RV con el objetivo de estudiar su impacto en diferentes áreas. Una de estas áreas es la experiencia y la satisfacción sentida por espectadores deportivos [146], donde se analizan las diferencias entre una experiencia clásica en dos dimensiones frente a una basada en RV. En este estudio, los autores concluyeron afirmando que la RV tenía un impacto claro en estos espectadores, mejorando la interactividad y la viveza de la experiencia, lo que provocaba en ellos una mayor sensación de presencialidad.

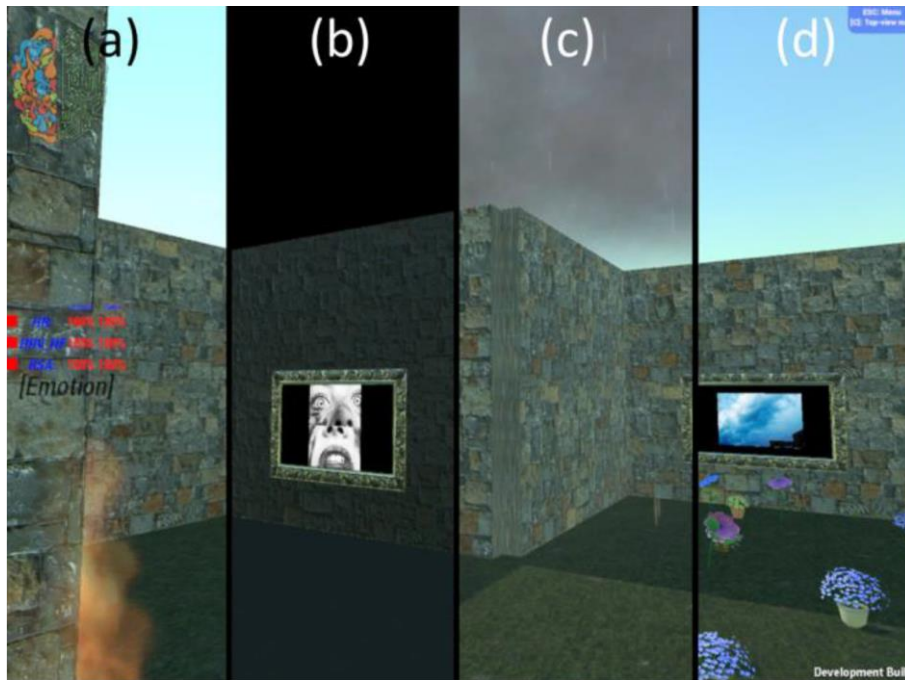


Figura 4. 10. Vista del laberinto desarrollado en [147]. Cada segmento muestra la misma zona, con usando metáforas visuales para representar diferentes emociones. (a) Fuego para enfado. (b) Caída de la noche para miedo. (c) Lluvia para tristeza. (d) Flores para alegría.

Otro estudio similar se encuentra en [147] y podría considerarse como un intento prometedor de incluir la RV en el terreno de las emociones y su reconocimiento. El objetivo principal de este estudio es proponer una arquitectura que permita generar contenido de forma procedural, basándose en el estado emocional del usuario. Esta propuesta se presenta como un laberinto en el que el usuario posee control total sobre a dónde dirigirse, aunque su generación depende de sus emociones, siendo capaz de discernir entre enfado, tristeza, miedo o alegría. Este laberinto está principalmente propuesto para regular las emociones y así ayudar a la salud mental y el bienestar, aunque no se descarta su aplicación en el campo del entretenimiento o la rehabilitación, por ejemplo. No obstante, se considera aun en desarrollo, pues no posee aún la capacidad de reconocer en tiempo real las emociones.

Una vez más se destaca aquí la labor realizada en este proyecto [138], [139], considerando el uso de un sistema de RV para influir directamente en el estado emocional del usuario, reduciendo su nivel de estrés.

4.4.4. Tabla resumen

Se muestra a continuación un resumen de las referencias más destacadas de este capítulo, indicando las áreas de estudio involucradas, el objetivo planteado en cada trabajo, el campo de aplicación, las métricas de rendimiento empleadas y los resultados de su aplicación:

| Estudio | Áreas de estudio | Objetivo | Campo de aplicación | Métricas de rendimiento | Rendimiento |
|---------------------------------|------------------|---|-----------------------------------|---|--|
| [Borges et al. 2016] [132] | VR + BCI | Entorno virtual para el uso de sillas de ruedas basado en BCI | Rehabilitación | En desarrollo | N/A* |
| [Liang et al. 2016] [133] | VR + BCI | RV para mejorar la guía visual para Imaginación Motora | Aplicación BCI | Correlación cruzada | 83.01% |
| [Wu et al. 2017] [134] | VR + BCI | BCI basado en RV con información háptica | Aplicación BCI | T-test (Preliminar) | Diferencias significativas con datos hápticos ($p < 0.05$) |
| [Ye et al. 2018] [135] | VR + BCI | Juego de carreras en RV controlado con BCI | Internet de los cerebros | Validación cruzada y encuestas | Precisión offline de ~90% y una puntuación en encuestas > 5 |
| [Coogan et al. 2018] [136] | VR + BCI | Control BCI en un entorno RV | Internet de las cosas | Porcentaje de aciertos (PVC) | ~60% |
| [Hsu et al. 2017] [137] | VR + BCI | Sistema BCI para aplicaciones de RV | Telemedicina y telecomunicaciones | Precisión SVM | ~85% en tres <i>datasets</i> |
| [Diemer et al. 2015] [145] | ER + VR | Revisión de la RV aplicada al reconocimiento de emociones | Reconocimiento de emociones | Revisión | N/A** |
| [Kim et al. 2019] [146] | ER + VR | Impacto de RV en la audiencia deportiva | Audiencia deportiva | Test de hipótesis en los datos de encuestas | Mejoras significativas de la RV en la experiencia y satisfacción |
| [Bermúdez et al. 2019] [147] | ER + VR | Laberinto basado en emociones (preliminar) | Salud mental | En desarrollo | N/A* |
| [Alarcão et al. 2019] [113] | ER + BCI | Reconocimiento de emociones mediante EEG | Reconocimiento de emociones | Revisión | N/A** |
| [Zhang et al. 2020] [140] | ER + BCI | Reconocimiento de emociones con algoritmos de ML | Reconocimiento de emociones | Revisión | N/A** |
| [Wei et al. 2020] [110] | ER + BCI | Reconocimiento de emociones basado en EEG | Reconocimiento de emociones | Clasificación, Matrices de confusión | Media: 78.86 Desv.: 8.09 |
| [Liang et al. 2019] [115] | ER + BCI | Reconocimiento de emociones con algoritmo no supervisado | Reconocimiento de emociones | Nivel de excitación, valencia y dominancia | Precisión ~60% |
| [Minguillón et al. 2016] [141] | ER + BCI | Detección de la atención en escenarios multitarea | Neurometría | ITR y precisión | 5.41-6.03 bpm 0-54-0.39 prec. |
| [Lopez-Gordo et al. 2015] [142] | ER + BCI | Detección de la atención en escenarios multitarea | Neurometría | Precisión | 0.47-0.32 |

| | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|---|-------------------|---------------------------------|--|
| [Minguillón et al. 2018] [143] | ER + BCI | Sistema portable de detección de estrés | Neurometría | Nivel de precisión | 86% |
| [Minguillón et al. 2017] [144] | ER + BCI | Acelerar reducción del estrés con el color de la luz | Neurometría | Test ANOVA | Diferencias significativas usando azul |
| Vaquero et al. [138] | VR + BCI / VR + ER | Replicar con RV una terapia tradicional de cromoterapia | Terapia emocional | Test ANOVA | Sin diferencias significativas entre las dos terapias |
| Vaquero et al. [139] | VR + BCI / VR + ER | Proponer un sistema de RV para reducción del estrés | Terapia emocional | Test de hipótesis y correlación | Reducción significativa del estrés. Alta correlación entre encuestas y biomarcadores |

Tabla 4. 1. Resumen de los artículos más relevantes de esta sección. () La propuesta se encontraba en Desarrollo, por lo que aún no hay métricas de su rendimiento. (**) Se trata de una revisión bibliográfica, por lo que no hay métricas que analizar.*

Desarrollo experimental I

Como se ha presentado a lo largo del documento, todo el desarrollo experimental se ha dividido en dos secciones, cumpliendo cada una de ellas con parte de los objetivos planteados. Así, esta primera parte del desarrollo satisface los dos primeros objetivos del trabajo de tesis, mientras que la siguiente sección recoge el trabajo conducente al cumplimiento del tercer objetivo. Esta sección se compone de dos estudios experimentales publicados en revistas científicas. Sin embargo, dado que ambos trabajos siguen una metodología muy similar, la forma óptima de presentarlos es agrupándolos en una misma sección, dejando claras las particularidades de ambos trabajos.

Por tanto, se presentarán varias secciones, que versarán sobre los objetivos de cada uno de los estudios, la metodología, presentada de forma común, y los resultados derivados de cada uno de los experimentos, junto con una discusión y conclusiones de estos.

5.1. Contexto y objetivos

Cada uno de los estudios experimentales llevados a cabo satisface uno de los dos primeros objetivos planteados al inicio del presente proyecto. Así, el primer estudio realizado [138] tenía como finalidad demostrar la viabilidad de replicar una sesión de cromoterapia clásica mediante el uso de técnicas propias de la Realidad Virtual. Esta sesión estaba diseñada para tener un efecto relajante a través de bucles de colores en la luz ambiental, por lo que el fin último de este estudio era conseguir una reducción del estrés similar, pero usando la Realidad Virtual. Para ello, se virtualizó una sala de cromoterapia usada actualmente en un centro de educación especial de Granada, el centro de educación especial San Rafael. En esta virtualización se tuvieron en cuenta las características concretas de la sala, replicando el entorno, elementos, sonidos y luces empleadas en esta. El fin de esta sala es ayudar a los niños a relajarse, fomentando el autocontrol de sus propias emociones y reduciendo los problemas temperamentales que puedan tener. Finalmente, se analizaron y compararon los datos EEG obtenidos de dos grupos de participantes, los que experimentaron la solución basada en RV y aquellos que utilizaron la sala de cromoterapia del centro.

El segundo estudio realizado [139], si bien sigue una metodología similar, tenía por objeto el desarrollo y validación de un nuevo sistema para reducción del estrés, basado en Realidad Virtual y, más concretamente, en el uso de videos de 360 grados. Estos videos son aquellos que captan imágenes en el campo de visión completo, pudiendo girar y rotar la vista para ver todo lo que hay alrededor. Esto lo convierte en una tecnología completamente inmersiva y susceptible de ser usada con el fin de reducir el estrés. Este sistema, aun compartiendo similitudes con el sistema desarrollado en el primer estudio, no tenía el fin de replicar algo existente, sino de proponer algo nuevo que logre el mismo

objetivo de una forma mucho más barata y atractiva para el usuario final, permitiendo al sujeto elegir la experiencia que más le atrajese, de entre cuatro posibilidades. Finalmente, se extrajeron datos provenientes de la actividad cerebral para comprobar el efecto de esta sesión de reducción de estrés, comparando dichos resultados con los datos aportados de encuestas realizadas durante el desarrollo de la sesión.

5.2. Metodología

5.2.1. Participantes

Los participantes de ambos estudios experimentales fueron reclutados mediante una convocatoria a través del correo institucional de la Universidad de Granada. En ambos casos solo se consideraron para el estudio personas sanas y sin ningún tipo de trastorno mental que pudiese afectar en la recogida de los datos, siendo la participación completamente voluntaria y sin recibir ninguna gratificación por participar.

Para el primer estudio [138], se contó con 20 participantes (edad media, 24.20 ± 4.03 años), mientras que en el segundo estudio [139], participaron 23 sujetos (edad media, 22.65 ± 5.48 años). Todos los voluntarios, estudiantes de la Universidad de Granada, firmaron un consentimiento informado, indistintamente del estudio al que pertenecían. En este consentimiento se les informó de todas las tareas que desarrollarían, incluyendo toda la información relevante sobre registro EEG y el uso de Realidad Virtual. Así mismo, se usó este documento para recoger datos de los participantes, como la edad, el género o posibles problemas que pudieran afectar al experimento.

Finalmente, cabe mencionar que, en ambos estudios, la duración de la sesión completa no fue en ningún caso superior a una hora, teniendo una duración aproximada de entre 30 y 40 minutos. Además, en todo momento los participantes tenían la posibilidad de concluir prematuramente el experimento sin necesidad de justificar su rechazo a seguir con el estudio.

5.2.2. Procedimiento experimental

El proceso experimental seguido en ambos estudios es muy similar, por lo que, para evitar redundancias en la redacción, se exponen de forma conjunta bajo una misma sección. No obstante, dado que ambos estudios fueron publicados en una revista científica, es posible remitirse a estos para ver cada metodología por separado. En primer lugar, Figura 5.1 muestra los procesos seguidos en ambos estudios, en forma de diagrama.

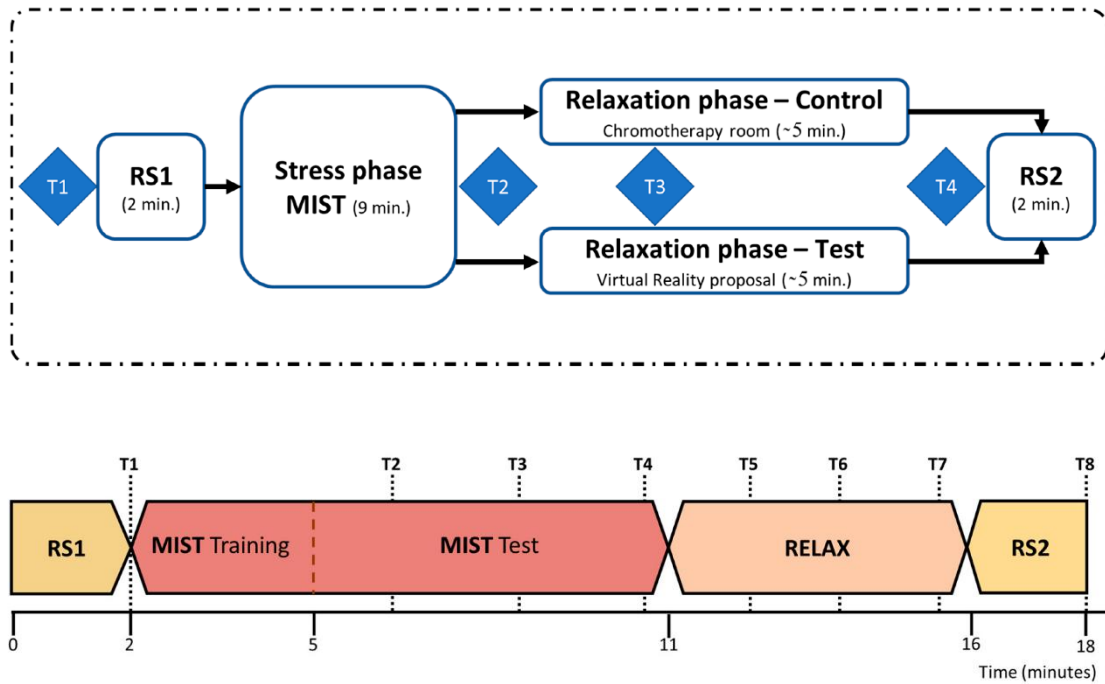


Figura 5. 1. Diagrama temporal de una sesión correspondiente a cada uno de los estudios. Arriba, el proceso seguido en el primer estudio. Abajo, el análogo del segundo estudio. Fuentes: [138], [139].

Antes de comenzar la sesión, los participantes leyeron y firmaron el consentimiento informado, haciendo hincapié en la comprensión de este y resolviendo todas las dudas que pudieran surgir. Tras esto, se les colocó un gorro de electrodos conectado a un sistema de adquisición de señales EEG. En el primer estudio, además, los participantes fueron asignados de forma aleatoria al grupo de control (sujetos S01, S03, S05, S07, S08, S10, S12, S14, S16, S19) o al grupo de test (sujetos S02, S04, S06, S09, S11, S13, S15, S17, S18, S20). En ambos estudios los pacientes fueron instruidos sobre las tareas y las etapas que componían la sesión, tal y como se muestra en los diagramas de la Figura 5.1, dando comienzo el estudio.

Primero, común a ambos estudios, se realizó una primera etapa denominada *Resting State*, o RS1 atendiendo a los diagramas. Esta etapa consistía en un periodo de 2 minutos en los que el participante debía permanecer estático, relajado y con los ojos cerrados. Esta etapa estaba concebida como una forma de homogeneizar el estado cognitivo y mental de todos los participantes, de forma que partiesen de unas condiciones similares. Tras esta etapa inicial, los participantes de ambos estudios realizaron el MIST (*Montreal Imaging Stress Task*), un test diseñado para inducir estrés mediante la resolución de operaciones aritméticas dentro de un marco de tiempo. Este test está específicamente diseñado para producir estrés [148] y se ha usado en varios casos con este propósito [149]–[151].

Tras la realización del MIST, los participantes pasaron una etapa de relajación (RELAX o *Relaxation Phase*, atendiendo a los diagramas). En esta fase, los participantes debían permanecer tranquilos y con los ojos abiertos, intentando en todo momento disfrutar de la experiencia y maximizar la relajación. Esta etapa es la única que difiere en ambos estudios, dado que en cada uno de ellos se proponía una solución con un objetivo distinto.

En el primer estudio, cabe recordar que los participantes fueron divididos en dos grupos. Así, el grupo de control experimentó esta sesión de relajación haciendo uso de una sala de cromoterapia convencional. Para ello, llegada esta fase, fueron acompañados a la sala de cromoterapia, sentándose en un puf que podían colocar en cualquier punto de la sala, de acuerdo con sus preferencias. Una vez acomodados, daba comienzo la etapa de relajación, donde sonaba una música de fondo y la luz iba cambiando su valor cromático. En el caso del grupo de test, esta sesión se llevó a cabo en la misma sala donde se realizó el experimento, colocando previamente el mismo puf. Una vez acomodados, experimentaron la misma sesión que el grupo de control, virtualizada y presentada mediante un visor HMD, el Oculus Quest. Esta experiencia virtual recreaba las condiciones de la sala de cromoterapia convencional, utilizando la misma gama de colores y la misma música de fondo. También se replicaron las mismas condiciones de temperatura y luz ambiental de la sala. Una comparativa de la sala real, así como su virtualización se puede ver atendiendo a la Figura 5.2.



Figura 5. 2. A la izquierda, imagen de la cámara de seguridad de la sala de cromoterapia. A la derecha, la recreación de la misma imagen en Realidad Virtual. Fuente: [138].

En el segundo estudio, la etapa de relajación se llevó a cabo usando únicamente una solución de Realidad Virtual. En este caso, como se muestra en la Figura 5.3, los participantes tenían la posibilidad de escoger una de entre cuatro experiencias relajantes basándose en sus gustos y preferencias. Para ello, contaban con el controlador del HMD para elegir la experiencia deseada. Estas experiencias utilizaban videos en 360 grados para ofrecer una sensación completa de inmersión en el entorno escogido, en el que debían permanecer durante 5 minutos intentando maximizar la relajación.



Figura 5. 3. Vista del participante de los diferentes escenarios en 360 grados ofrecidos. (a) Playa. (b) Cueva con cascada. (c) Aurora Boreal. (d) El espacio. Fuente: [139].

Finalmente, completada esta etapa de relajación, los participantes realizaron otro periodo de *Resting State*, en las mismas condiciones que el primero. Adicionalmente, durante la sesión experimental, los participantes debían indicar el nivel de estrés que percibían en distintos instantes del estudio, marcados en el diagrama con la letra T. Esta encuesta consistía en dos preguntas: “¿Tu nivel de estrés ha aumentado o disminuido desde la última vez que preguntamos?” “¿Cuál es ese nivel de 1 a 5, donde 1 es el mínimo y 5 el máximo?”. Así, los participantes debían indicar de forma numérica el nivel estrés percibido – SPSL o *Self-Perceived Stress Level* – que consideraban que tenían en ese momento. En el primer estudio, estas preguntas se hacían de forma verbal en los instantes establecidos para ello, mientras que, en el segundo estudio realizado, para evitar interferir en la sesión, las preguntas fueron añadidas tanto en la experiencia de RV como en el software del MIST. Al final de la sesión, los participantes que usaron la solución de Realidad Virtual completaron una última encuesta relacionada con esta experiencia.

5.2.3. Diseño experimental

En primer lugar, en lo que respecta a la adquisición de las señales EEG, en ambos

casos se colocaron electrodos en las posiciones Fp1, Fp2, Cz, O1 y O2. En el primer estudio, se colocaron dos electrodos más en las posiciones F7 y F8, mientras que, en el segundo estudio, se colocaron en las posiciones F5 y F6. Todas las posiciones se han listado de acuerdo con el sistema internacional 10/20. También, se colocó una referencia en el lóbulo de la oreja izquierda y una tierra común en este mismo punto o entre Fpz y Cz, respectivamente. Se consideraron estas posiciones de acuerdo a estudios previos relacionados con la evaluación de emociones como el estrés mediante el análisis del registro EEG [152], [153]. Finalmente, para el registro del primer estudio, se utilizó el dispositivo de adquisición de señales EEG RABio w8 (Universidad de Granada, España) [143], [154]. Para el segundo estudio, se usó el sistema EEG semiseco Versatile de 16 canales (Bitbrain) [155].

En lo referente al MIST, su implementación se llevó a cabo usando el software MatLab R2016a (MathWorks, Natick, NA, EEUU). Se desarrolló como una interfaz gráfica en la que aparecían operaciones aritméticas compuestas por sumas, restas, multiplicaciones y divisiones. En esta interfaz aparecía también una botonera dispuesta de forma circular con los números de 0 a 9, que los participantes usaban para responder. Cabe destacar que todas las operaciones daban como resultado un número entero comprendido entre estas opciones. Adicionalmente, una barra de progreso se mostraba para representar el tiempo que quedaba para responder (Figura 5.4). Al final de cada operación, esta misma barra se usaba para indicar el porcentaje de aciertos del participante. También se añadía una zona coloreada en torno al 80% de aciertos, siendo este el objetivo de aciertos que se pedía en la prueba. Todo esto se mostraba con la intención de añadir presión al participante durante la realización de la prueba. Esta prueba tiene dos partes diferenciadas, la primera dedicada a entrenamiento y familiarización con el software, con una duración de 3 minutos. La otra parte constituye la prueba e incluye el temporizador y el porcentaje de aciertos tras cada operación. Esta parte tiene una duración de 6 minutos.

Adicionalmente, la persona responsable del experimento debía entrar en la sala tres veces durante la prueba para aumentar la presión sobre el participante de forma verbal, indicándole el tiempo restante o pidiendo una ratio de aciertos superior. En el primer estudio, además, se aprovecharon estas entradas para realizar la encuesta sobre el estrés. En el segundo estudio, para reducir la interacción con el participante, la encuesta se implementó dentro de la interfaz del MIST. Un ejemplo de la interfaz se puede ver en la Figura 5.4. Toda la prueba del MIST se realizaba en un ordenador portátil con pantalla táctil, con la que los participantes interactuaban usando su mano dominante. Toda la información relativa al MIST y su protocolo se puede consultar atendiendo a [148].

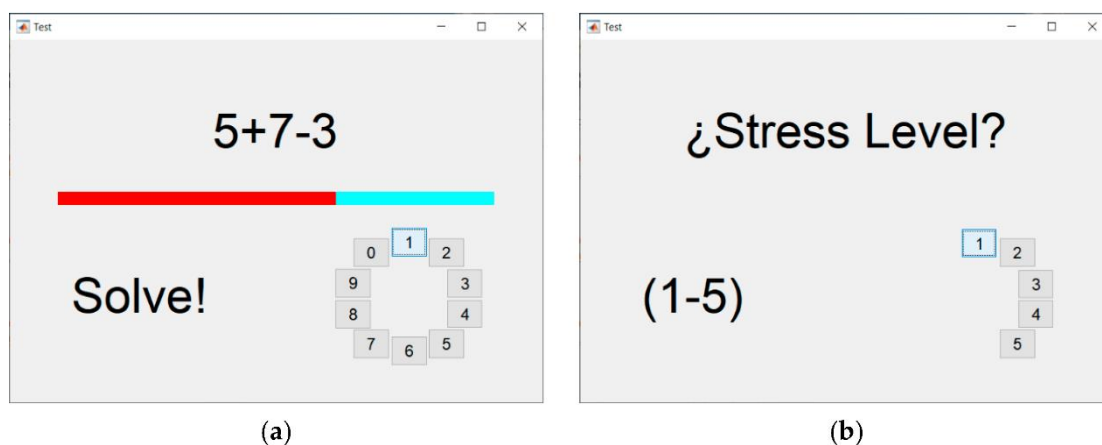


Figura 5. 4. Interfaz del MIST usada durante la fase de estrés. (a) Vista mostrada durante la resolución de las operaciones aritméticas. (b) Vista mostrada durante la encuesta sobre el nivel de estrés. Fuente: [139].

La experiencia de relajación preparada para el primer estudio precisaba de dos elementos. En primer lugar, la sala de cromoterapia utilizada en el grupo de control era una sala de 6 m² con las paredes blancas, así como el suelo y el techo. Contaba con una cámara IP de seguridad para controlar el interior de la sala, así como un puf y un póster de una playa. La luz y el sonido se podían controlar desde una sala anexa. Esta sala se usa en el colegio de educación especial San Rafael, de Granada, como una habitación de descanso para niños con problemas de conducta. Para la sesión de relajación del grupo de test, se desarrolló una sala de cromoterapia virtual utilizando el software Unity de 2019, recreando de la forma más fidedigna posible el entorno, sonido, luz ambiental y texturas de la sala. En este caso, se colocaron las luces en la misma posición, adecuando la intensidad y la tonalidad de estas para recrear el bucle cromático empleado en la terapia real (azul, magenta y verde). Además, se utilizaron las mismas pistas de audio empleadas en la sala, de forma que ambas sesiones fuesen idénticas, si bien diferían en la forma de experimentarlas. Finalmente, se controló la temperatura y se usó el mismo puf para que los participantes empleasen los mismos elementos para su comodidad.

En lo referente al segundo estudio, se desarrollaron cuatro experiencias de 360 grados basadas en Realidad Virtual usando el mismo software que en el primer estudio, aunque en su versión más actual (Unity 2020). Para cada experiencia, se configuró el fondo del escenario para mostrar cada uno de los videos en 360 grados, colocando la vista del jugador en el centro de la sala y permitiendo movimientos dentro de la sala, así como la rotación de la vista usando el HMD. También se diseñó un menú simple en el que los participantes podían ver una miniatura de las experiencias que se ofrecían y seleccionar aquella deseada usando el controlador. Se ofrecían un total de cuatro experiencias, siendo estas una playa sin gente alrededor, una cueva con una cascada en mitad de un bosque, un terreno nevado desde el que divisar auroras boreales, y un viaje a través del espacio, tal y como se muestra en la Figura 5.3. A su vez, de forma periódica aparecía dentro de la experiencia la encuesta relacionada con el nivel de estrés percibido, a la que debían contestar usando de nuevo el controlador.

Para finalizar, como se ha indicado previamente, se realizaron varias encuestas para conocer el nivel de estrés que cada participante consideraba que tenía en cada momento, evaluado de 1 a 5. Las preguntas realizadas eran una adaptación de la escala de estrés

percibido o PSS, de acuerdo con su nombre original. Esta adaptación se realizó para minimizar el tiempo requerido para contestar las preguntas, reduciendo su impacto en la sesión. Así, en el primer estudio se realizaron cuatro encuestas: una antes del primer *Resting State*, T1; otra después del MIST siendo esta T2; otra encuesta pasados 90 segundos desde el comienzo de la etapa de relajación, T3; y una última encuesta al final de esta (T4). En el segundo estudio se realizaron un total de 8 encuestas repartidas a lo largo de la sesión: la primera al final del primer *Resting State*, T1; dos encuestas pasados 120 y 240 segundos desde el inicio del MIST siendo T2 y T3, respectivamente; una encuesta al final del MIST (T4); T5 y T6, pasados 90 y 180 segundos después del inicio de la fase de relajación; T7, al final de la fase de relajación; y T8, tras el segundo *Resting State*. En ambos casos, los instantes de las encuestas se eligieron para maximizar la información relativa al estrés percibido por los participantes, minimizando las interacciones con el usuario, reduciendo, por ende, la interferencia en el experimento.

5.2.4. Procesamiento de señal

En ambos estudios, el procesamiento de señal es similar, por lo que se detallará el procesamiento realizado, indicando en cada punto, las particularidades de uno u otro estudio. Es importante señalar que, en ambos estudios, pese a contar con más canales, solo se consideraron las señales recogidas en las posiciones prefrontales (Fp1 y Fp2), así como frontales (F7 y F8, y F5 y F6, respectivamente).

En primer lugar, se identificaron las distintas partes que componían cada estudio (atendiendo de nuevo al diagrama de la Figura 5.1), extrayendo y concatenando los registros EEG de cada una de las partes para procesarlos de forma conjunta. En el caso de los periodos de *Resting State*, solo se incluyó el minuto central en esta concatenación. De igual forma, en el segundo estudio, solo se consideró la parte de test del MIST, eliminando la etapa de entrenamiento.

Una vez concatenados los registros, se aplicó a la señal un filtro IIR Butterworth, de orden 3 y sin desfases, entre 1 y 50 Hercios. También se aplicó a la señal un filtro *notch* o rechazo banda, para atenuar la señal en la frecuencia entre 48 y 52 Hz, eliminando así posibles interferencias de la red eléctrica [144], [153]. Posteriormente, las señales EEG fueron divididas en *epochs* de 2 segundos, sin solapamiento entre ellos. Adicionalmente, se pusieron a cero aquellos *epochs* cuyo valor superase un umbral establecido mediante una meticulosa inspección visual de las señales (100 μV en el primer estudio y 75 μV en el segundo), de acuerdo con otros estudios encontrados en la literatura [156]–[158]. A cada *epoch* se le aplicó un *detrending* (proceso para eliminar la tendencia) y se normalizó, para que sus valores quedasen comprendidos entre 0 y 1.

Tras esto, se calculó la densidad de potencia espectral (PSD) en varias bandas de frecuencia (Delta, Theta, Alfa, Beta y Gamma) y se promedió la PSD de todos los canales utilizados en el procesamiento. Con el valor de la PSD obtenido, se calculó el Gamma Relativo – RG por su acrónimo inglés –, un biomarcador altamente relacionado con el estrés, de acuerdo con la literatura [143], [153], [159]. Este biomarcador se calcula con la ecuación 5.1 (obtenida de [138]), como el cociente entre la potencia en la banda gamma y la suma de la de los ritmos lentos (alfa y theta). En ambos estudios, se consideró solo el RG como marcador del estrés, dada la capacidad de este marcador de indicar el nivel

de estrés. Al gamma relativo obtenido de cada participante se le aplicó un *resampling* o remuestreo para facilitar el promediado de los resultados.

$$RG = \left(\frac{Power_{Gamma}}{Power_{Alpha} + Power_{Theta}} \right) \quad (5.1)$$

En el primer estudio, se aplicó el *resampling* para obtener 480 muestras, mientras que, en el segundo estudio, se obtuvieron 390 muestras. Esto se debe a que la duración de las señales usadas en el procesamiento eran 16 y 13 minutos, tal y como se muestra en las ecuaciones 5.2 y 5.3 (obtenidas de [138], [139], respectivamente). Esto corresponde a la concatenación del minuto central de los dos periodos de *Resting State*, el MIST y la fase de relajación. En el caso del segundo estudio, se prescindió de la parte de entrenamiento del MIST, resultando en una duración final 3 minutos más corta.

$$480_{epochs} = \frac{16_{min} \cdot 60_{s/min}}{2_{s/epoch}} \quad (5.2)$$

$$390_{epochs} = \frac{13_{min} \cdot 60_{s/min}}{2_{s/epoch}} \quad (5.3)$$

Para suavizar la señal, se aplicó un filtro de media móvil (*smoothing*), con una longitud de 19 y 15 muestras, respectivamente. Este filtro suaviza la señal a través del promedio del número de muestras indicado o *span*. Así, para el cómputo del valor final de una muestra, se calcula la media de esta junto con las muestras adyacentes, utilizando un total de muestras igual al *span* siempre con la muestra que se pretende calcular en el centro. Esta operación, debido a su naturaleza, puede introducir desfases en las oscilaciones del RG, debido a este promediado. Así, con un *span* de 15, como es el caso del segundo estudio, los picos o eventos importantes pueden estar desplazados alrededor de 15 segundos a izquierda o derecha, debido a que se promedian 7 muestras a cada lado, correspondiendo cada muestra al valor de un *epoch* de 2 segundos.

Finalmente, mediante inspección visual, se detectaron los participantes cuyo gamma relativo tenía un comportamiento inversamente proporcional al nivel de estrés experimentado. Los datos de estos participantes se invirtieron antes de promediar las curvas del gamma relativo, de cara a obtener una representación global del gamma relativo de todos los participantes. Este efecto es algo que se presenta en diferentes estudios, donde el gamma relativo puede guardar una relación directa [144], inversamente proporcional [159], [160], o incluso presentar ambas relaciones en distintos participantes de un mismo estudio [153], como fue el caso de estos estudios.

5.2.5. Análisis estadístico

En primer lugar, para realizar un análisis estadístico de los datos, se calculó el promedio del gamma relativo de todos los sujetos, así como el error estándar de la media

(o *Standard Error of the Mean*, SEM). Este promedio se realizó en ambos estudios, así como el cómputo de la media de los resultados de las encuestas de estrés percibido o SPSL.

En el primer estudio, tras obtener las curvas del RG de los dos grupos (control y test), se realizó un ajuste polinómico de 6° grado para obtener la tendencia global de las curvas y facilitar su comparación en ambos grupos. A su vez, se usó el coeficiente de correlación de Pearson (PCC) para obtener una medida de la similitud de ambas curvas. También, tras obtener la media y desviación estándar de las encuestas del SPSL de ambos grupos, se utilizó el test no paramétrico Wilcoxon *signed rank* para comparar el estrés percibido por los participantes de ambos grupos. Se empleó este test debido a que los datos no cumplían los requisitos de normalidad que permitiesen el uso de otro tipo de tests. Para corroborar este hecho, se empleó el test de normalidad de Lilliefors (con un p -valor > 0.05).

Así, el test de Wilcoxon permite evaluar dos conjuntos de datos para determinar si los datos siguen una misma distribución, en base a su media y desviación. Este test se aplicó para comprobar si existían diferencias significativas entre las respuestas dadas por los participantes de ambos grupos. A su vez, también se empleó para buscar diferencias significativas en el estrés percibido por los participantes de un mismo grupo, evaluado a lo largo de las diferentes fases del experimento. En todos los tests realizados, se usó un nivel de significancia, alfa, de 0.05 ($\alpha = 0.05$).

Finalmente, se evaluaron las respuestas de las encuestas de satisfacción realizadas al final del experimento para evaluar el nivel de inmersión, confort y la experiencia en general de Realidad Virtual, tal y como la percibieron los participantes del grupo de test. Para ello se calculó la media y desviación estándar de las respuestas.

En el segundo estudio, también se empleó el test de Wilcoxon debido a que los datos no pasaron el test de normalidad de Lilliefors, al igual que los datos del primer estudio. De nuevo, este test se usó para determinar la existencia de diferencias significativas entre las respuestas de los participantes a lo largo del experimento. De forma similar, se utilizó el test de Wilcoxon *rank sum* para comprobar si existían diferencias significativas entre las respuestas dadas por los participantes de cada una de las cuatro experiencias. Además, se calculó el valor medio del gamma relativo en el minuto previo a cada encuesta, de forma que, al aplicar el coeficiente de correlación cruzado entre estos valores y los valores de las encuestas, se pudiese estimar el nivel de relación existente entre estas dos medidas del estrés tomadas a lo largo del estudio. En todos los análisis estadísticos realizados se usó un nivel de significancia de 0.05 ($\alpha = 0.05$).

Finalmente, al igual que en el primer estudio, se obtuvieron datos relacionados con las encuestas de satisfacción realizadas al final del experimento, que versaban sobre la experiencia de Realidad Virtual. En este caso se pidió a los participantes que evaluaran la experiencia en términos del confort, nivel de inmersión y experiencia general, con una puntuación de 1 a 5.

5.3. Resultados

5.3.1. Resultados del primer estudio

En primer lugar, es preciso indicar también que los resultados obtenidos han sido publicados en un artículo y están accesibles para su visionado en [138]. Es necesario señalar también que se descartaron los datos de tres participantes pertenecientes al grupo de control. Estos sujetos (S03, S05 y S14) fueron eliminados debido a problemas técnicos durante la adquisición de las señales. Tal y como se ha indicado en la metodología, algunos *epochs* fueron descartados si su valor superaba un umbral. En el peor de los casos, se eliminó un 9 por ciento de estos en un mismo participante.

Respecto a los resultados y, tal como se comentaba con anterioridad, el gamma relativo, si bien se ha usado como indicador del estrés, su comportamiento puede ser directa o inversamente proporcional a este nivel de estrés, dependiendo de cada sujeto. En este estudio concreto, el gamma relativo de 7 de 17 participantes mostró un comportamiento directamente proporcional, mientras que en el resto (10 participantes), se mostró el comportamiento opuesto. Teniendo estos datos en cuenta, se separaron los datos de los participantes en dos grupos, el “Grupo 1” y el “Grupo 2”. El Grupo 1 estaba compuesto por los sujetos S02, S07, S08, S11, S16, S17 y S20, siendo estos los participantes cuyo gamma relativo exhibía una relación directa. El Grupo 2, conformado por aquellos cuya curva del RG era inversamente proporcional al nivel de estrés, estaba compuesto por los sujetos S01, S04, S06, S09, S10, S12, S13, S15, S18 y S19.

Así, se muestra en la Figura 5.5, la evolución temporal de este biomarcador del estrés, promediado teniendo en cuenta los grupos definidos, así como los participantes que, dentro de estos grupos, pertenecía al grupo de control y el de test. Por lo tanto, se muestran un total de cuatro gráficas, cada una identificada por el grupo al que pertenecen según la respuesta del gamma relativo (1 y 2), y su pertenencia a los grupos de control o test.

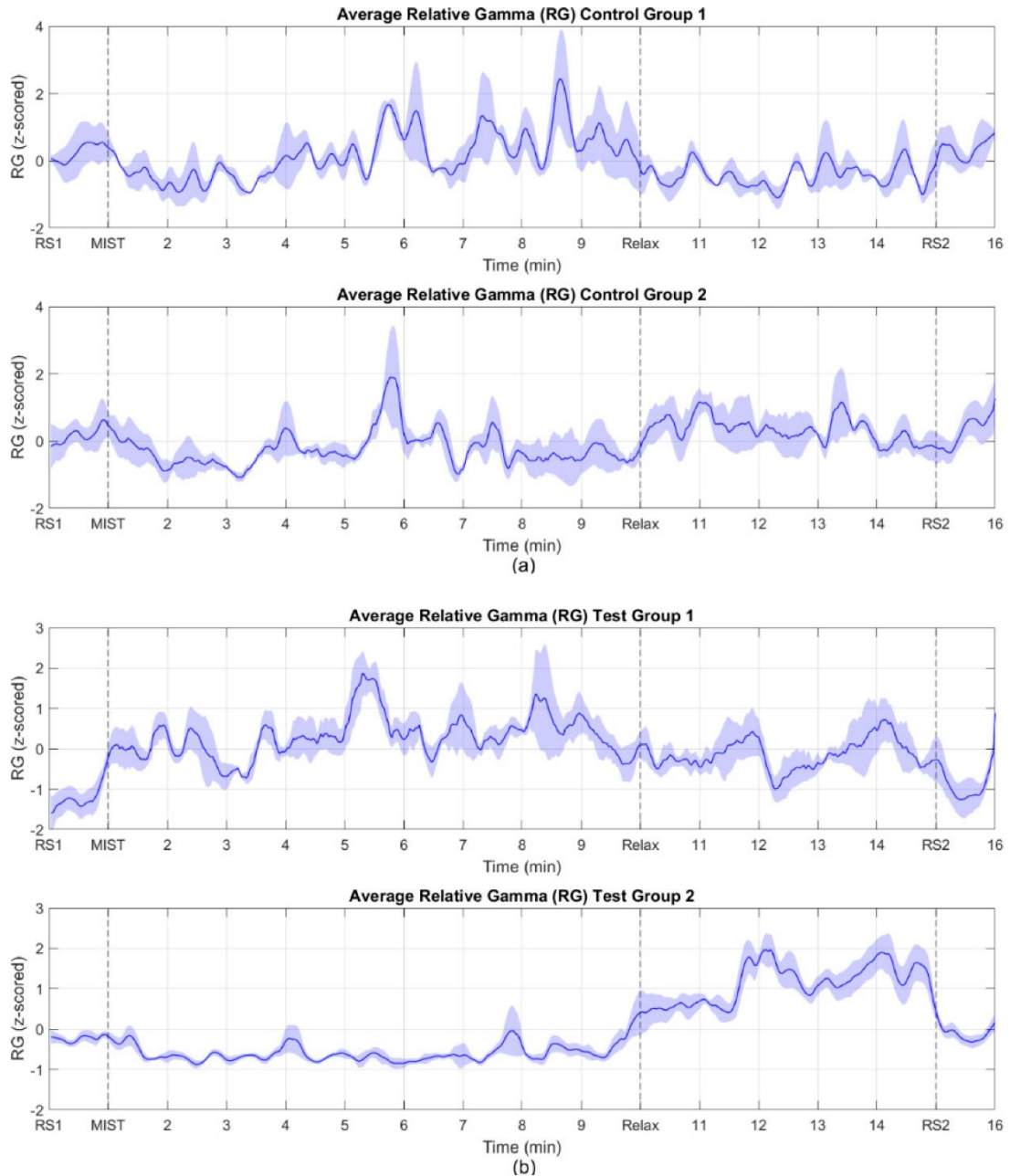


Figura 5. 5. Evolución temporal del biomarcador del estrés, gamma relativo. El grupo 1 (gráficas superiores) corresponde a los participantes con una respuesta directamente proporcional al nivel de estrés, El grupo 2 (gráficas inferiores) muestra los resultados de los participantes con la respuesta opuesta. En el eje de abscisas se indica el tiempo en minutos, así como los comienzos de las distintas etapas de la sesión. Las zonas sombreadas indican el error estándar de la media (SEM). (a) Grupo de Control. (b) Grupo de Test. Fuente: [138].

La Figura 5.6 representa la media conjunta de este gamma relativo, combinando los resultados de los Grupos 1 y 2. Para realizar esta media, en primer lugar, se invirtió la curva del gamma relativo de todos los participantes del grupo 2. Así, una vez que todos tenían un comportamiento directamente proporcional, se calculó la media. En la Figura 5.7 se representan de forma conjunta las curvas obtenidas de este proceso, juntando las gráficas de la Figura 5.6 y eliminando las zonas sombreadas para facilitar la vista.

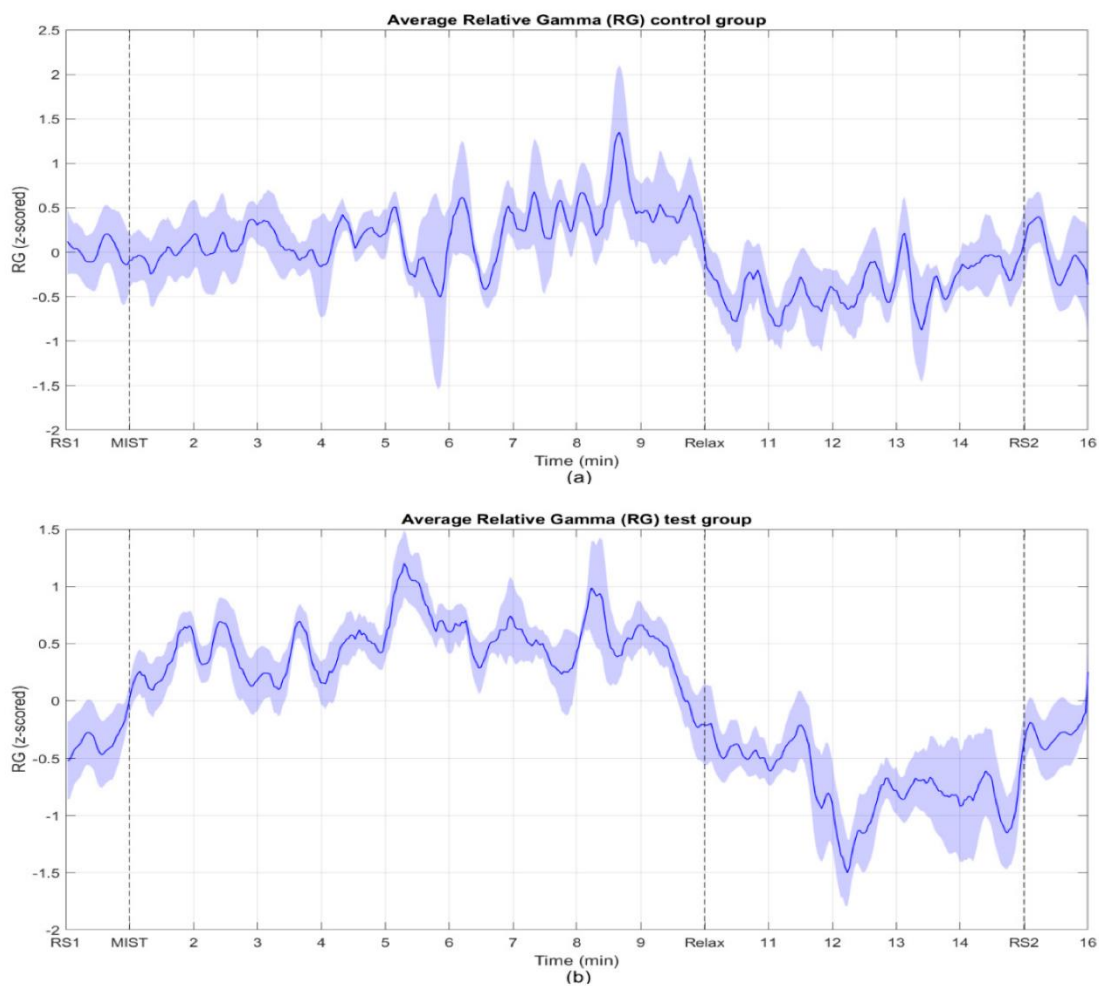


Figura 5. 6. Evolución temporal del gamma relativo en las distintas zonas de interés, promediando los datos de los participantes de los grupos 1 y 2. (a) Grupo de control. (b) Grupo de test. Fuente: [138].

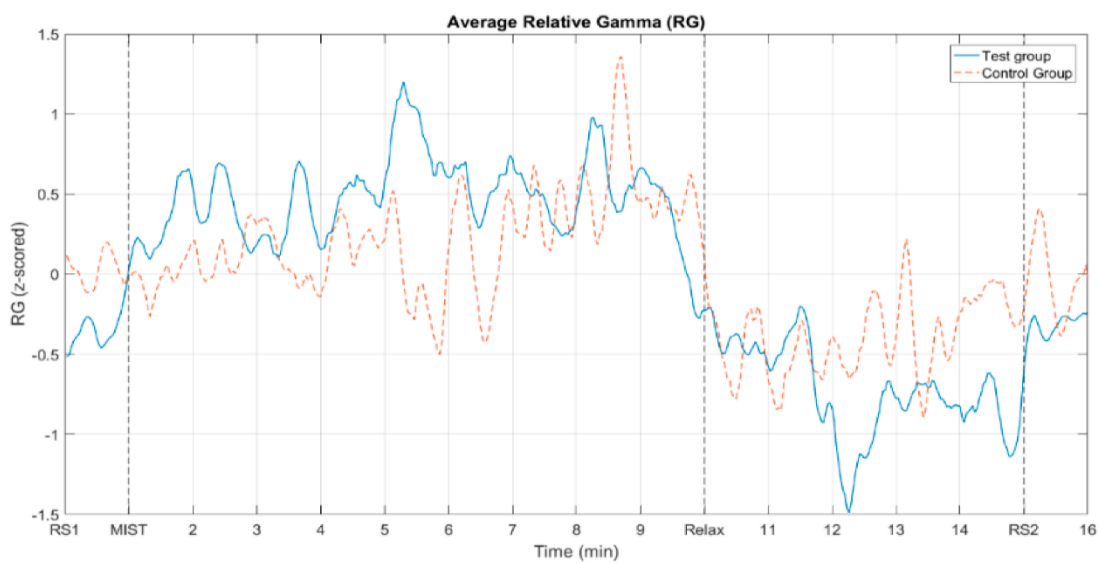


Figura 5. 7. Gamma relativo de los grupos de control y test, mostrados de forma conjunta. La curva sólida corresponde al grupo de control, mientras que la línea punteada hace referencia al grupo de test. Fuente: [138].

La Figura 5.8 permite mostrar de forma conjunta las curvas del gamma relativo promedio junto con las curvas obtenidas tras el ajuste polinómico de las mismas. Para ello, se usó un polinomio de grado 6 tanto en el grupo de control como el de test.

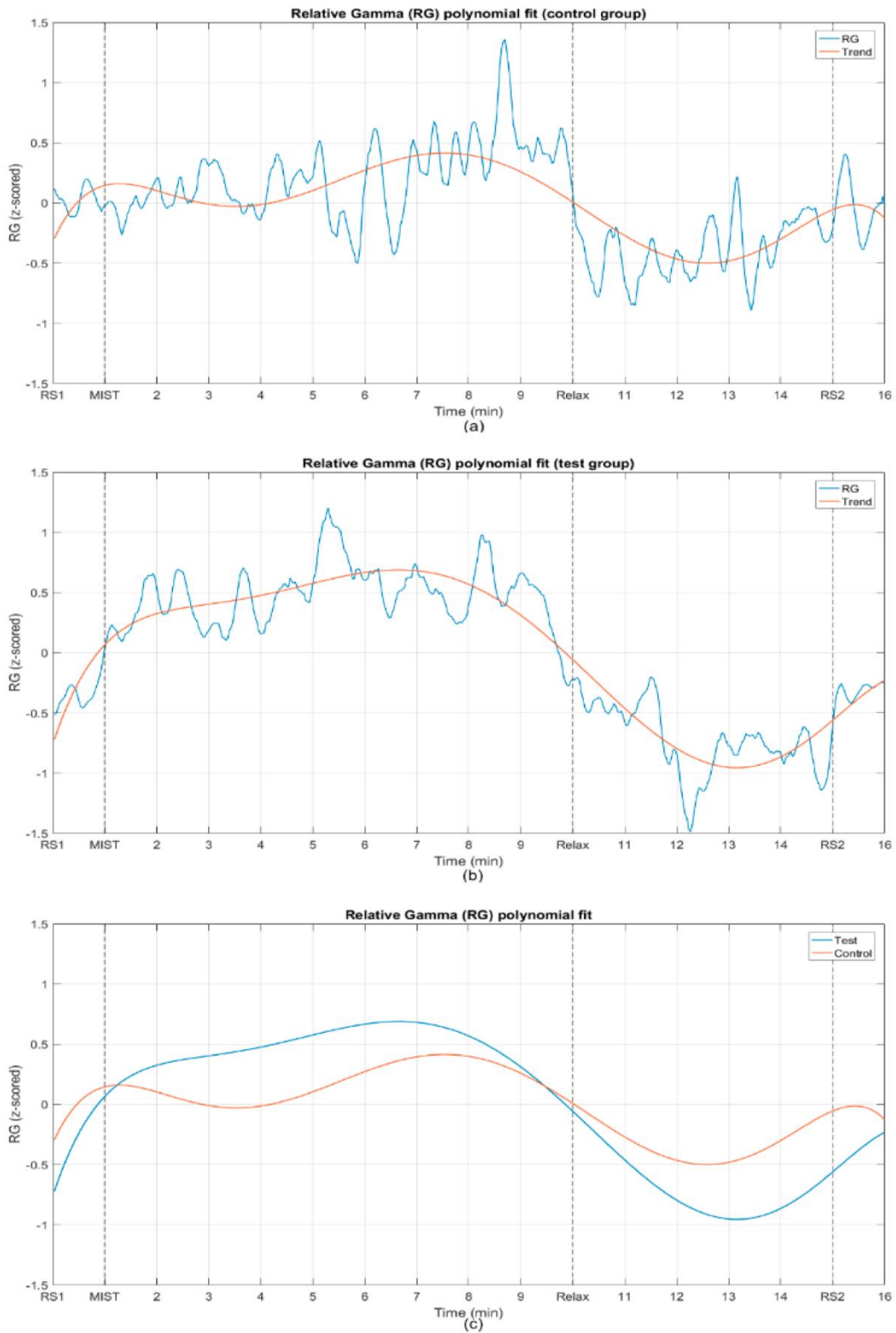


Figura 5. 8. Ajuste polinómico de grado 6 las curvas del gamma relativo. (a) Grupo de control. (b) Grupo de test. (c) Comparación de las dos curvas obtenidas con el ajuste. Fuente: [138].

La Tabla 5.1 resume los coeficientes de correlación de Pearson (PCC) obtenidos tras comparar las curvas medias del gamma relativo de los grupos de control y de test, así como las curvas obtenidas tras el ajuste polinomial. Así mismo, se incluyen los límites superior e inferior del intervalo de confianza del 95% obtenido en el cálculo de cada coeficiente.

| Pareja | Límite del CI inferior | PCC | Límite del CI superior |
|------------------------|------------------------|------|------------------------|
| RG control - | 0.54 | 0.60 | 0.65 |
| RG test | | | |
| Ajuste RG control - | 0.87 | 0.89 | 0.91 |
| Ajuste RG test | | | |

Tabla 5. 1. Coeficiente de correlación de Pearson (PCC) e intervalos de confianza del 95%, entre las curvas promedio del RG del grupo de control y de test, así como de las curvas obtenidas en el ajuste polinómico. Fuente: [138].

La Figura 5.9 ilustra la respuesta media de los participantes del grupo de control y de test a las encuestas de estrés percibido (SPSL) en los cuatro instantes de interés (T1, T2, T3 y T4).

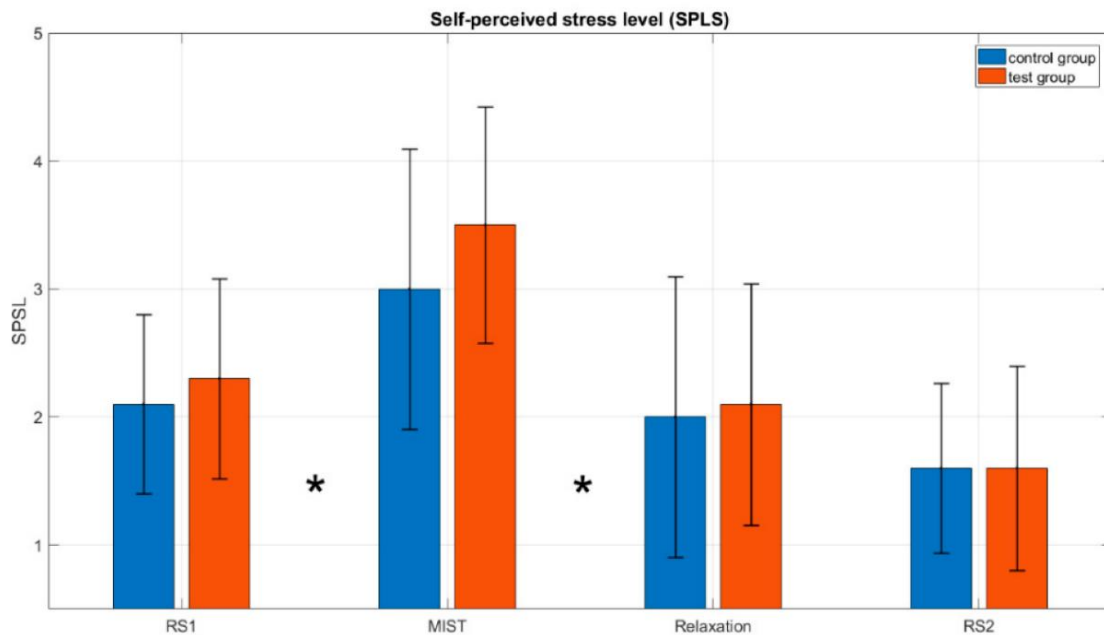


Figura 5. 9. Respuestas medias de las encuestas SPSL relativas al estrés percibido, realizadas en cuatro instantes de interés (T1 a T4 de la Figura 5.1). Las líneas negras representan la desviación estándar de la media. Los asteriscos (*) indican, para ambos grupos, la existencia de diferencias significativas entre las respuestas dadas en RS1 (T1) y MIST (T2), así como entre las respuestas dadas en MIST (T2) y Relax (T3). Para ello, se usó el test del Wilcoxon signed rank, obteniendo un p-valor < 0.05. Tras la comparación entre las respuestas de ambos grupos en los mismos instantes, no se encontraron diferencias significativas. En todos los análisis realizados, el nivel de significancia era 0.05 ($\alpha = 0.05$). Fuente: [138].

Tanto la Tabla 5.2 como la Tabla 5.3 recogen los resultados de los diferentes tests de Wilcoxon realizados. La Tabla 5.2 recoge todos los p -valores obtenidos tras comparar las respuestas de las encuestas de SPSL durante las diferentes etapas de la sesión experimental, tanto para los grupos de control como de test. La Tabla 5.3, por el contrario, resume la comparativa realizada entre las respuestas de ambos grupos en los mismos instantes, mostrando también los p -valores obtenidos.

| Grupo | RS1-MIST | MIST-Relax | Relax-RS2 |
|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Grupo de control | 0.0020 * | 0.0117 * | 0.1250 |
| Grupo de test | 0.0313 * | 0.0156 * | 0.2500 |

Tabla 5. 2. P-valores obtenidos tras la realización de los test de Wilcoxon signed rank para comparar las respuestas a las encuestas SPSL de los participantes a lo largo del experimento. Se compararon las repuestas entre instantes sucesivos tanto para el grupo de control como el de test. Los asteriscos () indican la existencia de diferencias significativas entre los datos. En todos los tests, el nivel de significancia era igual a 0.05 ($\alpha = 0.05$). Fuente: [138].*

| RS1 | MIST | Relax | RS2 |
|------------|-------------|--------------|------------|
| 0.7500 | 0.1875 | 0.8379 | 0.8125 |

Tabla 5. 3. P-valores obtenidos tras la realización de los test de Wilcoxon signed rank test para comparar las respuestas a las encuestas SPSL de los participantes del grupo de control y de test. Se compararon las respuestas de ambos grupos en cada instante. Fuente: [138].

La Figura 5.10 ilustra la media de las respuestas a las encuestas SPSL de los participantes en los cuatro instantes de interés (T1 a T4). Adicionalmente, se muestra también la curva del valor medio del gamma relativo en el minuto que precedía a la encuesta. Tanto para el grupo de control como para el de test se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (PCC) entre los datos de las dos curvas, obteniendo unos valores de 0.73 para el grupo de control, y 0.99 para el grupo de test.

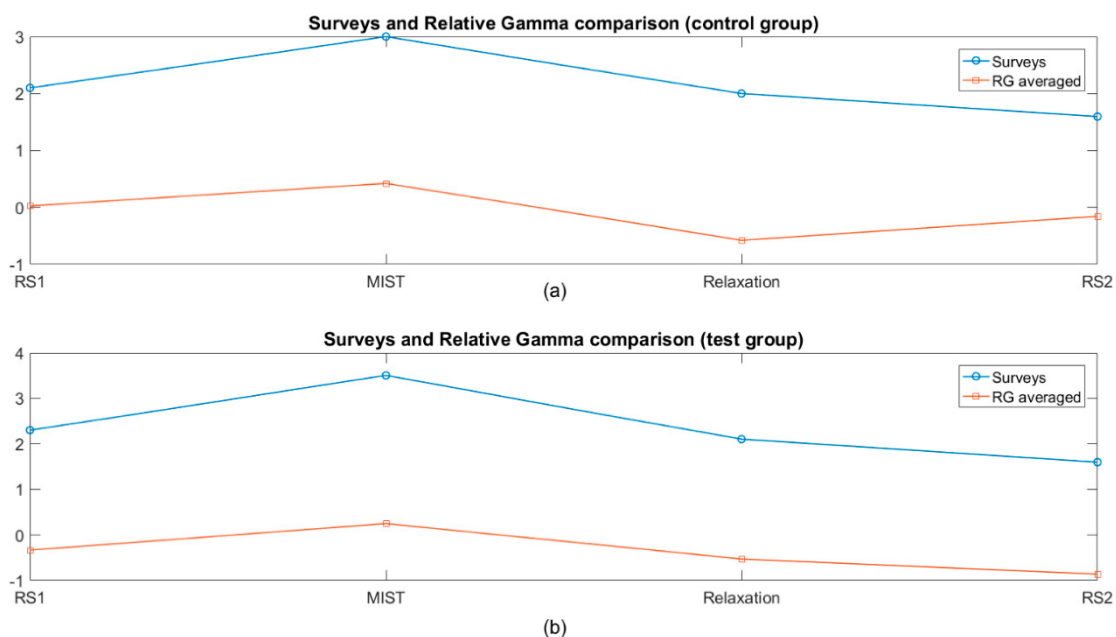


Figura 5. 10. Curva de las respuestas medias a las encuestas de SPSL en los cuatro instantes de interés. Se calculó de forma adicional el valor medio del gamma relativo en el minuto que precedía a cada encuesta. No se incluyen unidades en el eje de ordenadas debido a que las magnitudes de ambas curvas eran distintas. (a) Grupo de control. (b) Grupo de test. Fuente: [138].

Finalmente, la Figura 5.11 resume las respuestas dadas por el grupo de test a la encuesta de satisfacción de la experiencia de Realidad Virtual, realizada tras finalizar la sesión.

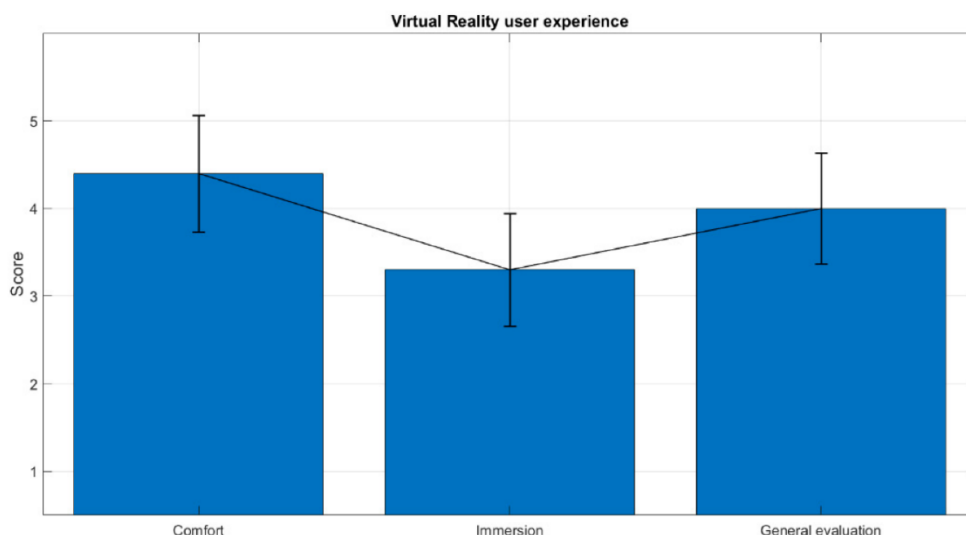


Figura 5. 11. Respuestas medias a la encuesta de satisfacción de la experiencia de Realidad Virtual. Las líneas negras indican la desviación estándar de la media. En el eje de abscisas se indican los tres puntos sobre RV evaluados (confort, inmersión y experiencia general). El eje de ordenadas indica la evaluación dada por los participantes, desde 1 (mínimo) hasta 5 (máximo). Adicionalmente, la totalidad de los participantes indicó que repetiría la experiencia. Fuente: [138].

5.3.2. Resultados del segundo estudio

Al igual que con los resultados del primer estudio, es preciso aclarar que todos los resultados que se van a mostrar han sido publicados en una revista, siendo este documento de acceso abierto u *open access*. Se puede encontrar en [139].

En primer lugar, debido a complicaciones y ruidos durante la adquisición del registro EEG, los datos de cuatro participantes tuvieron que ser descartados durante el procesamiento. Estos participantes fueron los sujetos S07, S08, S11 y S14. En los datos del resto de los participantes, algunos *epochs* fueron descartados debido a que su valor superaba el umbral establecido. En el peor de los casos (S17), se rechazaron un 12 por ciento de los *epochs*, aunque en la mayoría de los casos, este rechazo no superaba el 5 por ciento de los datos.

Respecto a las curvas del gamma relativo obtenidas, solo cuatro participantes (S06, S10, S20 y S22) mostraron una respuesta directamente proporcional al nivel de estrés experimentado, mientras que el resto de los sujetos mostraron una respuesta inversa. La Figura 5.12 ilustra la curva promedio del gamma relativo de todos los participantes. Para su obtención, primero se invirtió la curva de aquellos participantes cuyo RG se tenía un comportamiento inverso con respecto al nivel de estrés.

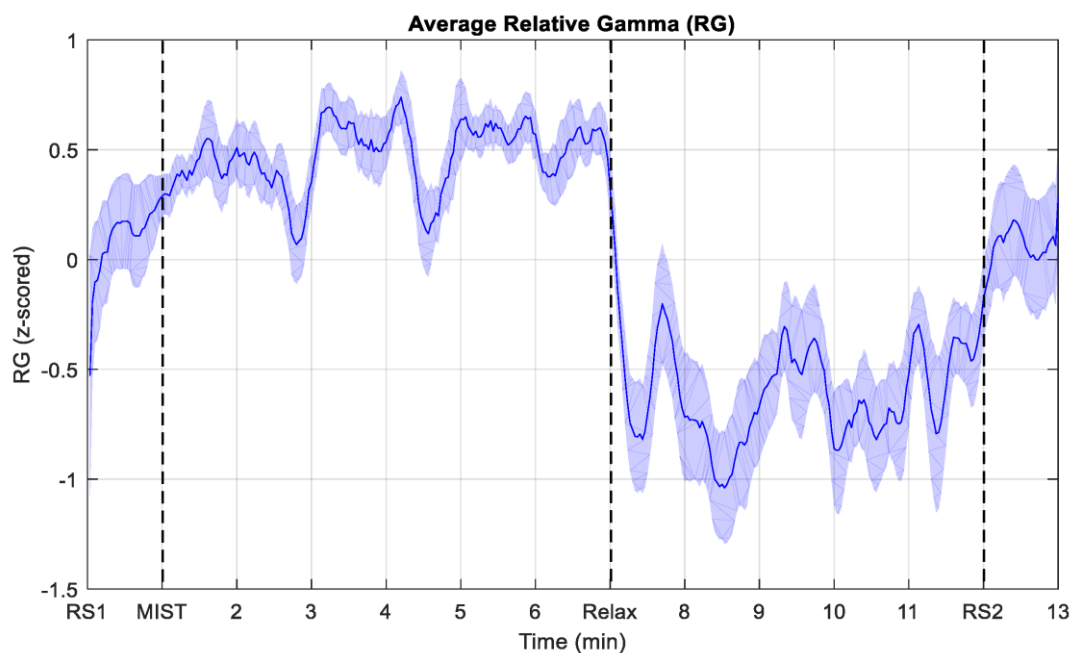


Figura 5. 12. Evolución temporal del gamma relativo medio de todos los participantes. La zona sombreada indica el error estándar de la media (SEM) obtenido. En el cómputo de esta curva, solo se consideró la fase de test del MIST, obviando los 3 minutos previos de entrenamiento. Fuente: [139].

La Figura 5.13 ilustra la evolución del gamma relativo de los participantes de cada una de las cuatro experiencias de 360 grados ofrecidas. Debido a que la elección de estas era completamente libre, no había el mismo número de participantes en todas ellas. Así, la proporción de cada experiencia seleccionada es: ~35% de la experiencia de auroras boreales, ~30% para el espacio, ~22% de la playa y ~13% para la cueva con la cascada.

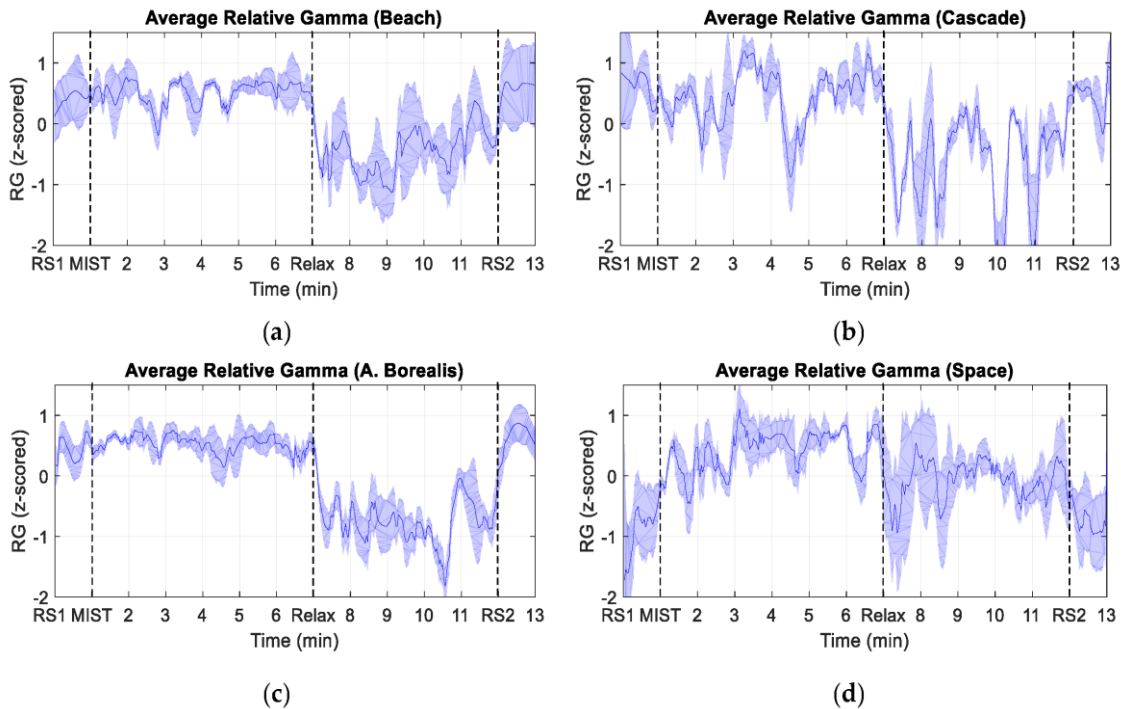


Figura 5. 13. Evolución del gamma relativo medio de los participantes de cada una de las cuatro experiencias de 360 grados. La zona sombreada corresponde al error estándar de la media (SEM). (a) Experiencia de la playa. (b) Experiencia de la cueva con cascada. (c) Experiencia de la aurora boreal. (d) Experiencia del espacio. Fuente: [139].

La Figura 5.14 muestra de forma conjunta las curvas del gamma relativo de las distintas experiencias de 360 grados, mostradas en la Figura 5.13. Para facilitar su visualización, se han eliminado las zonas sombreadas.

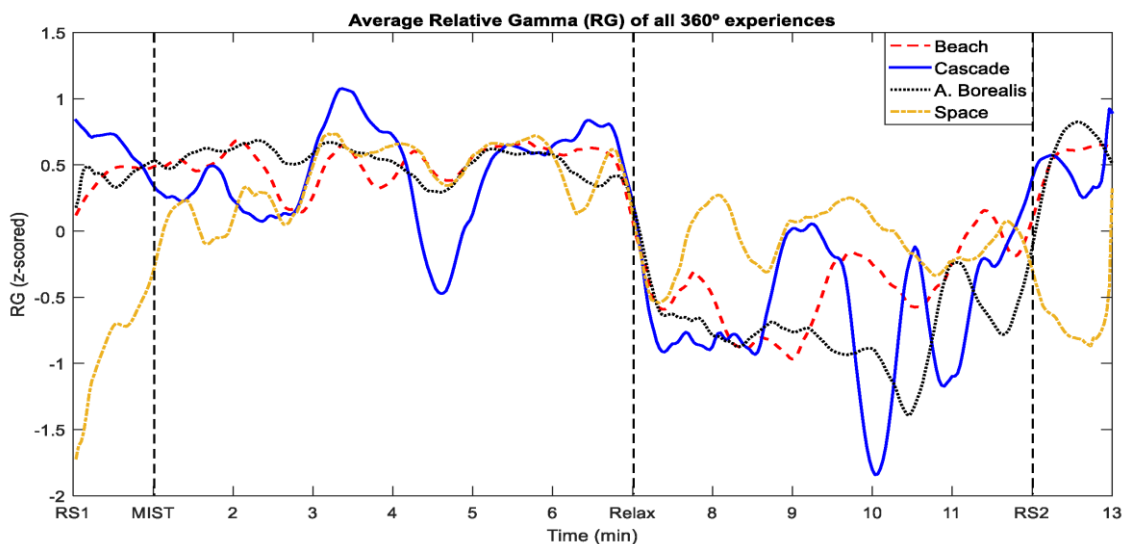


Figura 5. 14. Comparación de las curvas del gamma relativo de las cuatro experiencias de 360 grados. La línea sólida corresponde a la experiencia de la cascada; la punteada, la de la aurora boreal; la discontinua hace referencia a la experiencia de la playa; la punteada y discontinua, a la experiencia del espacio. Fuente: [139].

La Tabla 5.4 presenta los resultados arrojados por el test de Wilcoxon *rank sum* realizado para comprobar la existencia de diferencias significativas entre las respuestas a las encuestas de SPSL realizadas durante la fase de relajación, comparando las distintas experiencias ofrecidas. Tras la realización de los tests, no se encontraron diferencias significativas entre las respuestas dadas.

| | T5 | T6 | T7 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Playa - Cascada | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Playa - Boreal | 0.4988 | 0.2378 | 0.7832 |
| Playa - Espacio | 1.0000 | 0.6212 | 1.0000 |
| Cascada - Boreal | 0.5576 | 0.9818 | 1.0000 |
| Cascada - Espacio | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Boreal - Espacio | 0.2701 | 0.8923 | 0.5333 |

Tabla 5. 4. P-valores arrojados por los test de Wilcoxon rank sum realizados para comparar las respuestas a las encuestas de SPSL durante la fase de relajación, comparando todas las experiencias de 360 grados ofrecidas. Cada fila corresponde a la comparación entre las encuestas de dos de las experiencias y las columnas al instante de la encuesta. Fuente: [139].

La Tabla 5.4 representa los *p*-valores obtenidos en la realización del test de Wilcoxon *signed rank*. Estos tests se realizaron para comparar las respuestas dadas a las encuestas de SPSL entre instantes consecutivos (desde T1 a T8, de acuerdo con la Figura 5.1).

| Instante | T1-T2 | T2-T3 | T3-T4 | T4-T5 | T5-T6 | T6-T7 | T7-T8 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>P</i> -valor | 0.0003 * | 0.0020 * | 0.2891 | 0.0001 * | 0.0078 * | 1.0000 | 0.4531 |

Tabla 5. 5. P-valores obtenidos con el test de Wilcoxon signed rank para comparar las respuestas de las encuestas de SPSL a lo largo de la sesión experimental. Los asteriscos () indican la existencia de diferencias significativas entre los dos conjuntos de datos. En todos los tests, el nivel de significancia era igual a 0.05 ($\alpha = 0.05$). Fuente: [139].*

La Figura 5.15 ilustra la media de las respuestas dadas en cada instante de interés a las encuestas de SPSL relativas al nivel de estrés percibido. Se muestra como un diagrama de barras que representa la media de las respuestas en cada caso. A su vez, se añade una línea que une los centros de las barras para mostrar la tendencia en las respuestas. Finalmente, sobre la gráfica se muestran, en forma de asterisco, los puntos donde el test de Wilcoxon indicaba la existencia de diferencias significativas.

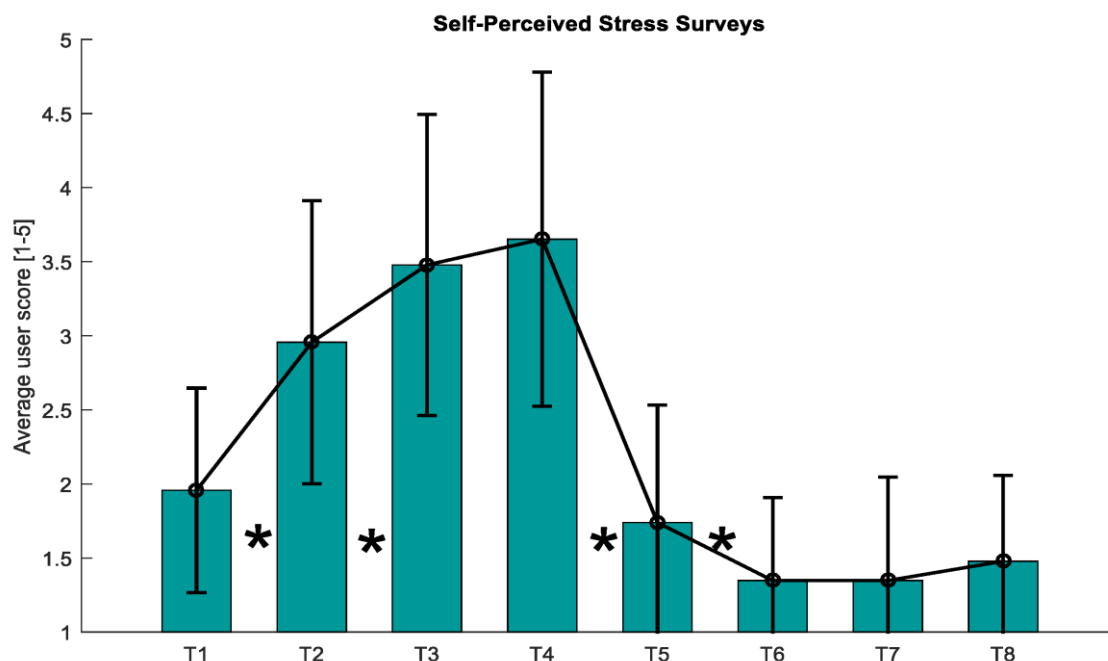


Figura 5. 15. Promedio de las respuestas de todos los participantes a las encuestas de SPSL. Las líneas verticales negras indican la desviación estándar de la media. Los asteriscos (*) indican la existencia de diferencias significativas, de acuerdo con los datos de la Tabla 5.5 (p -valor < 0.05). En este caso, existen diferencias entre T1-T2, entre T2-T3, entre T4-T5 y entre T5-T6. Fuente: [139].

La Figura 5.16 muestra de forma conjunta el valor medio de las respuestas a las encuestas de SPSL en los instantes de interés. De igual forma, se ilustra también el valor medio de la curva del gamma relativo en el minuto que precedía a cada encuesta. Ambas curvas se normalizaron para poder representarlas en una misma gráfica.

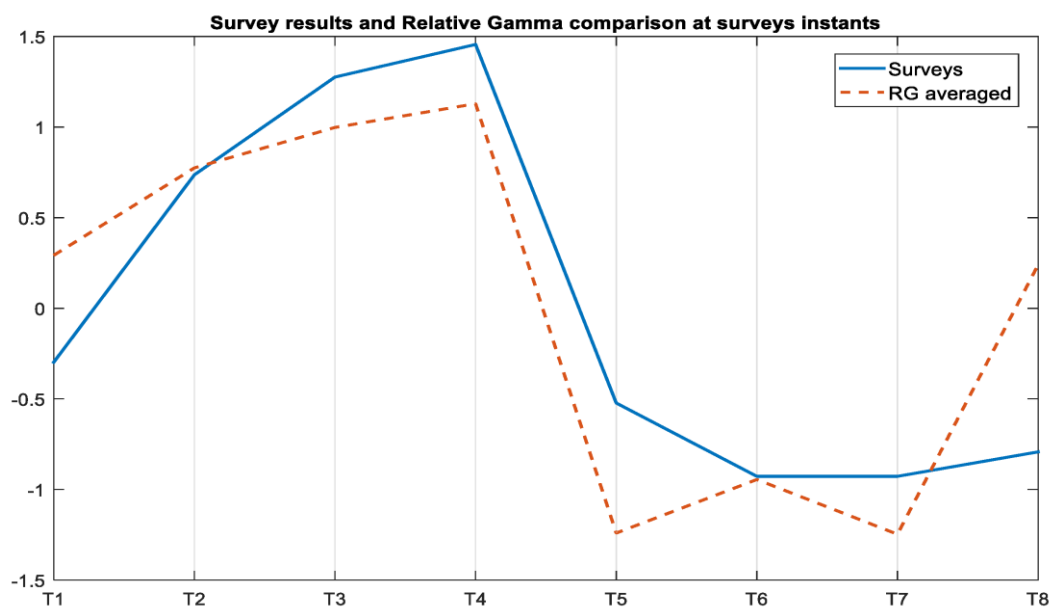


Figura 5. 16. Promedio normalizado de las respuestas a las encuestas de SPSL, así como del valor del gamma relativo en el minuto que precede a cada una de las encuestas. Fuente: [139].

Adicionalmente, se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson (PCC) como métrica de la similitud entre las curvas del gamma relativo y de las respuestas SPSL en los instantes de T1 a T8, obteniendo un valor de 0.8417 (CI = [0.3367, 0.9707]).

Finalmente, la Figura 5.17 representa las respuestas dadas por los participantes en relación con la encuesta de satisfacción realizada al final del experimento. Esta encuesta evaluaba la experiencia de Realidad Virtual en función del confort, el nivel de inmersión y una evaluación general de esta. Ante una pregunta que versaba sobre repetir la experiencia, todos los participantes afirmaron que la repetirían.

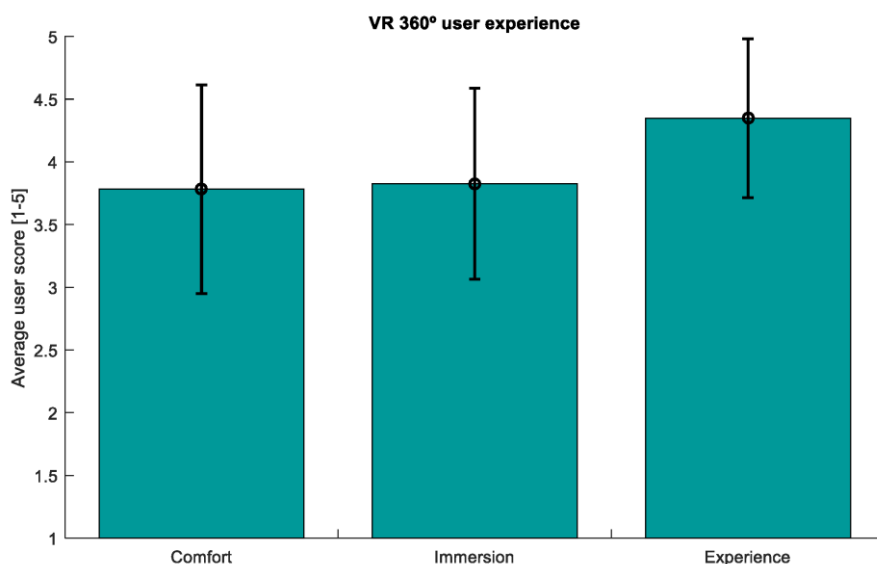


Figura 5. 17. Respuestas medias a la encuesta de satisfacción de la experiencia de Realidad Virtual. Las líneas negras indican la desviación estándar de la media. En el eje de abscisas se indican los tres puntos sobre RV evaluados (confort, inmersión y experiencia general). El eje de ordenadas indica la evaluación dada por los participantes, desde 1 (mínimo) hasta 5 (máximo). Adicionalmente, la totalidad de los participantes indicó que repetiría la experiencia. Fuente: [139].

5.4. Discusión

5.4.1. Discusión resultados primer estudio

En primer lugar, cabe recordar el objetivo de este primer estudio, publicado en [138]. El principal fin de este trabajo era demostrar la posibilidad de replicar una sala de cromoterapia y una sesión con esta para reducir los niveles de estrés. Para ello, se preparó una sesión de estrés-relajación y se llevó a cabo en las mismas condiciones en un grupo de control y otro de test. La única diferencia entre ambos era que el grupo de control experimentarían la fase de relajación por medio de la sala de cromoterapia real, mientras que el grupo de test, lo haría haciendo uso de la solución basada en RV. Para evaluar el estrés se recurrió a un biomarcador asociado en la literatura al estrés, el gamma relativo. Pese a la existencia de otros biomarcadores, como el cortisol de la saliva o la frecuencia cardíaca, existen varios estudios que avalan el gamma relativo, destacando su alta resolución temporal [143], [144], [153]. Los resultados obtenidos evidencian la capacidad del sistema de RV propuesto para reducir el estrés de forma similar al de la terapia

replicada.

Respecto a la división en grupos de los distintos participantes, a pesar de contar con los grupos de control y de test, fue necesario dividir estos, a su vez, en dos grupos más, siendo estos los grupos 1 y 2. Esta división, que se aprecia en la Figura 5.5, se realizó con el propósito de diferenciar entre aquellos participantes cuyo gamma relativo tuviese una relación de proporcionalidad directa con respecto al nivel de estrés (Grupo 1), y aquellos cuya respuesta fuera inversamente proporcional (Grupo 2). A pesar de que en la literatura se observa una relación entre este biomarcador y el nivel de estrés directa en algunos casos [144], inversa en otros [159], [160] o incluso se observan ambos comportamientos [153], la razón detrás de este efecto no está clara. Es un efecto que se ha tenido que considerar durante el procesamiento de la señal, aunque su estudio o explicación se consideró fuera del contexto de este trabajo. Resumiendo lo relativo a los datos, se recogieron los datos de 20 participantes, cada uno albergando un total de 480 muestras útiles (26 minutos de registro multiplicado por 30 muestras de cada minuto), obteniendo una única variable, el gamma relativo. A pesar de que se podían haber considerado un mayor número de participantes, los datos obtenidos son suficientes para justificar las premisas establecidas, si bien un mayor número de sujetos permitiría reducir los márgenes de error e intervalos de confianza.

Analizando las figuras mostradas, la Figura 5.6 representa el gamma relativo promedio de los sujetos pertenecientes al grupo de control y al de test, teniendo en cuenta que los datos de los participantes del grupo 2 se invirtieron antes de realizar la media. En estas curvas se aprecia claramente una tendencia positiva durante el desarrollo del MIST y un comportamiento opuesto una vez comienza la relajación. En el caso de los *Resting States*, el valor del gamma relativo es similar, lo que se considera como un comportamiento esperado dadas las condiciones idénticas en ambos periodos. Se destaca en ambas curvas que el gamma relativo sufre una caída intensa y alcanza su valor mínimo pasados unos dos minutos aproximadamente desde el comienzo de la relajación (alrededor de los minutos 11 y 12, respectivamente). Después, se produce un leve incremento en el valor del RG, posiblemente como consecuencia de alguna actividad cognitiva no intencionada o propiciada por un tiempo excesivo en la sala). Estas curvas son muy similares a aquellas aportadas por otros estudios [144], [153], si bien hay que considerar que han estudiado el efecto de sesiones de cromoterapia reales. Hasta donde se sabe, no hay otro documento que estudie una solución basada en Realidad Virtual similar a la propuesta. Sin embargo, la semejanza entre las curvas obtenidas y aquellas aportadas en los documentos citados sugieren que no es necesario una sesión con un tiempo muy elevado en la sala de cromoterapia (5 minutos en este caso, tal y como se muestra en la Figura 5.1). De acuerdo con las curvas obtenidas, un tiempo de aproximadamente 2 minutos sería suficiente para alcanzar un nivel mínimo de estrés. Con esto en cuenta, las terapias realizadas en colegios de educación especial podrían beneficiarse de los hallazgos de este estudio, pues se reduciría en gran medida el tiempo que un niño debe ausentarse del aula en este tipo de situaciones. Finalmente, respecto a las curvas obtenidas, es preciso señalar nuevamente que se usaron filtros de media móvil durante el procesamiento. Concretamente se usó un filtro con un *span* de 19 muestras (la muestra a calcular, las 9 que la preceden y las 9 posteriores). Dado que cada muestra equivale a un *epoch* de 2 segundos, al aplicar el filtro, los datos obtenidos pueden estar desfasados alrededor de 20 segundos con respecto a su valor teórico. Esto da sentido al hecho de que la caída del gamma relativo en la Figura 5.6 empieza unos segundos antes del comienzo de la relajación.

La Figura 5.7 permite comparar las curvas del gamma relativo del grupo de test y de

control. Observando la figura, es posible apreciar que ambas curvas siguen una tendencia similar, también similar a los resultados de otras investigaciones previas [143], [144]. Estas similitudes entre los dos grupos son más notorias si atendemos a los ajustes polinómicos de grado 6 realizados y mostrados en la Figura 5.8. Este ajuste se realizó con el propósito de representar la tendencia global de las curvas, evitando los picos y fluctuaciones inherentes a la actividad cerebral y el EEG. Así, el ajuste sirvió también para el cómputo del coeficiente de correlación de Pearson, que, dado el valor obtenido, evidencia la similitud de las curvas de estrés de ambos grupos (Tabla 5.1).

De acuerdo con el análisis de las respuestas de las encuestas de SPSL (Figura 5.9), se encontraron diferencias significativas entre T1-T2 y entre T2-T3, en ambos grupos (control y test). Este hecho, denotado con un asterisco en la figura, refleja un cambio en el nivel de estrés de los participantes en esos instantes, demostrando que este subió con el MIST y experimentó un decrecimiento en la fase de relajación. Este efecto en el estrés es fruto de un diseño apropiado del experimento, pues se diseñó con el objetivo de producir estrés y luego una relajación. Con respecto a esta misma figura, mediante inspección visual es posible apreciar que los niveles de estrés reportados por los participantes de ambos grupos apenas difieren, lo cual invita a reflexionar sobre lo buena que es la propuesta de Realidad Virtual, dado que se comparó con un método tradicional de reducción de estrés, como es la cromoterapia. Para profundizar en esta comparativa, se usó el test no paramétrico de Wilcoxon para comparar las respuestas dadas por los participantes de los dos grupos en T1, T2, T3 y T4. Este análisis no encontró diferencias significativas entre las respuestas (Tabla 5.2), lo que, sumado a la Figura 5.9 mostrada, sugieren que la reducción de estrés alcanzada con la solución propuesta es similar a aquella lograda mediante el uso de una sala de cromoterapia convencional.

Finalmente, es preciso señalar la fuerte similitud de la tendencia de las respuestas a las encuestas de SPSL y las curvas del gamma relativo (Figura 5.10), así como la alta correlación entre las mismas (0.73 en el grupo de control y 0.99 en el grupo de test). Estos datos avalan el uso del gamma relativo como un biomarcador fiable del estrés, tanto a nivel general como en el marco de este estudio.

5.4.2. Discusión resultados segundo estudio

En primer lugar, es preciso señalar que los resultados de este estudio fueron publicados en [139]. El objetivo principal de este estudio era demostrar la capacidad de una solución basada en experiencias de 360 grados, presentadas mediante un sistema de Realidad Virtual, para reducir el nivel de estrés. Esta solución se presentaba como una novedosa alternativa que no estaba basada en terapias o sesiones ya existentes, como era el caso de la cromoterapia. Para evaluar el impacto de esta solución, se obtuvo un biomarcador asociado al estrés, el gamma relativo, debido a su alta resolución temporal; así como encuestas relacionadas con el estrés (SPSL), diseñadas e integradas en la experiencia para minimizar su impacto en los participantes. Los resultados mostrados en la sección 5.3.2 evidencian la capacidad de reducción de estrés de las experiencias de 360 grados, siendo una sistema considerado cómodo e inmersivo.

Atendiendo a la Figura 5.12, se puede comprobar el gamma relativo promedio de todos los usuarios. Como se esperaba, de acuerdo con el estudio que precedía a este [138], el

gamma relativo experimenta una tendencia positiva durante la fase de MIST y un intenso decremento al comienzo de la sesión de relajación (en torno al minuto 7, atendiendo a la gráfica). Adicionalmente, se pueden observar tres mínimos locales durante la fase del MIST, en los minutos 3, 5 y 6, así como tres máximos locales durante la relajación, en los minutos 8, 9 y 11. Estas fluctuaciones en el gamma relativo pueden tener su fundamento en las encuestas realizadas durante el experimento, dado que los tiempos de las encuestas (Figura 5.1) coinciden con estos picos. Este efecto podría indicar que las encuestas realizadas, aun minimizando el impacto en la sesión, podrían tener un efecto ligeramente calmante durante el MIST, y un efecto contrario en la etapa de relajación. De nuevo cabe señalar que tanto estos picos como el comienzo de la caída del gamma relativo (como consecuencia de la fase de relajación) están ligeramente desplazados de los instantes donde teóricamente se produjeron. Esto es debido al uso de un filtro de media móvil en el procesamiento. De hecho, este desplazamiento es de alrededor de 15 segundos, dado que se configuró el filtro para utilizar 7 muestras a cada lado de la muestra central, siendo cada muestra el equivalente a un intervalo temporal de 2 segundos.

Con respecto al efecto de las diferentes experiencias implementadas en este estudio (Figura 5.13 y Figura 5.14), se pueden apreciar efectos como la caída del gamma relativo al comienzo de la fase de relajación, así como su subida durante el MIST. Además, mediante inspección visual de la Figura 5.14, se puede comprobar que el efecto en el nivel de estrés de todas las experiencias es muy similar, hecho que refuerza los datos de la Tabla 5.4. Los tests realizados sobre estos datos no encontraron diferencias significativas en las encuestas realizadas durante la fase de relajación, para ninguno de los cuatro escenarios, lo cual refleja que la elección de una u otra experiencia no afecta en el efecto de relajación. Cabe señalar que algunas curvas de la Figura 5.13 presentan más fluctuaciones que otras, lo que puede asociarse al hecho de que la proporción de participantes que eligieron cada experiencia no es la misma.

Si se observa la Figura 5.15, es posible comprobar cómo los datos arrojados por las encuestas asociadas al estrés reflejan una tendencia similar a la curva del gamma relativo obtenido. En adición, tal y como reflejan los datos de la Tabla 5.5, se encontraron diferencias significativas entre las parejas de respuestas T1-T2, T2-T3, T4-5 y T5-T6. Esto valida la premisa de que el estrés fue en aumento durante la prueba del MIST, y experimentó un notorio decremento en la fase de relajación. Esta tendencia, así como su similitud con la curva del gamma relativo se puede apreciar en la Figura 5.16. Esta similitud se ve reflejada en el valor obtenido tras el cómputo del coeficiente de correlación de Pearson entre las dos curvas, siendo este de 0.8417. Todo ello secunda el uso del gamma relativo como un biomarcador fiable y preciso del nivel de estrés. Finalmente, respecto a la experiencia de usuario, reflejada en la Figura 5.17, la solución propuesta en este estudio fue considerada por los participantes como una experiencia cómoda y de un alto grado de inmersión.

Desde un punto de vista más cercano a la literatura, los resultados obtenidos no difieren de aquellos que evaluaban el potencial de una herramienta basada en Realidad Virtual para la reducción del estrés. Un par de ejemplos se encuentran en [161], [162], donde los autores demostraron el potencial efecto de relajación de la vegetación en un entorno urbano, así como el efecto de ver videos de un bosque virtual en el nivel de estrés, respectivamente. Al igual que en la metodología planteada en este estudio, los autores de estos estudios diseñaron un protocolo para estresar a los participantes, haciendo uso de operaciones aritméticas. De igual forma, evaluaron el nivel de estrés en base a la conductancia de la piel (SCL) y la frecuencia cardíaca (HRV). A diferencia de las señales

EEG usadas en este estudio, ambos biomarcadores presentan una resolución temporal baja. Esta mayor resolución temporal puede tener un impacto directo en futuras aplicaciones de tiempo real o de monitorización. En [161], además, se colocaron electrodos en los dedos de los participantes, para medir la actividad eléctrica de la piel, así como un transmisor colocado en la muñeca. Esta solución, aunque efectiva, puede producir un mayor número de artefactos debidos a movimiento involuntarios, a diferencia del sistema propuesto en este estudio, que hacía uso únicamente de cuatro electrodos. De forma similar a este estudio, los autores evaluaron el estado psicológico de los participantes en base a cuestionarios validados como el PANAS (*Positive And Negative Affect Schedule*) [163]. Aunque es una medida validada del estado psicológico, consta de 20 preguntas, lo que puede interferir demasiado en el proceso de relajación, a diferencia de la evaluación del estrés propuesta en este estudio.

Continuando este análisis de estudios relacionados, es importante destacar el hecho de que, en muchos de ellos, se obvian características que resultan muy relevantes para el estudio del estrés mediante Realidad Virtual. Estas características incluyen desde medidas fisiológicas fiables, hasta protocolos estandarizados para suscitar estrés en los participantes, pasando por el uso de medidas poco robustas para determinar el estado psicológico de los participantes. Varios ejemplos los encontramos en [164]–[167], donde se desarrolló un entorno virtual combinando Realidad Virtual, sonidos y olores, o técnicas de respiración para fomentar la relajación; sin embargo, en ninguno de los casos se reporta el uso de una metodología diseñada para producir estrés de forma homogénea en todos los participantes. En el estudio realizado se implementó el MIST, constituyendo una metodología validada para generar estrés y permite establecer diferencias en los niveles de estrés con la solución propuesta para ello, en este caso, un entorno de RV. De igual forma, en [168], se usó un visor HMD para fomentar la relajación a través de un video de 360 grados de una playa local. Al mismo tiempo, se registró la actividad eléctrica de la piel. Este marcador, de acuerdo con los resultados reportados en el estudio, no aporta información relevante acerca del nivel de estrés, a diferencia del gamma relativo, en conjunción con las encuestas de SPSL. En el estudio citado, se usó una pequeña bañera para sumergir los pies y aumentar el grado de inmersión de la propuesta. No obstante, esto puede perjudicar la portabilidad del sistema, lo que puede ir en detrimento de la solución si lo comparamos con la solución propuesta en el estudio realizado, que requiere únicamente de un visor HMD. Para concluir, en [169] se sigue una metodología similar a la propuesta, con una fase de estrés que precede a una etapa de relajación. No obstante, no se aporta ningún dato sobre parámetros fisiológicos o biomarcadores, tal y como se realiza en el estudio realizado, lo que lleva a los autores a concluir citando la necesidad de incluir EEG para evaluar su propuesta.

Finalmente, debido a que las condiciones del experimento no eran la misma, no se puede realizar una comparación directa con los resultados obtenidos en el estudio previo [138]. Aun así, es posible realizar una comparación cualitativa de los resultados arrojados por ambos estudios. En lo referente a las curvas del gamma relativo, así como los resultados de las encuestas, es posible constatar que ambas soluciones implementadas son útiles en la labor de reducción del estrés. Además, la tendencia de las curvas y de las encuestas sugieren que ambas soluciones tienen un rendimiento similar. Este hecho refuerza la idea de que las terapias convencionales basadas en salas de cromoterapia pueden ser sustituidas, bien por la réplica digital del primer estudio, o bien por esta nueva solución. De hecho, la implementación de un sistema que permita la selección de la experiencia deseada puede fomentar su uso, pues la posibilidad de estar en distintos entornos puede resultar más atractiva que una habitación cerrada donde se producen

cambios en el color de la luz. Al igual que en el primer estudio, los resultados obtenidos con los datos de 23 participantes fueron más que suficientes para fundamentar las premisas realizadas, si bien un mayor número de participantes podría reducir los intervalos de confianza. De igual forma, los resultados sugieren que la duración de este tipo de terapias podría reducirse a más de la mitad, dado que la caída de los niveles de estrés se produce en los primeros dos minutos aproximadamente, de acuerdo con la Figura 5.12. Estos resultados, así como las conclusiones derivadas de su análisis podrían tener un gran impacto en los entornos laborales o escolares, donde podrían ser implementados como descansos cortos destinados a reducir el estrés, pudiendo tener efecto en los niveles de productividad y concentración.

Desarrollo experimental II

La segunda parte del desarrollo experimental se compone de todo el trabajo realizado con el fin de satisfacer el tercer y último objetivo planteado. Por tanto, en los sucesivos apartados se detallará todo el diseño y desarrollo del sistema propuesto, así como los resultados obtenidos tras la realización de un experimento que ha permitido validar el sistema.

6.1. Contexto y objetivos

En primer lugar, conviene recordar el tercer objetivo planteado al principio de esta memoria de tesis, siendo este el fin del trabajo realizado en esta parte: diseñar e implementar un sistema integrado de Realidad Virtual y EEG que permita obtener en tiempo real datos acerca del estado cognitivo del usuario, siendo este estado susceptible de ser usado para alterar elementos dentro del entorno virtual desarrollado.

De acuerdo con esta descripción, se diseñó un entorno de Realidad Virtual, así como un sistema de adquisición y procesamiento de señal EEG, ambos conectados entre sí. Con esta arquitectura, se llevó a cabo un experimento con un paradigma de imaginación motora que demostrase la capacidad de extraer información del EEG y usarla en tiempo real. Adicionalmente, se implementó un paradigma de atención visual con el que desarrollar un clasificador del nivel de carga cognitiva que pudiera ser implementado fácilmente en el sistema desarrollado. Finalmente, una última sección del experimento alteraba las luces y sonidos del entorno para inducir un estado de relajación en los usuarios, con el fin de demostrar el potencial del entorno para interferir en el estado emocional de este. Este estado de relajación se evaluó mediante el gamma relativo, un biomarcador obtenido mediante el cómputo de la PSD en distintas bandas que indica el nivel de estrés. Con todo esto, se presenta un entorno virtual capaz de utilizar información relevante del EEG de los usuarios en tiempo real, con diversos paradigmas y funcionalidades, incluyendo la capacidad de determinar la imaginación motora del usuario, así como una arquitectura con posibilidad de ampliar el sistema para predecir el nivel de carga cognitiva.

6.2. Arquitectura de la red

En lo referente al subsistema de adquisición y procesamiento EEG, se implementó una arquitectura cliente-servidor como la mostrada en la Figura 6.7, haciendo uso del lenguaje de programación Python y el IDE Spyder. El cliente EEG, de acuerdo con la figura, era el encargado de realizar la conexión con el sistema de adquisición de señales EEG para

recoger las tramas, almacenarlas y enviarlas al servidor, a través de una conexión TCP con este. La comunicación con el dispositivo de adquisición de señales se realizó mediante una conexión Bluetooth entre este y el cliente EEG, de acuerdo con las especificaciones del sistema. El servidor, por su parte, encargado del procesamiento de las tramas recibidas desde el cliente, permitía la extracción de las características más relevantes del EEG. Una vez procesadas las tramas, estas se enviaban mediante una petición HTTP al servidor de Realidad Virtual. Un ejemplo de las distintas comunicaciones entre los sistemas se verá más adelante.



Figura 6. 1. Arquitectura del sistema de adquisición y procesamiento de EEG. Fuente de las imágenes: bitbrain.com

El subsistema de Realidad Virtual, por su parte, también se concibió en base a una arquitectura cliente-servidor. En este caso, tanto el cliente como el servidor se desarrollaron haciendo uso del software Unity, en su versión de 2021. El cliente se implementó para ser ejecutado en un visor de Realidad Virtual compatible con esta herramienta, siendo este visor el modelo Oculus Quest. Este cliente era el encargado de mostrar el entorno al sujeto, así como actualizar los cambios que se produjesen de acuerdo con las directrices del servidor. Este servidor, al contrario que el cliente, se desarrolló con la finalidad de poder ser ejecutado en un sistema convencional, permitiendo su uso en un servidor remoto o a través de servicios en la nube. Esta arquitectura queda reflejada en la Figura 6.8.



Figura 6. 2. Arquitectura del entorno de Realidad Virtual desarrollado. Fuente de las imágenes: oculus.com/unity.com

En lo que respecta a las funcionalidades del servidor de Realidad Virtual, además de controlar todas las variables del entorno, especialmente durante los paradigmas

diseñados, recibe los valores de las características procedentes del servidor EEG, implementando un servicio HTTP. Con estas características, el servidor puede evaluar las pruebas de imaginación motora y otorgar como *feedback* el acierto o fallo en la prueba, a través de un sonido indicando el acierto y actualizando un contador dentro del entorno virtual. Adicionalmente, se implementó a nivel software la posibilidad de cambiar el tipo de *feedback* producido en el entorno virtual, por medio un documento de texto configurable que el servidor es capaz de interpretar y que vincular las distintas características del EEG y los distintos tipos de *feedback* asociados al entorno desarrollado. Sin embargo, para garantizar que todos los participantes realizaran las pruebas en las mismas condiciones, el *feedback* usado durante las pruebas quedó previamente definido, debido a que distintas condiciones podrían interferir con los resultados y datos recogidos. Un ejemplo del archivo de configuración, así como las posibles configuraciones de la sala se adjuntan en el Anexo II.

La elección de los protocolos de comunicaciones TCP y HTTP se realizó atendiendo a varios criterios. En primer lugar, la necesidad de controlar el estado de la conexión o interrumpir los procesos si esta se perdía demandaba el uso de un protocolo que estableciese una conexión y la mantuviese. Adicionalmente, se precisaba de un flujo de datos que garantizase la correcta recepción de toda la información EEG. Es por ello por lo que se consideró el protocolo TCP antes que otro como UDP. Algo similar se consideró para la comunicación entre los servidores EEG y RV. Si bien HTTP puede usarse sobre cualquier capa de transporte, por lo general se implementa sobre TCP. De esta forma, la comunicación entre los servidores era fiable, pero no existía la necesidad de mantener la sesión activa, ya que para cada petición HTTP se establece una nueva conexión. La arquitectura completa se presenta en la Figura 6.9.

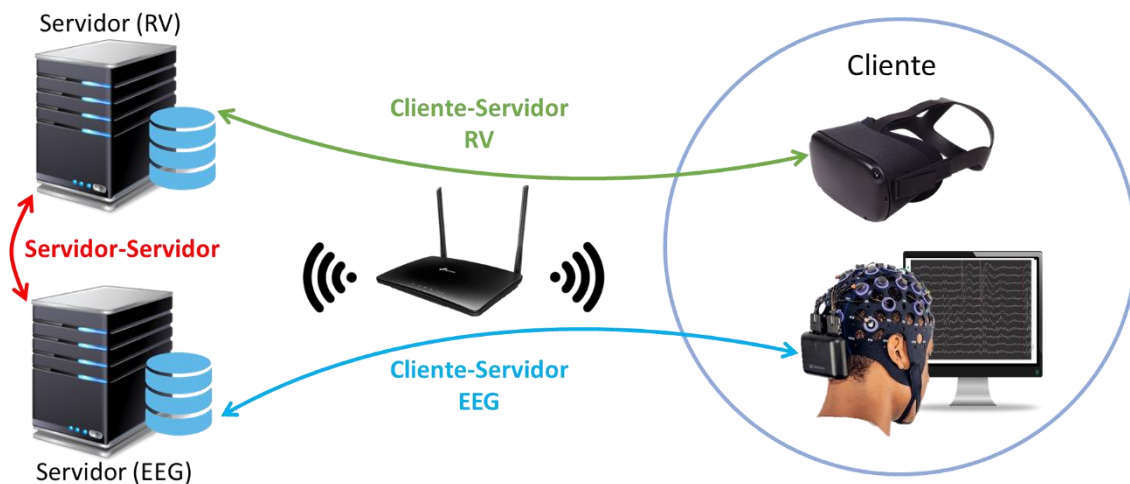


Figura 6. 3. Arquitectura completa del entorno integrado de Realidad Virtual y EEG. Fuentes de las imágenes: bitbrain.com/oculus.com

En adición a esto, la Figura 6.4 ilustra los distintos estados por los que van pasando todos los componentes del sistema completo a lo largo de la ejecución, incluyendo los pasos de mensajes entre estos. Esta figura recoge las distintas etapas que atraviesa cada componente del sistema, desde la inicialización de los distintos servidores, hasta la finalización de las conexiones que se realizan entre ellos.

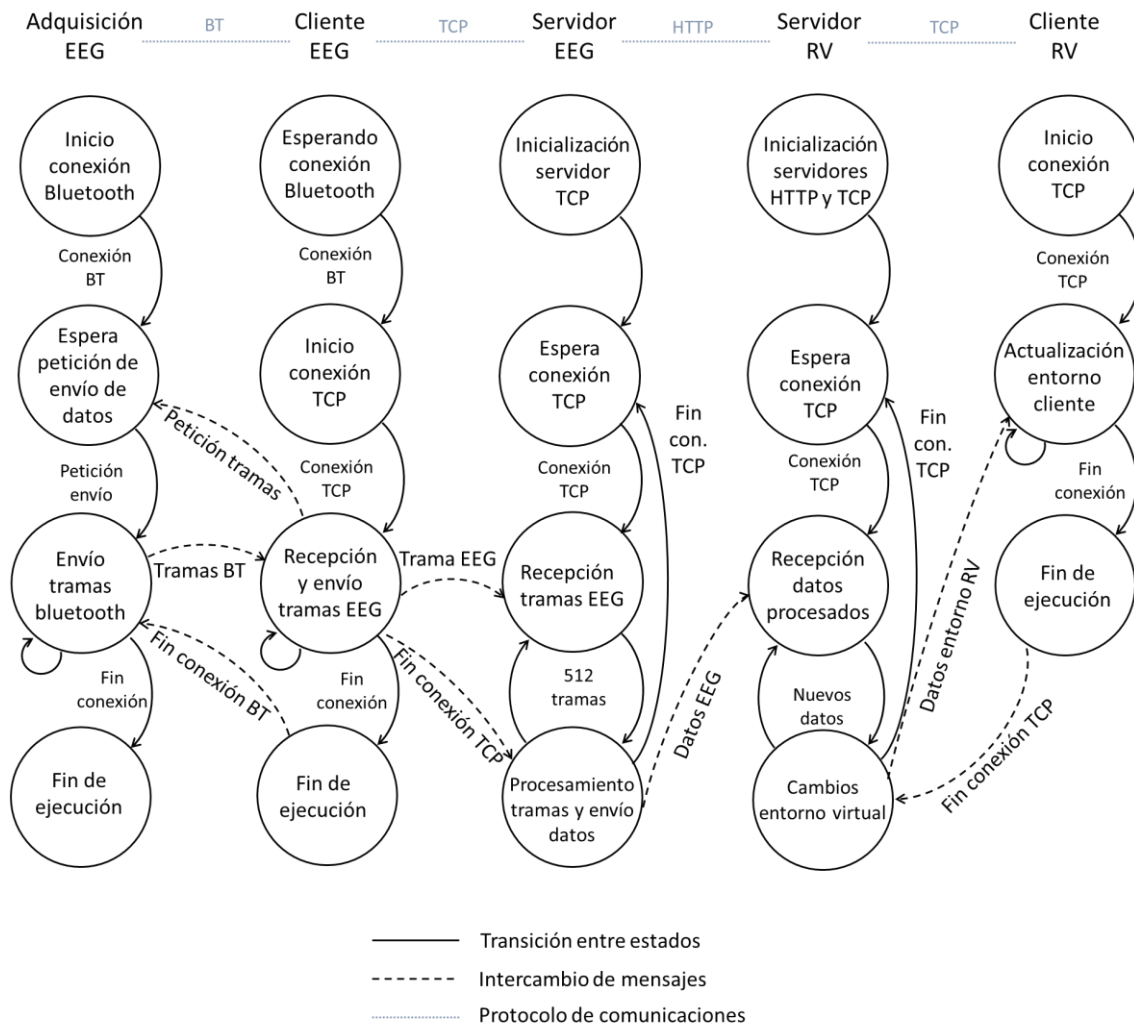


Figura 6. 4. Diagrama de estados de los distintos componentes del sistema completo durante el ciclo de ejecución, incluyendo los mensajes enviados entre cada uno de ellos. Las líneas sólidas hacen referencia a las transiciones entre los estados, mientras que las líneas discontinuas indican los pasos de los mensajes.

También, en la Figura 6.5, se adjunta un diagrama del paso de mensajes realizado entre los distintos componentes del sistema completo. Finalmente, algunos ejemplos de mensajes enviados durante las pruebas realizadas se adjuntan en las Figuras 6.6 y 6.7. El ciclo de mensajes, como ilustra la figura, comienza con la recepción de las tramas EEG del sistema de adquisición. Estas tramas se transfieren al servidor EEG mediante la conexión TCP realizada entre servidor y cliente. Tras cada recepción de 512 muestras, equivalentes a 2 segundos de señal (lo que corresponde a la duración de cada *epoch*), se realizaba el procesamiento necesario, enviando los resultados al servidor de RV a través de una nueva conexión HTTP. Finalmente, los cambios en el entorno virtual, derivados de esta nueva información, eran enviados al cliente RV mediante la conexión TCP dedicada.

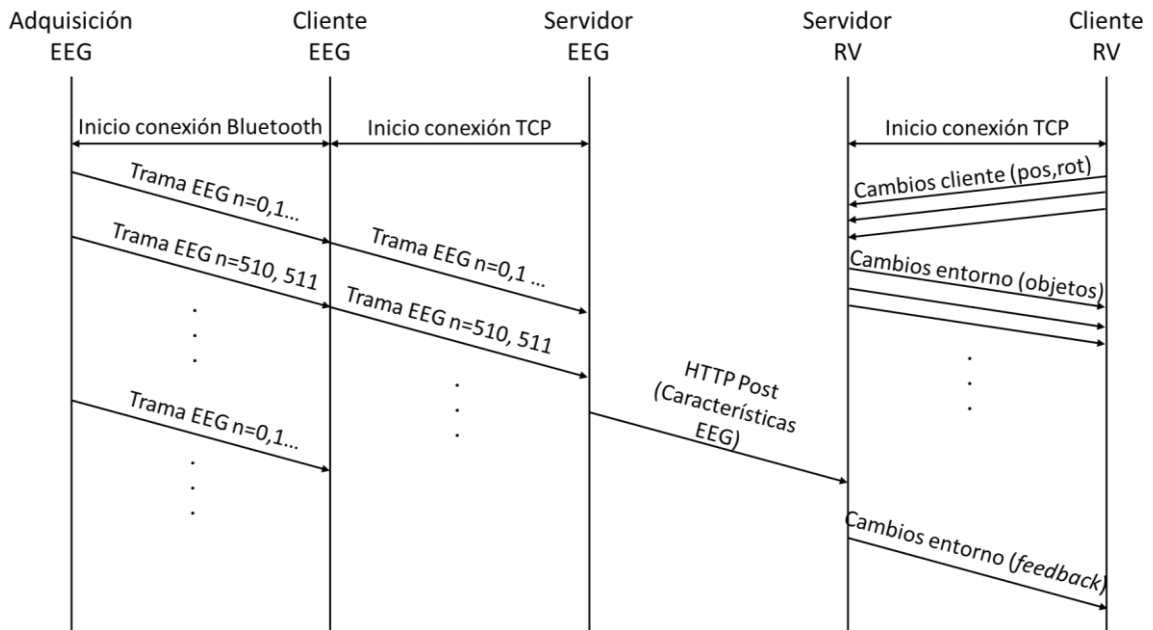


Figura 6. 5. Diagrama del ciclo de paso de mensajes del sistema completo. Este flujo de mensajes se repite de forma cíclica durante toda el tiempo de ejecución.

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|------|------------|---------------|---------------|----------|--------|--|
| 4118 | 266.257138 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 56 | 49179 → 7777 [SYN] Seq=0 Win=65535 Len=0 MSS=65495 WS=256 |
| 4119 | 266.257208 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 56 | 7777 → 49179 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65535 Len=0 MSS=65 |
| 4120 | 266.257246 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 44 | 49179 → 7777 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=327424 Len=0 |
| 4123 | 266.279754 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 50 | 49179 → 7777 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=327424 Len=6 |
| 4124 | 266.279800 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 44 | 7777 → 49179 [ACK] Seq=1 Ack=7 Win=2161152 Len=0 |
| 4125 | 266.279841 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 50 | 49179 → 7777 [PSH, ACK] Seq=7 Ack=1 Win=327424 Len=6 |
| 4126 | 266.279857 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 44 | 7777 → 49179 [ACK] Seq=1 Ack=13 Win=2161152 Len=0 |
| 4127 | 266.297746 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 127... | 7777 → 49179 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=13 Win=2161152 Len=12705 |
| 4128 | 266.297791 | 192.168.137.1 | 192.168.137.1 | TCP | 44 | 49179 → 7777 [ACK] Seq=13 Ack=12710 Win=314624 Len=0 |

Transmission Control Protocol, Src Port: 49179, Dst Port: 7777, Seq: 0, Len: 0
 Source Port: 49179
 Destination Port: 7777

Figura 6. 6. Comunicación TCP entre el servidor RV y el cliente RV. Además del establecimiento de conexión (1), se muestran algunos mensajes enviados durante la conexión (2), con información el entorno.

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|-----|----------------|--------|-------------|----------|--------|-----------------|
| → | 1611 67.946558 | :::1 | :::1 | HTTP | 86 | POST / HTTP/1.1 |
| ← | 1632 68.948621 | :::1 | :::1 | HTTP | 197 | HTTP/1.1 200 OK |

```

[Checksum Status: Unverified]
Urgent Pointer: 0
> [SEQ/ACK analysis]
> [Timestamps]
TCP payload (22 bytes)
TCP segment data (22 bytes)
> [2 Reassembled TCP Segments (188 bytes): #1609(166), #1611(22)]
< Hypertext Transfer Protocol
  > POST / HTTP/1.1\r\n
0000 18 00 00 00 60 0d df b7 00 2a 06 80 00 00 00 00 .....*.....
0010 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 01 00 00 00 00 .....
0020 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 01 ff 97 11 5c ..... \
0030 9d 3c c4 fb fc af f3 b3 50 18 04 fe 85 fa 00 00 ...<.....P.....
0040 31 35 20 31 2e 37 38 35 20 30 20 30 20 33 38 35 15 1.785 0 0 385
0050 20 31 30 30 20 30 100 0
    
```

Figura 6. 7. Petición de envío de los datos procesados en el servidor EEG al servidor RV y su respuesta, haciendo uso del método POST del protocolo HTTP. La parte sombreada indica los datos procedentes del procesamiento EEG enviados al servidor RV.

6.3. Metodología

6.3.1. Participantes

Para el estudio llevado a cabo, se reclutaron un total de 22 participantes (edad media, 21.36 ± 3.76 años). Todos ellos, estudiantes universitarios, participaron voluntariamente en el experimento a través de una convocatoria realizada mediante el correo institucional de la Universidad de Granada. Ninguno de ellos recibió ningún tipo de gratificación por participar. Dadas las características del experimento, solo se consideraron participantes sanos, sin ninguna dolencia o trastorno mental que pudiese afectar en la recogida de datos.

Respecto a la duración del experimento, los datos de cada participante fueron recogidos en una única sesión, con una duración no superior a 45 minutos. Antes del comienzo del experimento, los participantes fueron informados sobre el estudio y firmaron un consentimiento informado que detallaba todo lo relevante del mismo. Este consentimiento, además, sirvió para recoger datos sobre los participantes, como la edad, género, o la existencia de algún problema que pudiera verse agravado durante las pruebas. Finalmente, durante todo el procedimiento, los participantes tenían la posibilidad de finalizar su participación en el mismo, sin necesidad de justificar dicha decisión.

6.3.2. Procedimiento experimental

En esta sección se detallará el proceso experimental seguido en este estudio. Para facilitar su seguimiento, este proceso queda ilustrado en la Figura 6.8, en forma de línea temporal, con todas las etapas que conformaban la sesión. Cabe mencionar que antes de que comenzase el experimento y, tras firmar el consentimiento informado, se informó a cada participante sobre todo el procedimiento que se iba a seguir, mostrando distintos videos para ejemplificar los dos paradigmas a realizar.

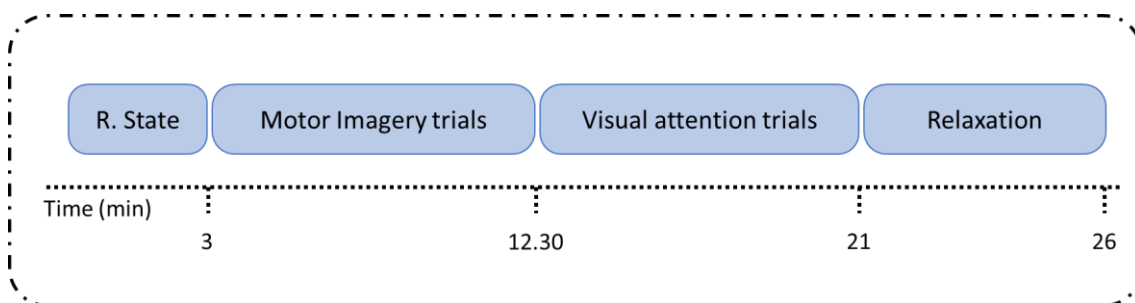


Figura 6. 8. Diagrama temporal de la sesión experimental.

Una vez los participantes entendieron todo el procedimiento, se procedió a la colocación de un gorro de electrodos conectado a un dispositivo comercial de adquisición de señales EEG. Tras verificar la correcta adquisición de la señal, se ejecutó el servidor de Realidad Virtual, así como el servidor implementado para procesar las señales EEG.

De forma sucesiva, el cliente EEG también se ejecutó, comprobando la correcta recepción de los datos en el servidor. Tras esto, se daba comienzo al experimento.

El experimento se iniciaba con una etapa de *Resting State*, siendo este un periodo de 3 minutos en el que los participantes debían permanecer relajados y con los ojos cerrados. Esta etapa tenía como propósito establecer un estado cognitivo común para todos los participantes, para que partiesen de unas condiciones similares. Este periodo está indicado como “*R. State*” en el diagrama de la Figura 6.8. Finalizado este periodo, los participantes fueron desplazados al centro de la sala y se les colocó el visor HMD Oculus Quest. Este visor estaba previamente preparado para iniciar automáticamente la aplicación cliente de Realidad Virtual, dando comienzo a los paradigmas diseñados. Se puede ver un ejemplo de un participante con todo el equipo colocado atendiendo a la Figura 6.9.



Figura 6. 9. Ejemplo y detalle de un participante con el gorro de EEG y el HMD colocados.

Tras el inicio de la aplicación cliente en el HMD, y tras comprobar que existía comunicación entre ambos servidores (EEG y RV), se inició la prueba de imaginación motora en tiempo real (“*Motor Imagery trials*”, de acuerdo con el diagrama de la Figura 6.8). En esta prueba, presentada como una experiencia lúdica y de gamificación, los participantes completaron 5 rondas en las que debían imaginar movimientos con la mano izquierda o la derecha [170], de acuerdo con las indicaciones que recibían dentro del entorno virtual (Figura 6.10). Cada ronda constaba de 10 intentos, dejando un descanso de unos 20 segundos entre cada ronda. En el caso de aquellos participantes que reportaron alguna sensación ligera de fatiga, este tiempo de descanso se alargó. Tras cada ronda, los participantes indicaron el número de intentos exitosos al responsable de sala.

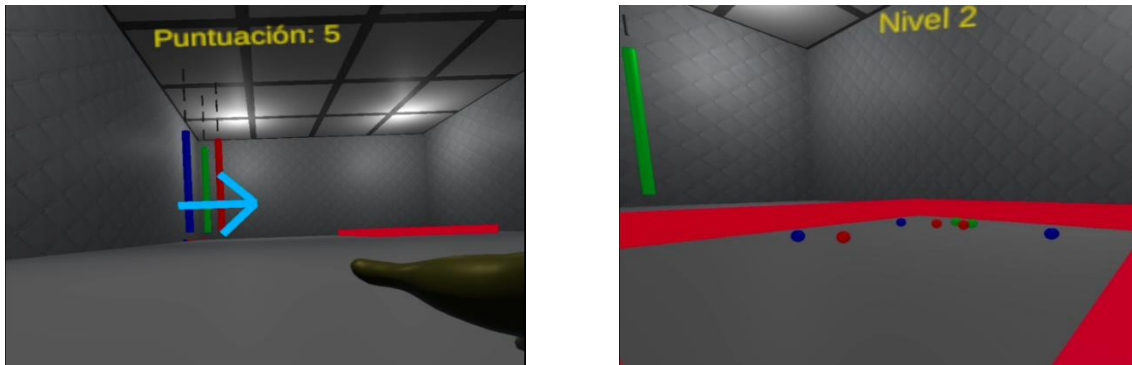


Figura 6. 10. A la izquierda, vista del participante durante la prueba de imaginación motora. La flecha indica la dirección de la imaginación motora (mano derecha en este caso). A la derecha, la vista del participante durante la prueba de atención visual, durante uno de los trials del nivel 2.

Antes de comenzar el siguiente paradigma, se pidió a los participantes que se desplazasen dentro del entorno virtual, haciendo uso de los controladores asociados al HMD, hasta un punto determinado por el responsable de la sala. Una vez situados, se dio comienzo a la prueba de carga cognitiva mediante atención visual (“*Attention trials*”, en el esquema). Durante esta prueba, aparecían delante del sujeto un total de 9 pelotas de distintos colores (rojo, verde y azul), tal y como se ilustra en la Figura 6.10. Así, los participantes debían indicar correctamente el número de pelotas del color indicado por el responsable de la sala una vez que estas desapareciesen de su vista. Esta prueba se dividió en tres niveles, cada uno preparado para demandar un nivel de carga cognitiva superior en el usuario, dejando entre cada uno de los niveles un tiempo de descanso de 30 segundos. De igual forma, cada nivel constaba de 10 intentos sucesivos, todo ello de acuerdo a [171].

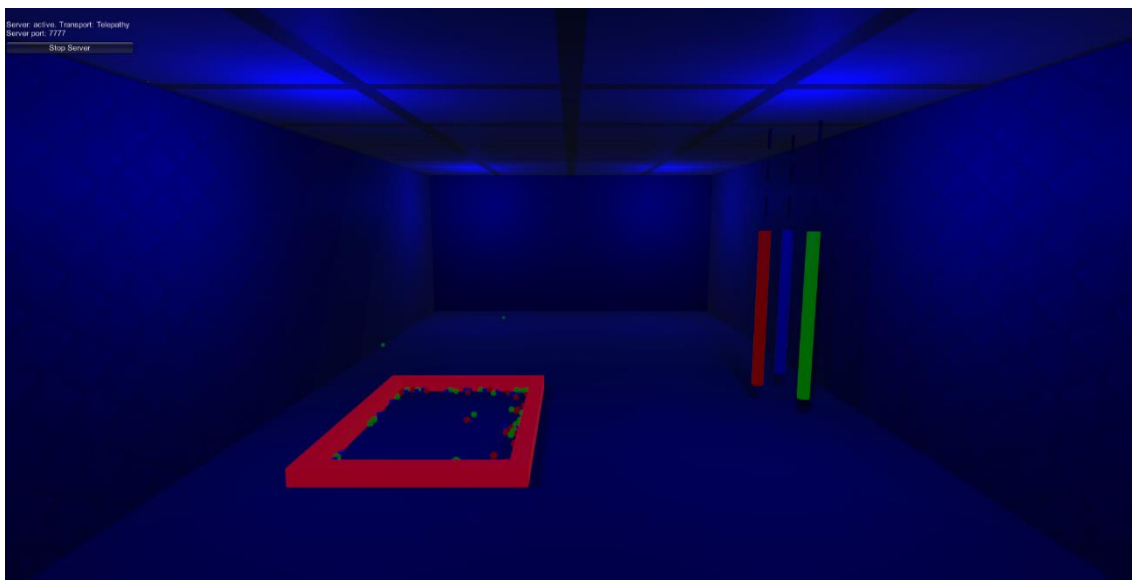


Figura 6. 11. Vista aérea de la ambientación del entorno virtual durante la fase de relajación.

La tercera etapa dentro del entorno de Realidad Virtual consistía en una fase final de relajación. Durante esta fase, la luz de la sala cambiaba a un color azul y sonaba una música relajante de fondo, de acuerdo con estudios previos que avalan esta configuración

[138], [144]. Los participantes debían permanecer con los ojos abiertos e intentando maximizar la relajación durante la experiencia, de 5 minutos de duración. En la Figura 6.11 se muestra la ambientación del entorno durante esta parte. Finalmente, se retiró el visor HMD a los participantes, así como el gorro de electroencefalografía, dando por finalizada la sesión experimental.

6.3.3. Diseño experimental

Respecto a la adquisición de señales asociadas a la actividad cerebral, se utilizaron un total de 16 electrodos repartidos a lo largo de la cabeza. Estos se coloraron en las posiciones Fp1, Fp2, F5, F6, C3, FC3, CP3, C5, C1, C4, FC4, CP4, C6, C2, O1 y O2. Adicionalmente, se colocó una referencia en el lóbulo de la oreja izquierda, así como una tierra común en una posición equidistante a Cz y Fpz. Todas estas posiciones están listadas usando la nomenclatura del sistema internacional 10/20. La elección de estas posiciones viene determinada por distintos factores. En primer lugar, los electrodos prefrontales, así como F5 y F6 se escogieron para determinar el gamma relativo, de acuerdo con estudios previos asociados al estrés y su evaluación mediante EEG [138], [139], [152], [153]. Las posiciones O1 y O2 se utilizaron para evaluar el nivel de carga cognitiva durante la prueba de atención visual. Finalmente, el resto de las posiciones fueron tenidas en cuenta para la detección de los potenciales relacionados con imaginación motora. Para la adquisición de señales EEG se usó el sistema EEG semiseco Versatile de 16 canales (Bitbrain) [155]. Para la realización de las sesiones experimentales, se adaptó la arquitectura presentada en la sección 6.2, alojando los servidores EEG y RV en la misma máquina, dado que solo se contaba con un ordenador. La arquitectura concreta empleada durante las pruebas se adjunta en la Figura 6.12.

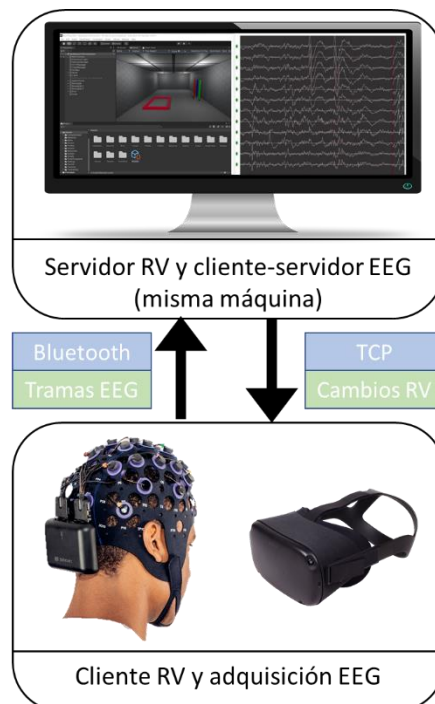


Figura 6. 12. Arquitectura específica utilizada durante la realización de las sesiones experimentales. En este caso, tanto el servidor EEG como el servidor RV se alojaron en la misma máquina.

El entorno virtual donde se llevaron a cabo las pruebas está diseñado de forma similar a la sala de cromoterapia implementada en [138]. Así, está configurado como una sala de paredes y suelo blancas, provisto de varios sistemas utilizados en habitaciones multisensoriales. Estas salas son usadas en colegios de educación especial para estimular los distintos sentidos de los niños, mediante luces, objetos de colores y elementos con los que interactuar. La sala desarrollada para este estudio contaba con luces de colores modificables, un área con pelotas de colores con las que interactuar, y varios elementos colgados del techo con los que es posible la interacción. Una vista aérea de la sala y sus elementos se muestra en la Figura 6.11.

Respecto a las pruebas realizadas, para llevar a cabo la prueba de imaginación motora se diseñó un paradigma basado en un estudio existente [170], pero adaptado al entorno de Realidad Virtual desarrollado. Esta prueba se componía de 5 rondas, cada una compuesta de 10 intentos o *trials* que se realizaban de manera consecutiva. En cada uno de los *trials*, se mostraba frente al usuario una cruceta azul a la que debía mirar fijamente, permaneciendo durante 3 segundos en pantalla. Esta cruceta servía para alertar al usuario del comienzo de la prueba, así como para determinar los potenciales de referencia usados para la detección de la imaginación motora. Adicionalmente, se incluía una alerta sonora para indicar de forma acústica el comienzo del *trial*. Pasados estos 3 segundos, una flecha aparecía para indicar al usuario con qué mano debía imaginar movimientos. Esta flecha desaparecía pasados 1.25 segundos y durante 2 segundos más se realizaba el proceso de imaginación. Pasado este tiempo, en caso de detectar correctamente este intento de imaginación motora, sonaba un sonido positivo y se sumaba un punto a un contador virtual dispuesto frente del usuario. Si se erraba en el intento, sonaba un sonido negativo, sin incrementar ni decrementar la puntuación. Al final de cada ronda, se indicaba la puntuación resultante al responsable de la sala, sobre un total de 10. Para evitar artefactos o falsos positivos, el responsable de la sala debía vigilar que el participante realizase la prueba sin moverse, dando por nulo el *trial* si se producían movimientos. En la Figura 6.13 se muestra un ejemplo de un *trial* exitoso, de acuerdo con [170], en la que al final el acierto se ve reflejado en la puntuación.

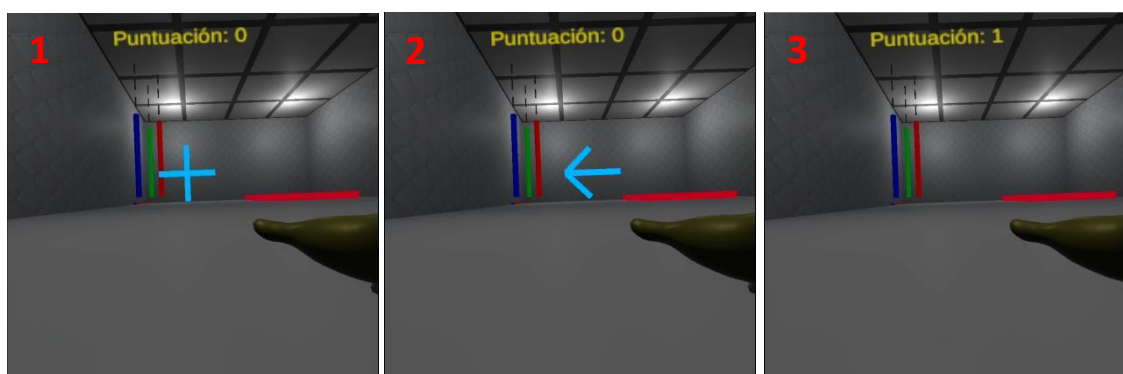


Figura 6. 13. Ejemplo de un *trial* de imaginación motora. Tras la aparición de la cruz para centrar la atención y la flecha indicando la mano con la que realizar la imaginación, se actualiza la puntuación.

La segunda prueba llevada a cabo fue la prueba de carga cognitiva asociada a tareas de atención visual. Para realizar esta prueba, los participantes se situaron en una esquina de la área delimitada en rojo en la Figura 6.11, mirando a la esquina opuesta, teniendo una vista como la mostrada en la Figura 6.10. Durante la prueba, adaptada de [171], aparecían frente al usuario un total de 9 pelotas de diferentes colores (rojo, verde y azul), que

permanecían en pantalla durante 7 segundos. Pasado ese tiempo, desaparecían y se iniciaba una pausa de otros 7 segundos, en la que debían indicar correctamente y de forma verbal el número de pelotas del color determinado por el responsable de la sala. Pasado el tiempo de respuesta, se repetía este proceso, hasta un total de 10 veces por nivel. Entre cada nivel, además, había un tiempo de descanso de 30 segundos, sonando una alerta sonora 5 segundos antes de que finalizase este. En total, se configuraron tres niveles de dificultad realizados de manera consecutiva, siguiendo un orden creciente de dificultad.

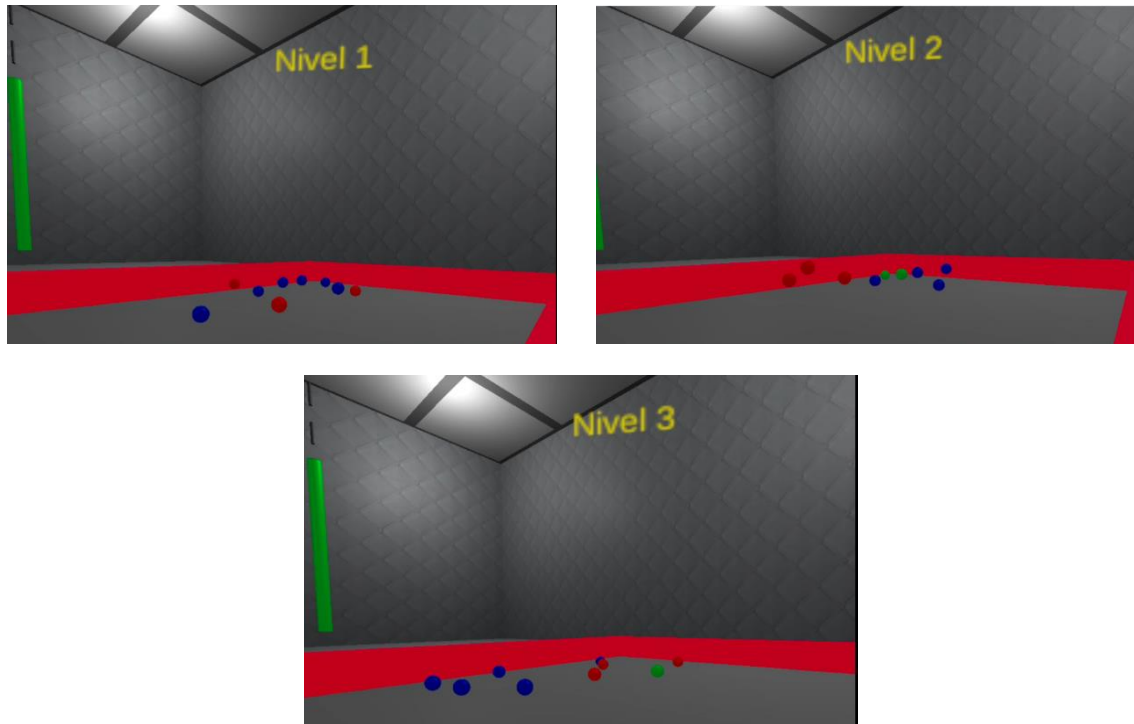


Figura 6. 14. Ejemplo de distribución de las pelotas de colores en cada uno de los niveles de dificultad o nivel de carga.

De acuerdo con [171], cada nivel estaba diseñado para producir un nivel de carga cognitiva superior en cada caso, demostrando estadísticamente la existencia de diferencias significativas en el nivel de carga que producía cada uno de ellos. Este nivel de carga cognitiva se midió en dicho estudio haciendo uso del cuestionario NASA-TLX [172], un cuestionario estandarizado y usado en la literatura para medir el nivel de carga de una tarea. En el paradigma diseñado para este experimento se usaron tres de los cuatro niveles de carga cognitiva que se plantean en el estudio citado. En el primer nivel, se situaban frente al usuario pelotas de color rojo o azul, sin incluir el verde, dispuestas de forma que las pelotas del mismo color apareciesen juntas. En el segundo nivel, el color verde era añadido, si bien las pelotas de un mismo color seguían apareciendo juntas. En el último nivel, además de contar con los tres colores, la posición de las pelotas era completamente aleatoria, sin importar el color de estas. Estos niveles se corresponden con los niveles 1, 2 y 4 de la metodología implementada en [171]. Un ejemplo de la distribución de las pelotas en cada uno de los niveles se muestra en la Figura 6.14.

Finalmente, durante la última fase, dedicada a la relajación, se dejó al participante moverse libremente por el entorno virtual y situarse en un lugar de acuerdo con sus preferencias, haciendo uso de los controladores del HMD. Una vez situado, la luz

ambiental de la sala cambió gradualmente a un color azul y comenzó a sonar de fondo música relajante. Esta experiencia duraba 5 minutos, tras los cuales dejaba de sonar la música y la luz recuperaba un color blanco. Una vista aérea de la sala durante esta etapa queda reflejada en la Figura 6.11.

6.3.4. Procesamiento de señal

Respecto al procesamiento de señal realizado en este estudio, en primer lugar, se extrajo la información de la actividad cerebral de cada una de las etapas del experimento realizado. Así, todo el registro de la actividad se dividió en cuatro subregistros, pertenecientes a la etapa de *Resting State*, a las pruebas de imaginación motora, a las pruebas de carga cognitiva mediante atención visual y a la fase de relajación.

Una vez extraídas las etapas más relevantes del experimento del registro completo, se analizaron de tres formas distintas. En primer lugar, para realizar un análisis del estrés, se concatenaron las señales de las distintas etapas, considerando solo los canales Fp1, Fp2, F5 y F6. Posteriormente se aplicó un filtro IIR Butterworth de orden 4 sin desfases, entre 4 y 48 Hz. Igualmente, se aplicó un filtro *notch* entre 48 y 52 Hz, para eliminar posibles artefactos producidos por la red eléctrica [138], [144], [153]. Tras esto, se dividió la señal en *epochs* de 2 segundos, evitando el solapamiento de estos. Cada *epoch* fue procesado para eliminar posibles tendencias (*detrending*) y normalizar su valor.

De cada *epoch* se estimó la densidad de potencia espectral (PSD) en las bandas asociadas al gamma relativo (Theta, Alfa y Gamma), el biomarcador asociado al estrés, de acuerdo con varios estudios [138], [139], [143], [153], [159]. Este biomarcador se define como el ratio entre la potencia en la banda de Gamma y la potencia conjunta de las bandas Alfa y Theta. Se calcula de acuerdo con la ecuación 6.1 (misma ecuación que usada en estudios previos, obtenida de [138]). Solo se consideró este marcador para evaluar el estrés durante el experimento. Al gamma relativo obtenido se le aplicó un remuestreo o *resampling* para garantizar la misma longitud de los datos, siendo esta de 780 muestras. Este valor constituye el tiempo total de la sesión, 26 minutos, considerando que cada muestra equivale a un intervalo de 2 segundos. Así, estas 780 muestras representan todos los *epochs* de cada sesión, tal y como se muestra en la ecuación 6.2.

$$RG = \left(\frac{Power_{Gamma}}{Power_{Alpha} + Power_{Theta}} \right) \quad (6.1)$$

$$780_{epochs} = \frac{26_{min} \cdot 60_{s/min}}{2_{s/epoch}} \quad (6.2)$$

A la curva global del gamma relativo obtenida se aplicó un filtro de media móvil de 25 muestras. Este filtro evalúa cada muestra como el promedio de las muestras indicadas, siendo la muestra central aquella a evaluar. Así, para cada valor del gamma relativo, se obtiene un nuevo valor calculando, en este caso, la media del valor actual, las doce muestras que la preceden y las doce muestras siguientes. Es preciso recordar que, debido a la naturaleza de este filtro, se pueden introducir desfases de alrededor de 25 segundos,

ya que se realiza un promedio de 25 muestras, 12 a cada lado, y cada muestra equivale a un *epoch* de 2 segundos. Adicionalmente, se determinó mediante inspección visual si era necesario invertir la curva del gamma relativo de algún participante. Esto se realizó acorde a estudios previos que demuestran que en algunos casos el gamma relativo y el estrés pueden tener una relación de proporcionalidad directa [144], inversa [159], [160], o mostrar ambos comportamientos, como ya sucedió en estudios previos [138], [139].

Del mismo modo, para evaluar las pruebas de imaginación motora, se realizó un análisis en tiempo real de las señales. Para este análisis se consideraron solamente los canales C3, FC3, CP3, C5, C1, C4, FC4, CP4, C6 y C2. En primer lugar, las señales recogidas eran evaluadas cada 2 segundos, considerando así un procesamiento por *epochs* como el empleado hasta el momento. Cada *epoch* fue filtrado en las mismas condiciones que las descritas para evaluar el gamma relativo, un filtro IIR Butterworth de orden 4, aplicado entre 4 y 48 Hz. Una vez filtrado el *epoch*, se usó la configuración de electrodos para obtener los potenciales de C3 y C4 de acuerdo con un montaje laplaciano. Así, el valor de las señales en C3 y C4 se obtuvieron como la diferencia entre el potencial medido en el electrodo y el promedio de la señal de los electrodos adyacentes a este. Esta técnica se emplea para obtener un valor más preciso de la señal en una posición concreta, eliminando la información que pueda provenir de regiones cercanas a esta. Así, se obtiene la señal de C3 menos el promedio de las señales de alrededor (FC3, CP3, C5 y C1), así como la señal de C4 (restando el promedio de las señales en FC4, CP4, C6 y C2).

De la señal resultante, y de acuerdo con [170], se estimó la PSD de las bandas de alfa y beta en ambos canales, permitiendo así evaluar la imaginación motora. Una vez que daba comienzo un nuevo trial, se calculaban los valores de la PSD, de ambas bandas, en tres *epochs* consecutivos, siendo el cómputo de la PSD del primer *epoch* el valor usado como referencia y los valores obtenidos en los otros dos los usados para evaluar la imaginación motora. De esta forma, aplicando la ecuación 6.3, se evaluaba si la desincronización producida en cualquiera de estas bandas era suficiente para considerar el *trial* como exitoso, de acuerdo con un umbral fijado. Este umbral se situó en un valor fijo de desincronización de un 30 por ciento con respecto al nivel de referencia, de acuerdo con [173]. Es preciso aclarar en este punto que, según la mano con la que tuviese que imaginar movimientos el participante, la desincronización ha de esperarse en el lóbulo contralateral del cerebro. Así, en el caso de imaginar movimientos con la mano derecha, el valor de la desincronización se ha de calcular con los valores obtenidos del procesamiento de la señal en la posición C3; así como la posición C4 para el caso contrario. Las siglas ERD de la ecuación hacen referencia a *Event Related Desynchronization*. Esta ecuación era aplicada cuatro veces por *trial*, considerando las bandas de Alfa y Beta, y los hemisferios izquierdo (C3) y derecho (C4) del cerebro.

$$ERD (\%) = \left(\frac{Power_{des} - Power_{base}}{Power_{base}} \right) \text{ donde } \begin{cases} Power_{base} = Power_{epoch 1} \\ Power_{des} = \min \left(\begin{matrix} Power_{epoch 2} \\ Power_{epoch 3} \end{matrix} \right) \end{cases} \quad (6.3)$$

Debido a un error en la implementación de las operaciones, este procesamiento se repitió nuevamente una vez concluido al experimento. Así, se evaluó la imaginación motora de todos los *trials* para estimar de nuevo el número de aciertos de los participantes, una vez subsanado el error. Se ha de entender como una estimación debido a que no fue posible almacenar con qué mano había que imaginar movimientos en cada *trial*, producido por un error en el almacenamiento de esta información, así como la

imposibilidad de recuperarlos, ya que esta decisión era tomada de forma arbitraria en el servidor de RV.

Finalmente, respecto a los datos provenientes de las pruebas de carga cognitiva mediante atención visual, se realizó un procesamiento ligeramente distinto a los dos descritos en esta sección. Este procesamiento se realizó para preparar los datos para realizar una clasificación, dejando la explicación de esta para una sección posterior. En primer lugar, común en el resto de los procesamientos, se filtraron las señales de esta etapa del experimento, con la excepción de que esta vez se aplicó el filtro entre 1 y 48 Hz, para no perder información proveniente de la banda de Delta (1-4 Hz). En este caso, se seleccionaron los canales Fp1, Fp2, F5, F6, O1 y O2. Tras dividir la señal en *epochs* de 2 segundos, se eliminó la tendencia (*detrending*) de cada uno de ellos y se normalizó su valor. Así, para cada *epoch* se estimó la densidad de potencia espectral en las bandas Delta, Theta, Alfa, Beta y Gamma, usando los canales Fp1, Fp2, F5 y F6. De igual forma, se estimó la PSD en las bandas de Alfa y Beta para el córtex visual, usando para ello los canales O1 y O2. Finalmente, se estimó el valor del Gamma Relativo usando la ecuación 6.1. Todos estos valores se almacenaron en una matriz, que sería usada para realizar una clasificación.

6.3.5. Algoritmo de clasificación

Con los datos obtenidos en el procesamiento del EEG relativo a la prueba atención visual, se realizó un proceso de clasificación con el objetivo de discernir entre los distintos niveles de carga cognitiva demandados durante la prueba. Para cada participante se realizó una clasificación independiente, si bien siguiendo el mismo proceso. Todo este proceso se realizó con el lenguaje de programación de Python y la librería *sci-kit learn*.

En primer lugar, los datos procedentes del procesamiento EEG se organizaron como un *dataFrame*, donde cada fila corresponde a una muestra y cada columna a una característica. Así, para cada participante se obtuvo un *dataFrame* con 8 características y 205 muestras (de acuerdo con la duración de la prueba). Las características se nombraron de acuerdo con la banda cuya potencia representaban (Alfa, Beta, Gamma, Delta, Theta), o 'RG' en el caso del gamma relativo. Dado que se calculó la potencia en Alfa y Beta con dos conjuntos de electrodos, se añadió un número al nombre, 1 para la potencia calculada con los electrodos prefrontales y frontales, y 2 para la potencia calculada haciendo uso las señales del córtex visual.

A este *dataFrame* se añadió una última columna con la etiqueta o *target* de la clasificación. Esta etiqueta se incorporó como un número (interpretado como una clase y no como un valor) simbolizando el nivel de dificultad en el que se encontraba el participante en esa muestra. Así, las etiquetas '1', '2' y '3' indicaban que esa muestra fue tomada en esos niveles de complejidad de la prueba, usando la etiqueta '0' para identificar las muestras pertenecientes al tiempo de espera entre los niveles. Con esto, el *dataFrame* estaba preparado para ser introducido en el clasificador.

Respecto al clasificador, dada la reducida cantidad de características, así como la imposibilidad de determinar si sería posible separar físicamente los datos como se hace con otros algoritmos, se optó por usar un clasificador Random Forest. La elección de este

clasificador se debe a que es capaz de producir resultados visualmente interpretables, además de ser capaz de adaptarse de forma óptima a problemas donde existen varias características que toman valores continuos. Así, en primer lugar, los datos de cada participante, de forma individual, fueron separados en dos grupos, el de entrenamiento y el de test, siguiendo una proporción de 80-20 por ciento. El primer grupo se usó para realizar el proceso de validación cruzada, dejando el resto de los datos para obtener resultados del clasificador, usando datos que no han intervenido en el proceso de validación. Esta división se consideró para aportar robustez adicional a los resultados, pese a no ser un paso necesario, dada la realización de un proceso de validación cruzada.

Una vez divididos los pasos, se realizó el proceso de validación cruzada, con la configuración de hiperparámetros de la Tabla 6.1. Estos límites de los hiperparámetros se fijaron tras un proceso iterativo de búsqueda de hiperparámetros con la función *GridSearchCV* considerando intervalos cada vez más reducidos. Esta función realiza una validación cruzada para cada combinación posible de los hiperparámetros seleccionados, dando como resultado la combinación de hiperparámetros que arroje mejores resultados, de acuerdo con la métrica establecida. El número de *folds* se estableció de acuerdo con la configuración preestablecida del algoritmo, al igual que la métrica empleada para evaluar los clasificadores. En este caso, la métrica ‘F1-macro’ se obtiene como una medición conjunta de la precisión del clasificador (el número de aciertos en general) y la exhaustividad. Esta última medida determina el porcentaje de veces que se ha aplicado una etiqueta acertada a una muestra. Estas dos métricas son las más comunes para evaluar el rendimiento de una clasificación.

| Número de estimadores | Número máximo de características | Máxima profundidad | Número de <i>folds</i> | Métrica (<i>scoring</i>) |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------|----------------------------|
| 200, 250, 300 | 3, 4, 5 | 4, 5, 6 | 5 | f1-macro |

Tabla 6. 1. Valores de hiperparámetros considerados en el proceso de validación cruzada.

Tras la validación cruzada, el mejor modelo obtenido en la división por *folds* se usó para realizar una predicción de las clases de las muestras pertenecientes al grupo de test, inicialmente separado de este proceso de validación cruzada. Esta predicción se usó para obtener más métricas sobre la clasificación de los datos de cada uno de los participantes, en adición a aquellos datos provenientes del algoritmo que implementaba la validación cruzada.

6.3.6. Análisis estadístico

En primer lugar, de cara a comprender estadísticamente los datos, se obtuvo una única curva que representa el gamma relativo promedio de todos los participantes, calculando para ello la media de los datos de estos. De igual forma, se obtuvo el error estándar de esta media (*Standard Error of the Mean* o SEM).

Los datos de la prueba de imaginación motora también fueron analizados estadísticamente, calculando la media y la desviación estándar de los resultados de cada

una de las rondas realizadas. Adicionalmente, se realizó un histograma para analizar la distribución del número de aciertos totales, independientemente de la ronda. Este análisis se repitió con los resultados de la prueba de imaginación motora estimados tras la subsanación del error detectado.

Respecto a los resultados de la clasificación realizada, se obtuvo para cada participante la media y desviación estándar de las precisiones obtenidas en las clasificaciones durante el proceso de validación cruzada. Además de estos valores, se obtuvo para cada uno de ellos una matriz de confusión con las predicciones obtenidas tras aplicar el mejor clasificador a los datos de test (aquellos que se habían dejado fuera de la validación cruzada). Estos datos se usaron también para obtener una única matriz de confusión con el promedio de los resultados de todos los participantes.

Finalmente, se extrajeron los datos de los clasificadores de cada participante y se realizó un promedio del peso de cada característica empleada en la clasificación. Este peso se entiende como la importancia que cada característica tiene en el proceso de clasificación. Un mayor peso indica una mayor relación entre esa característica y el objetivo del clasificador, por lo que las variables más pesadas son las primeras en tenerse en cuenta para clasificar correctamente.

6.4. Resultados

Antes de mostrar los resultados, es preciso señalar algunos detalles sobre ellos. En primer lugar, debido a problemas durante la adquisición de señal, los datos de dos participantes tuvieron que ser descartados (correspondientes a S01 y S05). En segundo lugar, respecto al procesamiento del gamma relativo, no fue necesario invertir ninguna curva, pues todos los participantes mostraron un comportamiento directamente proporcional.

Así, se muestra en la Figura 6.15 la evolución del gamma relativo medio de todos los participantes. Para obtener esta gráfica se obtuvo la media conjunta de los datos de todos los participantes, así como el error estándar de la media. Adicionalmente se incluyen en la gráfica etiquetas para indicar las distintas etapas que componían el experimento.

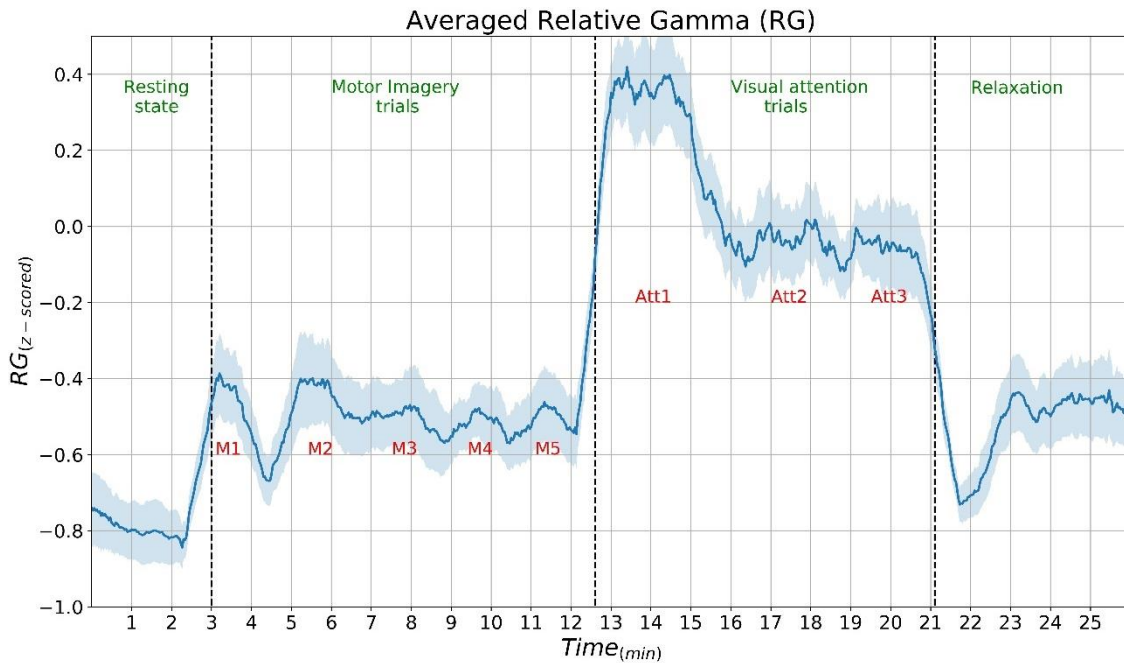


Figura 6. 15. Evolución temporal del gamma relativo, biomarcador del estrés. Corresponde a la media de las curvas de todos los participantes. Las zonas sombreadas delimitan el error estándar de la media.

Como se ha comentado en secciones previas, debido a un error en la implementación de los cálculos realizados durante las pruebas de imaginación motora, algunos valores no estaban correctamente calculados, lo que repercutió en los resultados obtenidos. Cabe destacar que este error no arrojó falsos positivos durante la prueba, sino que en todos los casos fue en detrimento de la misma. Inclusive, la prueba pudo realizarse sin que este error afectase durante la misma, repercutiendo únicamente en el número de aciertos. Una vez identificado y subsanado el error, se realizó un procesamiento offline adicional que reflejase todos los *trials* en los que se produjo una desincronización en cualquiera de los dos hemisferios. Dado que no fue posible almacenar el dato que indicaba la dirección con la que realizar la imaginación, no es posible saber si esta desincronización se produjo acorde a las indicaciones, lo que se consideraría un acierto durante la prueba. Así, la Figura 6.16 y la Figura 6.17 muestran los casos medios en los que se produjo una desincronización de cualesquiera de los hemisferios, así como la distribución que seguirían estos. En la Figura 6.16, la línea naranja indica la mediana de los datos, estando la caja delimitada por los cuartiles 1 y 3 de los datos.

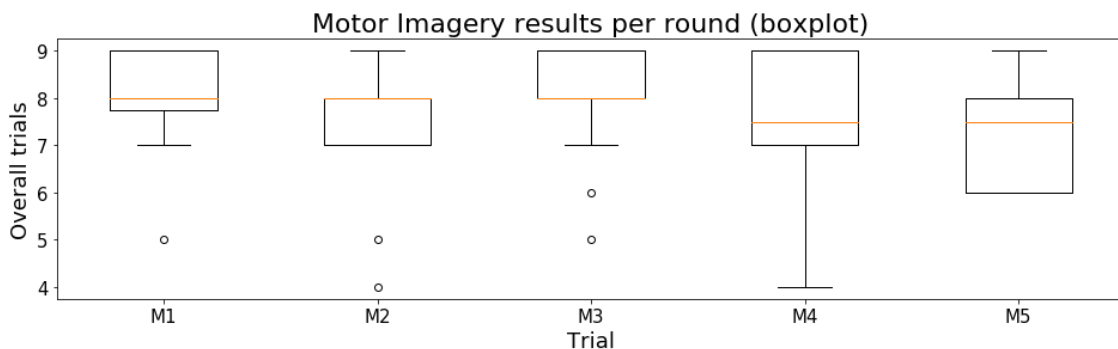


Figura 6. 16. Media por ronda de la estimación de los resultados obtenidos durante la prueba de imaginación motora.

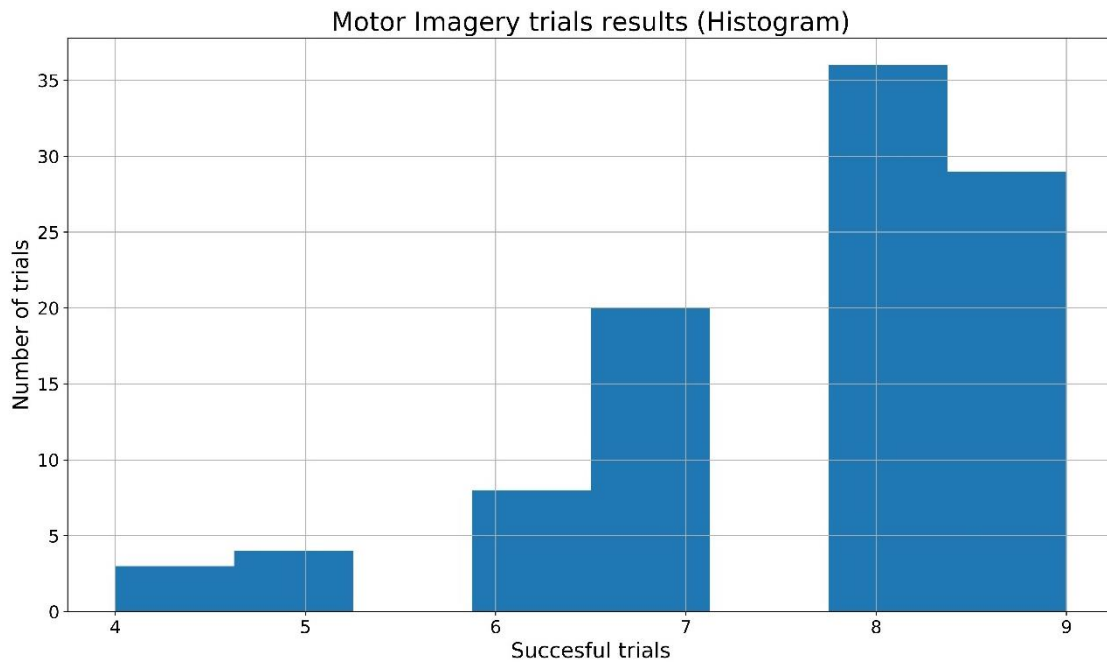


Figura 6. 17. Histograma con la estimación de la distribución de los resultados de todas las rondas y participantes.

Respecto a los resultados obtenidos en la clasificación, la Figura 6.18 representa el peso o la importancia de las diferentes características extraídas. Para obtenerla, se extrajeron los pesos de las características de cada participante, calculando la media de estos. Esta importancia está expresada en tanto por uno, siendo el sumatorio de todas ellas igual a 1. En Random Forest, la decisión se va tomando según los valores que toman las características, evaluando una característica en cada nodo. La importancia de las características indica el número de muestras que se han clasificado una vez evaluada dicha característica en concreto. Así, la importancia de cada característica se calcula como el número de muestras clasificadas en un nodo que dependía de esta, dividido entre el número total de muestras. Así, un mayor peso o importancia en la característica indica una mayor probabilidad de clasificar correctamente la muestra usando esa característica.

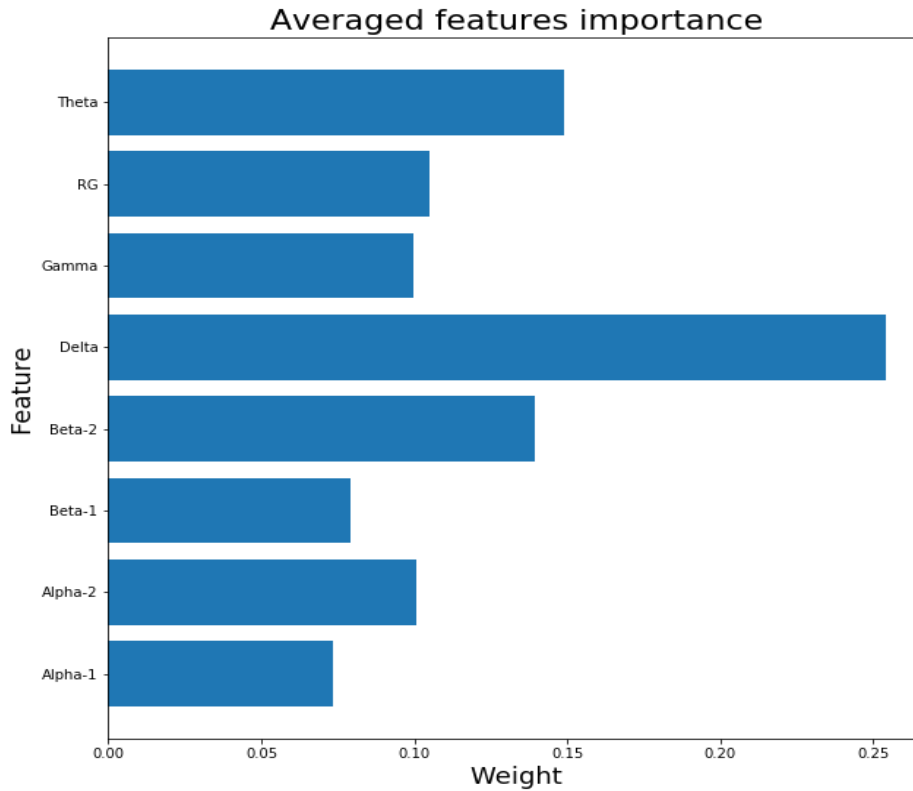


Figura 6. 18. Importancia de todas las características extraídas para la clasificación. El nombre de la característica referencia a la banda de potencia que representa, salvo en el caso de 'RG' que indica que se trata del gamma relativo. Los números 1 y 2, de igual forma, indican si el cómputo de la potencia de esa banda se realizó usando los canales prefrontales y frontales, o los occipitales, respectivamente.

La Tabla 6.2 resume los resultados obtenidos durante la validación cruzada. Para cada participante se muestra la media y desviación estándar de la precisión alcanzada por los clasificadores obtenidos en cada *fold*.

| Participante | Precisión media (<i>accuracy</i>) | Desviación estándar (<i>std.</i>) |
|--------------|--|--|
| S02 | 0.943 | 0.033 |
| S03 | 0.968 | 0.019 |
| S04 | 0.960 | 0.034 |
| S06 | 0.955 | 0.027 |
| S07 | 0.940 | 0.051 |
| S08 | 0.937 | 0.051 |
| S09 | 0.955 | 0.038 |
| S10 | 0.954 | 0.020 |

| | | |
|------------|--------|-------|
| S11 | 0.921 | 0.044 |
| S12 | 0.949 | 0.023 |
| S13 | 0.942 | 0.051 |
| S14 | 0.964 | 0.025 |
| S15 | 0.935 | 0.030 |
| S16 | 0.942 | 0.024 |
| S17 | 0.939 | 0.049 |
| S18 | 0.954 | 0.020 |
| S19 | 0.978 | 0.030 |
| S20 | 0.950 | 0.031 |
| S21 | 0.916 | 0.035 |
| S22 | 0.0951 | 0.042 |

Tabla 6. 2. Resumen de la precisión media alcanzada por los clasificadores obtenidos durante el proceso de validación cruzada. Se muestra la media y desviación estándar.

En las Figuras 6.19, 6.20, 6.21 y 6.22 se muestran las matrices de confusión obtenidas tras aplicar el clasificador al conjunto de datos de test, que previamente había sido apartado de la validación cruzada. Dadas las dimensiones cada matriz, la figura completa se ha separado en varias figuras, cada una de ella abarcando los datos de varios participantes. Finalmente, la Figura 6.23 muestra la media de los resultados de todos los participantes, también en forma de matriz de confusión. Adicionalmente, se extrajo un árbol de decisión de uno de los participantes, adjunto en el Anexo I de este documento.

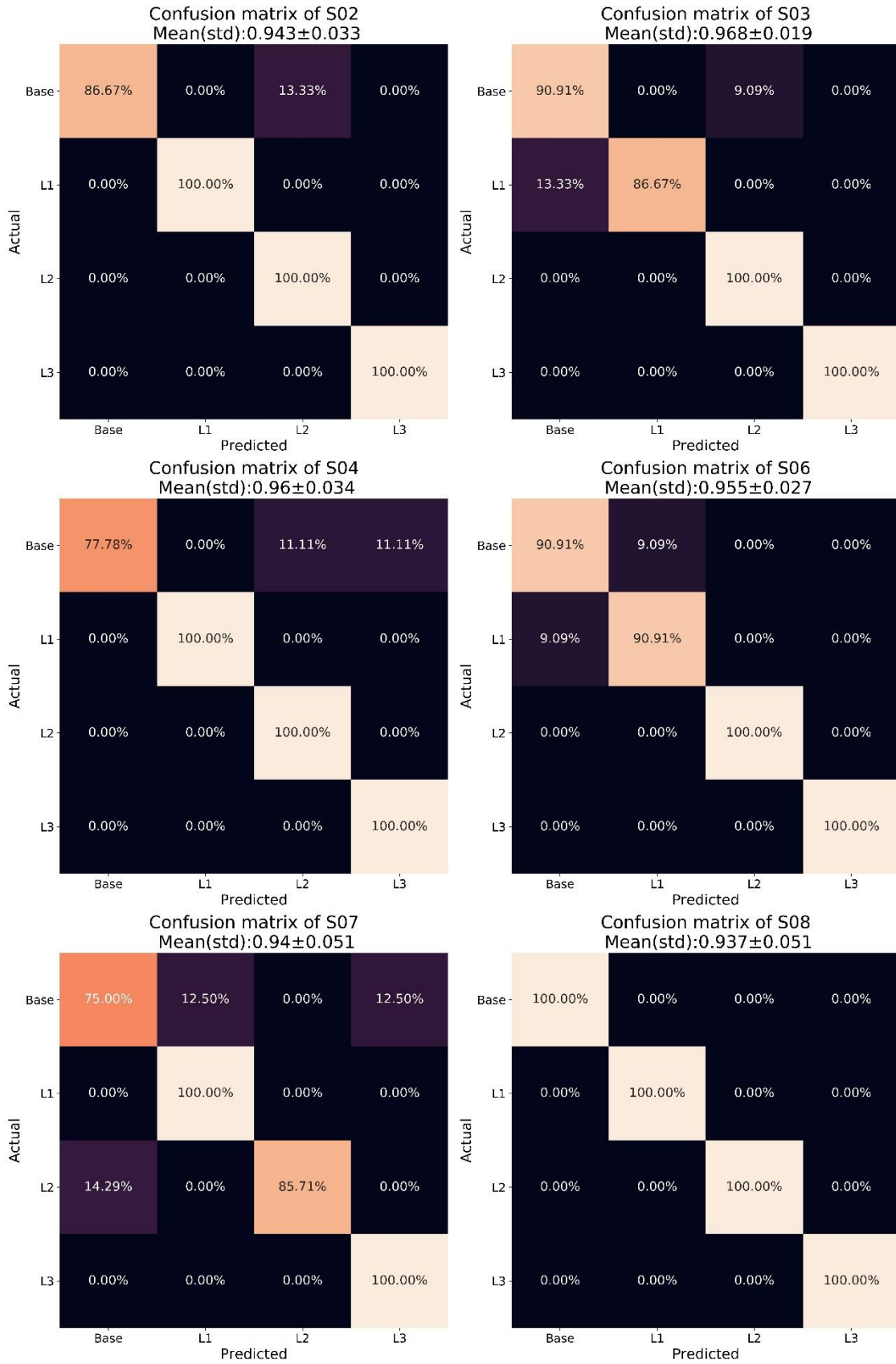


Figura 6. 19. Matrices de confusión de los participantes S02, S03, S04, S06, S07 y S08. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto).

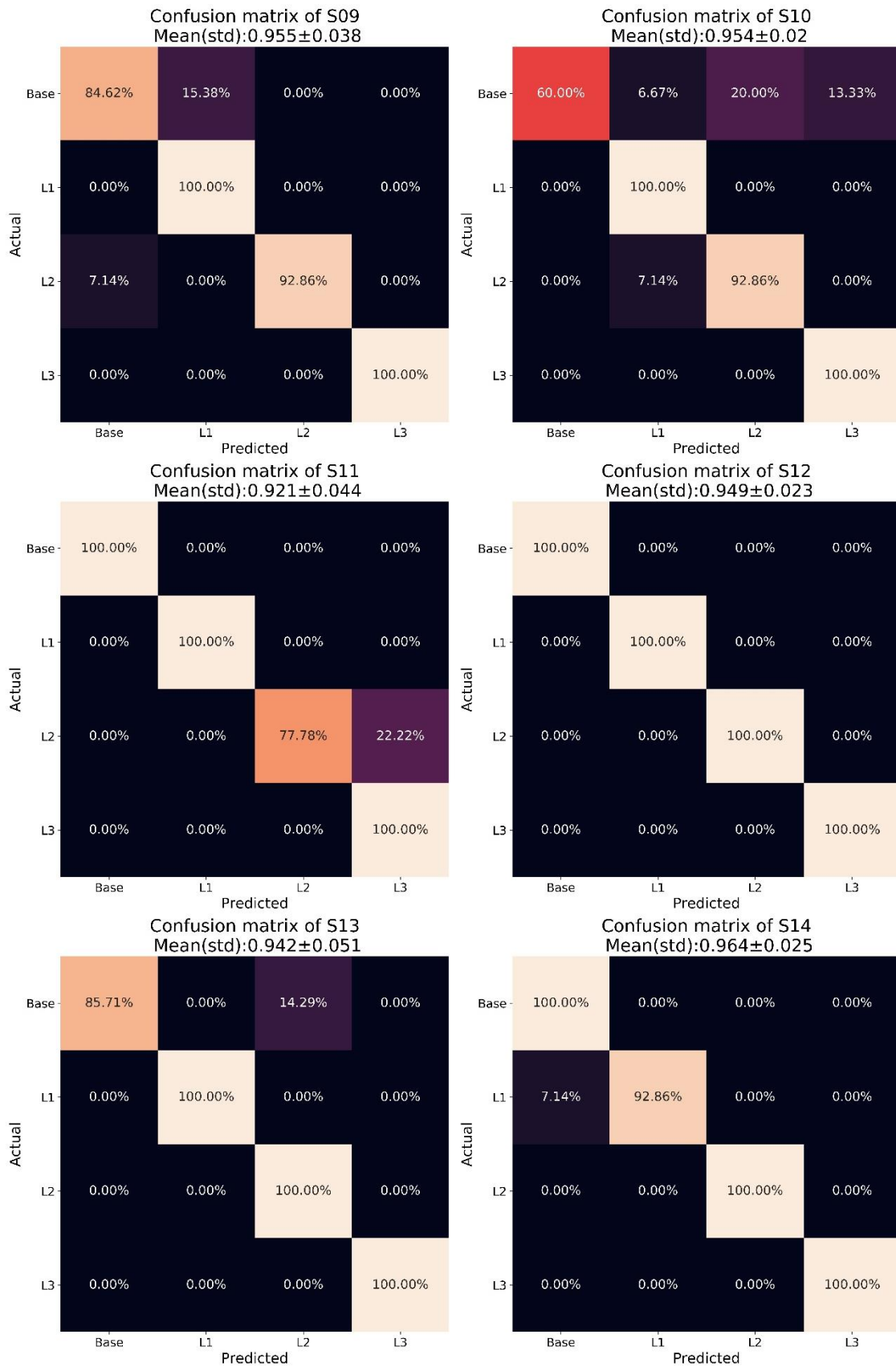


Figura 6. 20. Matrices de confusión de los participantes S09, S10, S11, S12, S13 y S14. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto).

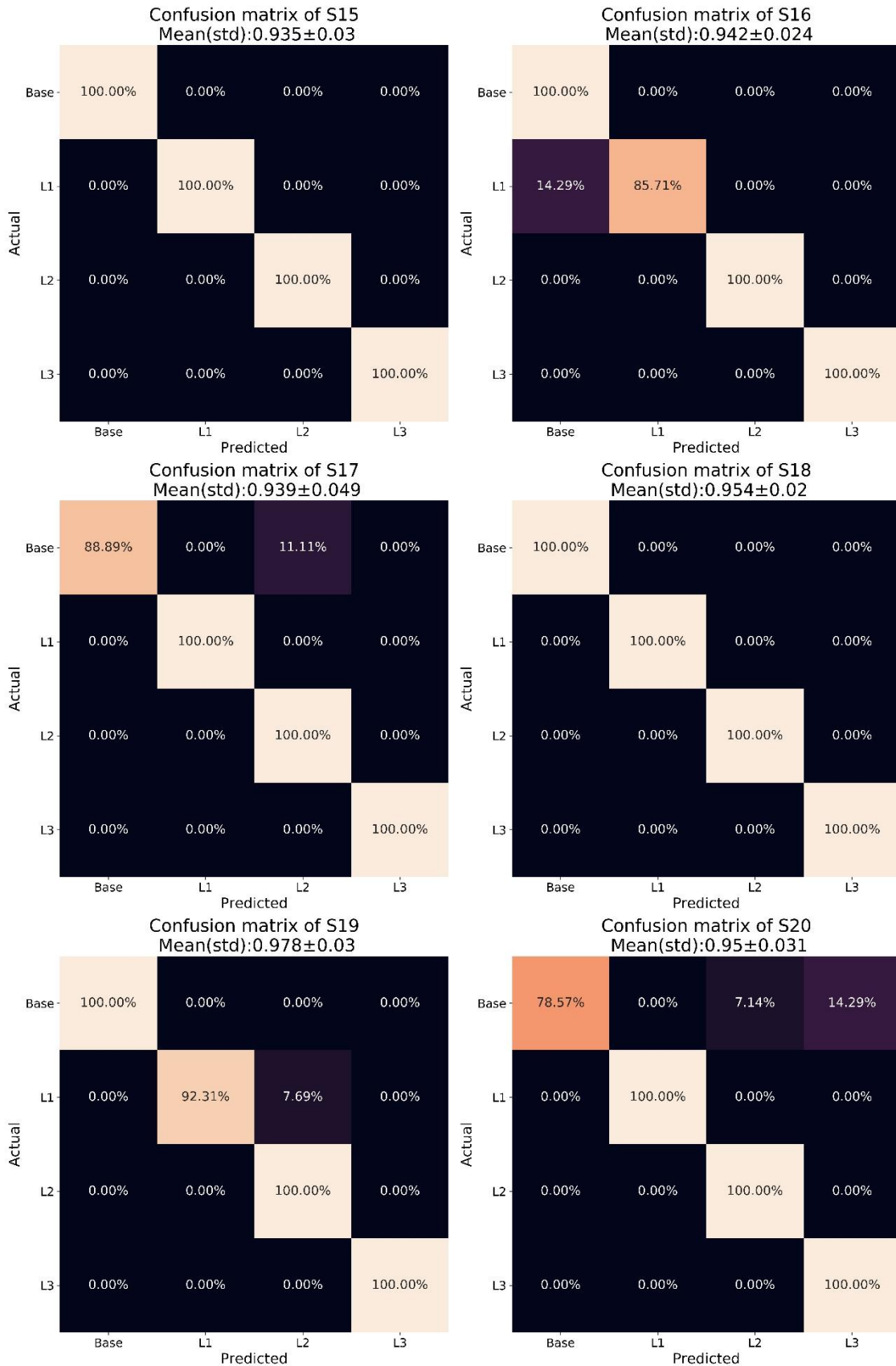


Figura 6. 21. Matrices de confusión de los participantes S15, S16, S17, S18, S19 y S20. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto).

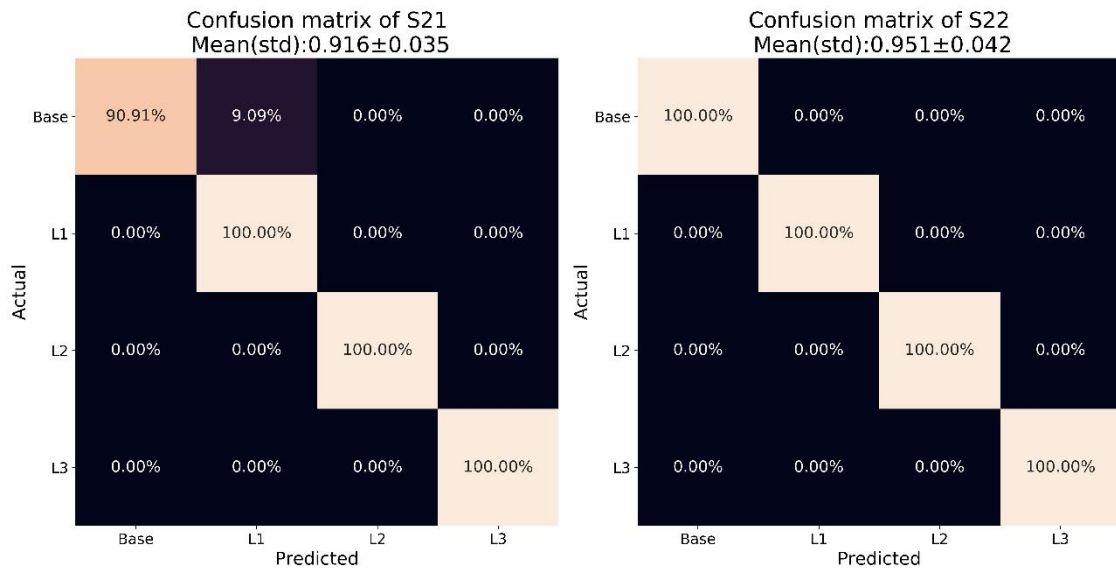


Figura 6. 22. Matrices de confusión de los participantes S21 y S22. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre cada matriz se indica, además, la precisión media y desviación obtenidas durante la validación cruzada. Los colores indican de forma visual el porcentaje de acierto de cada posición de la matriz, siguiendo un gradiente de colores oscuros (valor más bajo) hasta colores claros (valor más alto).

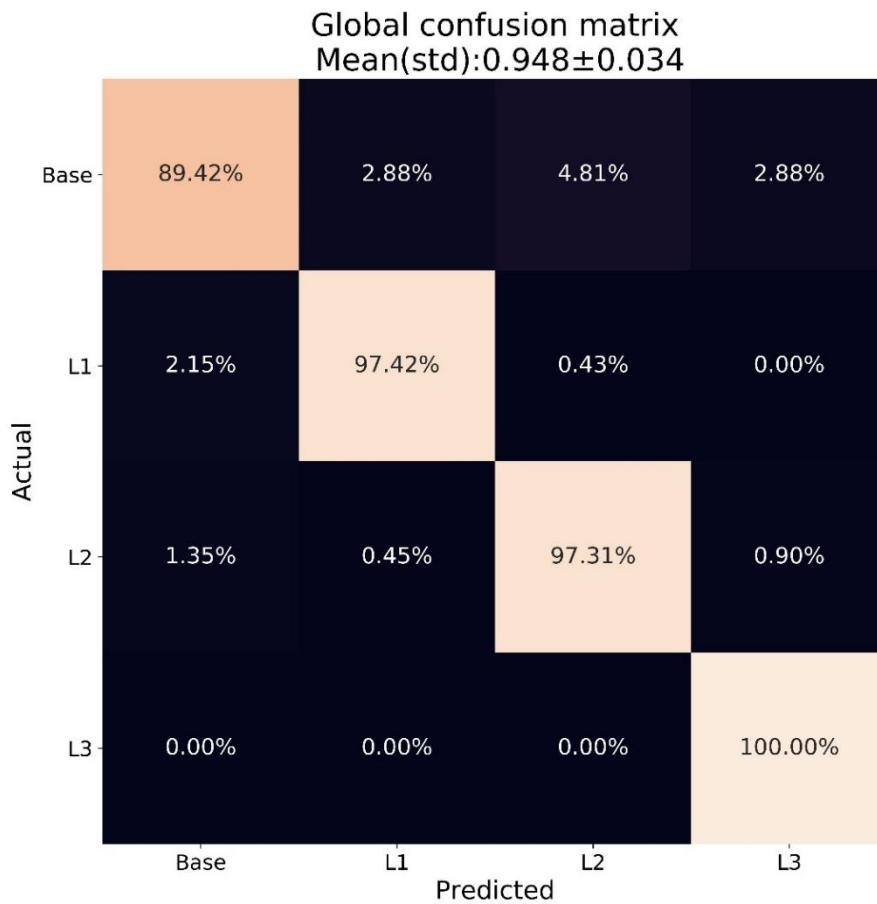


Figura 6. 23. Matriz de confusión global obtenida con el promedio de los datos de todos los participantes. El eje X indica la clase predicha por el clasificador mientras que el eje Y indica la clase real a la que pertenecía la muestra. Sobre la matriz se indica, además, la precisión media y desviación de todos los participantes.

6.5. Discusión

De forma previa al análisis de los resultados, es necesario recordar el objetivo de estudio. La finalidad del experimento llevado a cabo era demostrar la viabilidad de desarrollar un sistema integrado que combinase en tiempo real un entorno de Realidad Virtual y el procesamiento de señales EEG. Para llevar a cabo el estudio y, siguiendo con los trabajos que preceden a este, el diseño de la sala se fundamentó en una sala de integración multisensorial usadas dentro del ámbito de la educación especial. A pesar de concebirlo inicialmente como un entorno de estas características, el sistema desarrollado, así como sus prestaciones son susceptibles de ser aplicadas a otros entornos, ajenos a la educación especial. De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible afirmar que el sistema no solo es capaz de operar con datos de electroencefalografía en tiempo real, sino que además con los datos recogidos es posible realizar predicciones del nivel de carga cognitiva asociado a una actividad de atención visual.

Si atendemos a la Figura 6.15, es posible evaluar el estrés medio de los participantes a lo largo de la sesión experimental. Los datos muestran un incremento de este durante la prueba de atención visual y un nivel medio y un nivel constante durante la prueba de imaginación motora. Este hecho puede deberse a que la prueba de imaginación motora se presentó como un juego, con un *feedback* directo y basado en puntuaciones. Esto podría fomentar que los participantes, lejos de considerarlo una prueba, lo interpretasen como algo lúdico. Del mismo modo, se produce una caída intensa del gamma relativo al comienzo la etapa de relajación, algo esperado, dado que era una experiencia de cromoterapia con música especialmente escogida para inducir un estado de relajación. Estas gráficas concuerdan con aquellas obtenidas en estudios previos [144], en especial con las curvas reportadas en los estudios que preceden a este [138], [139]. Nuevamente se destaca el hecho de que el inicio de la subida del gamma relativo, así como el comienzo de la caída, se encuentran ligeramente desplazados respecto al inicio de las distintas etapas del estudio, debido al uso del filtro de media móvil. Así, es posible encontrar un desfase de unos 25 segundos, dado el uso de 25 muestras para el cómputo de la media (12 a cada lado).

En lo referente a los resultados de la prueba de imaginación motora, estos quedan reflejados en las Figuras 6.16 y 6.17. De nuevo, es preciso hacer mención del error detectado en la implementación del procesamiento de los datos de imaginación motora. Este error, no obstante, solo afectó negativamente a los resultados de la prueba, sin incluir falsos positivos. Así, los resultados obtenidos por los participantes, pese a verse afectados negativamente por este error, han de considerarse como detecciones genuinas de imaginación motora. Aun así, la imposibilidad de almacenar las direcciones indicadas durante la prueba impidió replicar el análisis de los resultados de la imaginación, una vez subsanado el error. A pesar de ello, si fue posible realizar un análisis de los casos donde se produjo una notoria desincronización de alguna de las regiones asociadas a la imaginación motora. Estos resultados son los reflejados en la Figura 6.16, donde se aprecia que en torno al 80% de los casos, se produjo una desincronización acorde a los umbrales establecidos durante la prueba. De acuerdo además con la distribución de los resultados, acorde a la Figura 6.17, es posible apreciar que en la mayoría de los participantes se produjo esta desincronización en más del 70% de los *trials* efectuados. De acuerdo con todo lo expuesto, y a pesar del error acaecido durante las pruebas, estos resultados reflejan la capacidad del sistema para operar en tiempo real, detectando la

imaginación motora en un entorno lúdico y basado en la gamificación que, lejos de inducir estrés en el usuario (de acuerdo con la Gráfica 6.15), lo motiva y fomenta para que realice la prueba. Se propone, no obstante, para futuras implementaciones, la posibilidad de contar con un umbral personalizado para cada participante, o incluso el uso de algoritmos de detección automática de la imaginación motora, todo ello en pro de mejorar los resultados alcanzables.

Atendiendo a la clasificación realizada y, de acuerdo con la Figura 6.18, se puede comprobar como las potencias en Delta, Theta y Beta occipital son las más importante a la hora de clasificar. Estos resultados están en sintonía con otros estudios encontrados en la literatura que versan sobre la carga cognitiva y la atención durante tareas de procesamiento [174], [175]. El uso de las características más importantes puede apreciarse con los datos de la Tabla 6.2, donde se observa que las clasificaciones realizadas tienen un alto grado de precisión. Esto no solo viene reflejado en la media de las precisiones obtenidas tras la validación cruzada, sino también en la desviación, que implica que todos los clasificadores obtenidos en esta tenían un rendimiento similar. Estos resultados pueden discutirse con los reportados por otros estudios de la literatura. Un claro ejemplo lo encontramos en [171], dado que se sigue la misma metodología para clasificar cuatro niveles de carga cognitiva. No obstante, emplean un número muy grande de características, así como un procesamiento que implica el uso de numerosos filtros, para alcanzar una precisión que ronda el 84%. Esta precisión no solo es inferior a la alcanzada con la propuesta presentada, sino que además implica un procesamiento mucho mayor, lo que posiblemente imposibilitaría su aplicación en un proceso de clasificación en tiempo real.

Siguiendo con este análisis, los resultados propuestos son similares a los reportados en [176], donde se alcanzó una precisión media de 93.4% en una clasificación de cuatro niveles. Si bien una comparación directa de los resultados no es posible, dadas las diferencias en los procesos metodológicos, así como en las características que emplea para la clasificación, si es posible destacar como la precisión media alcanzada en este artículo, al igual que en esta propuesta, se alcanza con un procesamiento más simple y, por tanto, más rápido y susceptible de ser implementado en tiempo real. Bajo esta similitud en el procesamiento, si se comparan con los resultados equivalentes obtenidos en este estudio, se aprecia una ligera mejora en el nivel medio de clasificación (94.8% respecto al 93.4% reportado en [176]) contando con un número mayor de participantes (20 frente a 16). Para concluir, respecto a las Figuras 6.19 a 6.23, se puede comprobar que los resultados de las predicciones realizadas sobre el conjunto de datos de test tienen un alto grado de acierto, no solo a nivel global (Figura 6.23) si no también considerando las matrices de confusión individuales. En todos los casos, hay un alto porcentaje de muestras correctamente clasificadas en los cuatro niveles de clasificación, llegando en muchos casos al 100% de aciertos en varias de ellas.

Finalmente, estos resultados ponen de manifiesto el potencial de la herramienta desarrollada, no solo para presentar un escenario lúdico o que exija diversos niveles de carga cognitiva, sino para clasificar y predecir este nivel. Además, el entrenamiento de un modelo con este rendimiento solo precisa de 10 minutos, tras los cuales se pueden realizar predicciones con un alto grado de acierto. Esto, sumado a la demostrada capacidad del entorno para operar en tiempo real realizando un procesamiento similar (como es el caso de las pruebas de imaginación motora), permiten que este clasificador pueda ser directamente incluido en el entorno ya desarrollado. Con todo esto, se considera cumplido el tercer objetivo de este trabajo de tesis, dado que se ha demostrado que el

entorno desarrollado es capaz de operar en tiempo real con el EEG, de reducir el nivel de estrés, de fomentar la atención visual con demandas de la carga cognitiva, y utilizar la actividad cerebral para determinar este nivel de carga con un alto grado de precisión. Esto genera una herramienta con el potencial de asistir en numerosos entornos, no solo en el ámbito de la educación especial. Al ser un entorno de RV, este puede adaptarse para poder ser aplicado en cualquier otro ámbito, presentando distintos estímulos que impliquen un nivel de carga cognitiva y atención visual, aun realizando un mismo procesamiento y clasificación. Así, este sistema podría aplicarse en sesiones de rehabilitación, educación o al entrenamiento de profesionales de distintas áreas, entre otros campos.

Conclusiones

Como consecuencia de todo lo expuesto a lo largo de este trabajo, incluyendo los resultados obtenidos en ambas partes del desarrollo metodológico, resulta lógico comenzar la conclusión subrayando el cumplimiento de todos los objetivos planteados al inicio de esta memoria de tesis doctoral. Estos abarcaban, en primer lugar, el desarrollo de un sistema de Realidad Virtual que replicase una sesión de cromoterapia real. De forma similar, el segundo objetivo versaba sobre la modificación de este sistema para permitir la visualización de videos en 360 grados, con el mismo fin, pero conceptualizado como una herramienta nueva y no basada en una terapia cromática existente. Finalmente, se proponía la integración en tiempo real de un sistema de Realidad Virtual y el procesamiento de señales provenientes de la actividad cerebral por medio del registro EEG, todo ello con la finalidad de ofrecer nuevas terapias e información en un contexto de educación especial.

En lo que respecta al trabajo llevado a cabo, resulta gratificante la consecución del reto que ha supuesto el cumplimiento de los objetivos planteados, demandando conocimientos de numerosas áreas, desde la Realidad Virtual, hasta las técnicas de Machine Learning, pasando por el estudio de la electroencefalografía y su relación con distintas emociones. Este trabajo, por tanto, ha permitido completar varias tareas que tratan de abordar distintos problemas, si bien todos ellos se encuentran estrechamente ligados entre sí, siguiendo una línea de investigación común. Así, cada tarea se ha presentado como un avance respecto a la anterior, permitiendo mejorar cada propuesta desarrollada, incorporando nuevos elementos hasta satisfacer todos los objetivos propuestos.

Tras la presentación y discusión de los resultados de la primera parte del desarrollo experimental, se exponen a continuación las principales aportaciones de esta sección del trabajo:

1. Se ha desarrollado un entorno de Realidad Virtual con el objetivo de replicar una terapia cromática existente, demostrando la viabilidad de su uso para reducir los niveles de estrés de forma muy similar al de la terapia en la que se basa.
2. Se ha diseñado una alternativa a las salas de cromoterapia que hace uso exclusivamente de un visor de Realidad Virtual, lo que reduce de forma considerable el coste asociado a este tipo de terapias al mismo tiempo que aumenta la portabilidad y accesibilidad del sistema.
3. Se ha diseñado y desarrollado un entorno de Realidad Virtual basado en el uso de videos en 360 grados como un método novedoso para la reducción de estrés. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de la herramienta propuesta para el propósito mentado.
4. Se ha propuesto una alternativa viable a las terapias cromáticas convencionales basada en experiencias inmersivas, aportando una herramienta de fácil acceso

y cuyo uso se puede extender a otras situaciones, más allá del uso terapéutico.

De igual forma, las conclusiones y aportaciones derivadas del trabajo realizado en la segunda parte del desarrollo experimental quedan subrayadas a continuación:

1. Se ha desarrollado un entorno de Realidad Virtual basado en un paradigma cliente servidor que permite adaptar sus características de acuerdo con las directrices de este último y en función de los patrones de actividad cerebral procesados en tiempo real.
2. Se ha desarrollado un sistema de registro y procesamiento EEG basado en un esquema cliente servidor que procesa la actividad cerebral en tiempo real y comunica los resultados de este procesamiento al servidor de RV.
3. Se ha diseñado e implementado una arquitectura de comunicaciones completa que permite la comunicación entre los servidores de EEG y RV en base a peticiones HTTP para la modulación del entorno virtual.
4. Se ha llevado a cabo un estudio para evaluar el potencial de este sistema, demostrando que se puede detectar en tiempo real patrones de actividad cerebral asociados a la imaginación motora y otorgar *feedback* dentro del entorno virtual.
5. Se ha diseñado un paradigma basado en carga cognitiva asociada a una tarea de atención visual que permite obtener suficientes datos para realizar una clasificación con técnicas de Machine Learning de cuatro niveles de carga cognitiva.

En definitiva, se considera que todo lo aportado en la tesis doctoral desarrollada es de interés y relevancia para la comunidad científica. Más concretamente, a lo largo de la realización de todo el trabajo presentado y en relación con los resultados y aportaciones, se han generado las siguientes publicaciones:

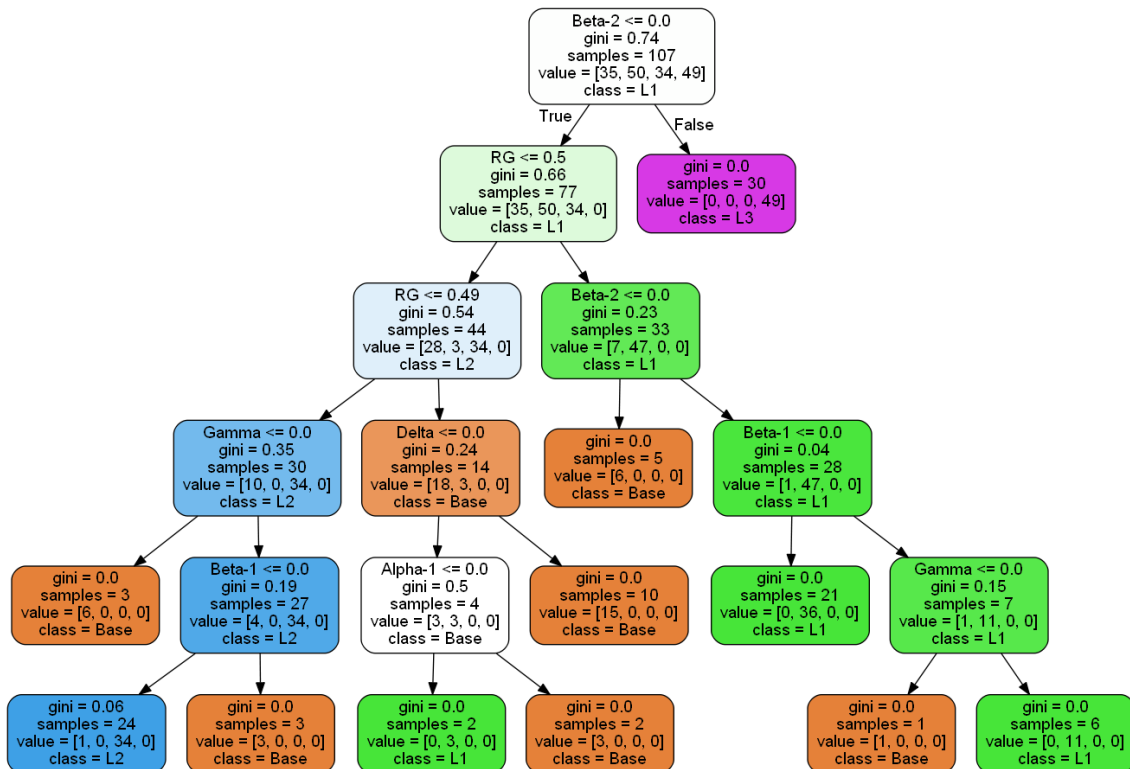
- M. A. Vaquero-Blasco, E. Perez-Valero, M. A. Lopez-Gordo, and C. Morillas, “Virtual Reality as a Portable Alternative to Chromotherapy Rooms for Stress Relief: A Preliminary Study,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, Art. no. 21, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20216211.
- M. A. Vaquero-Blasco, E. Perez-Valero, C. Morillas, and M. A. Lopez-Gordo, “Virtual Reality Customized 360-Degree Experiences for Stress Relief,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21062219.
- E. Perez-Valero, M. A. Lopez-Gordo, and M. A. Vaquero-Blasco, “EEG-based multi-level stress classification with and without smoothing filter,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 69, p. 102881, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.bspc.2021.102881.
- E. Perez-Valero, M. A. Vaquero-Blasco, M. A. Lopez-Gordo, and C. Morillas, “Quantitative Assessment of Stress Through EEG During a Virtual Reality Stress-Relax Session,” *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 15, p. 684423, Jul. 2021, doi: 10.3389/fncom.2021.684423.

- E. Perez-Valero, M. A. Lopez-Gordo, and M. A. Vaquero-Blasco, “An attention-driven videogame based on steady-state motion visual evoked potentials,” *Expert Systems*, vol. n/a, no. n/a, p. e12682, doi: <https://doi.org/10.1111/exsy.12682>.
- E. Perez-Valero, M. Lopez-Gordo, C. Morillas, F. Pelayo, and M. Vaquero-Blasco, “A Review of Automated Techniques for Assisting the Early Detection of Alzheimer’s Disease with a Focus on EEG,” *Journal of Alzheimer’s Disease*, vol. 80, pp. 1–14, Mar. 2021, doi: 10.3233/JAD-201455.

Anexos

ANEXO I: Ejemplo de árbol de decisión de random forest

Este anexo presenta un árbol de decisión usado en el clasificador random forest del sujeto S22. Este árbol es uno de los muchos utilizados para la toma de decisiones e indica en cada uno de los nodos la toma de decisiones que va realizando en función de las variables para decidir a qué nivel de clasificación pertenece la muestra.



Anexo I. 1. Árbol de decisión usado por el clasificador random forest del sujeto S22. Cada color representa una categoría de la clasificación: marrón para el nivel 'Base', verde para el nivel 'L1', azul para el nivel 'L2' y morado para el nivel 'L3'.

ANEXO II: Ejemplo de archivo de configuración del entorno de RV y posibles configuraciones.

A continuación, se muestra un ejemplo de archivo de configuración del entorno de Realidad Virtual, mostrando la nomenclatura que hay que usar para configurarla. En este caso, cada estímulo de la sala se puede configurar para que actúe de acuerdo con los cambios producidos en las características EEG adquiridas. Se pueden añadir tantas líneas como sea preciso, indicando los parámetros en el siguiente orden:

1. Característica EEG.
2. Mecanismo de toma de decisión.
3. Parámetros asociados al mecanismo.
4. Estímulo de la sala a modificar.
5. Parámetros asociados al estímulo.

En el ejemplo de la figura, se muestran cuatro entradas de configuración del entorno. Cada una realiza un cambio sustancial en el entorno, asociado al cambio de una característica EEG.

```

MSIConfig.txt: Bloc de notas      Característica métrica límites Función Valores
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
1 alpha continuous LightInt 0
2 gamma meanStd 0 LightColor 3 0.0 0.5 0.34 0.8 0.2 0.1 0.0 0.0 1.0
3 motorInt manual 0 0 ballsManagement 0 1
4 alpha manual 5 35 PartSys 2 2
  
```

Anexo 2. 1. Ejemplo de archivo de configuración del entorno de RV.

Cada comando, indicado con un número realiza lo siguiente:

1. ‘Alpha’ (indicador preliminar de la carga cognitiva) cambia la intensidad de las luces (el 0 indica que el cambio es inversamente proporcional, a más valor de alfa, menos intensidad de la luz)
2. Si el valor de gamma (indicador preliminar del gamma relativo) excede la media global más 0 veces la desviación estándar, se pasará al siguiente color especificado en el bucle de 3 colores (indicando cada color en función de sus colores primarios RGB).
3. Una detección de la intención motora en el hemisferio izquierdo (el 0 indica la dirección de la intención) activará o desactivará las pelotas, respectivamente.
4. El valor de ‘Alpha’ hará que se desactive o active el sistema de partículas completo (cuando el valor sea inferior a 5% o superior a 35% se activará en

ambos lados)

Cabe destacar que las características aplicadas en este ejemplo eran las densidades de potencia espectral en las diferentes bandas principales. Ha de considerarse como un ejemplo o prueba de concepto de las capacidades de configuración de la sala, pues este ejemplo de configuración se realizó en una etapa temprana del desarrollo con la intención de demostrar su viabilidad.

Con las características indicadas, así como los criterios de medida, se puede desarrollar una tabla que resume las distintas configuraciones disponibles de la sala, pudiendo abarcar un total de 19 configuraciones distintas, o más si un mismo estímulo es controlado por varias características.

| Característica EEG | Medida | Entorno RV |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|
| Alfa (o carga cognitiva) | Valor continuo | Intensidad luces |
| | Umbral manual | Intensidad luces |
| | | Sistema de partículas |
| Gamma (o gamma relativo) | Media +- Desv. Est. | Pelotas |
| | | Color luces |
| | Umbral manual | Sistema de partículas |
| | | Intensidad luces |
| Imaginación motora | Umbral manual | Sistema de partículas |
| | | Pelotas |
| | | Intensidad luces |

Anexo 2. 2. Tabla con las distintas configuraciones disponibles para cada estímulo y característica EEG

Bibliografía

- [1] A. Ortony, G. Clore, and A. Collins, *The Cognitive Structure of Emotion*, vol. 18. 1988. doi: 10.2307/2074241.
- [2] N. B. Anderson *et al.*, “Stress in America: Paying with our Health,” American Institute of Stress. Accessed: Oct. 18, 2021. [Online]. Available: <https://www.apa.org/news/press/releases/stress/2014/stress-report.pdf>
- [3] J. M. Cénat *et al.*, “Prevalence of symptoms of depression, anxiety, insomnia, posttraumatic stress disorder, and psychological distress among populations affected by the COVID-19 pandemic: A systematic review and meta-analysis,” *Psychiatry Research*, vol. 295, p. 113599, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.psychres.2020.113599.
- [4] “Historia de la Realidad Virtual – Xperimenta Cultura.” <https://xperimentacultura.com/historia-de-la-realidad-virtual/> (accessed Oct. 18, 2021).
- [5] “La realidad virtual se introduce en un ballet en Francia, una primicia mundial,” *France 24*, Oct. 16, 2021. <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211016-la-realidad-virtual-se-introduce-en-un-ballet-en-francia-una-primicia-mundial> (accessed Oct. 18, 2021).
- [6] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller, and T. M. Vaughan, “Brain–computer interfaces for communication and control,” *Clinical Neurophysiology*, p. 25, 2002.
- [7] J. Porter, “Gabe Newell has big plans for brain-computer interfaces in gaming,” *The Verge*, Jan. 25, 2021. <https://www.theverge.com/2021/1/25/22248202/gabe-newell-valve-brain-computer-interface-bci-meet-peripherals> (accessed Oct. 19, 2021).
- [8] “El último avance de Elon Musk en su plan de conectar nuestros cerebros a computadoras,” *BBC News Mundo*. Accessed: Oct. 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-53955394>
- [9] A. Basu, *A brief chronology of Virtual Reality*. 2019.
- [10] Å. Fast-Berglund, L. Gong, and D. Li, “Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing,” *Procedia Manufacturing*, vol. 25, pp. 31–38, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.054.
- [11] Y. Lu and X. Zheng, “6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 19, p. 100158, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jii.2020.100158.
- [12] “VIVE Pro Eye Office | VIVE Enterprise.” <https://enterprise.vive.com/us/product/vive-pro-eye-office/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [13] “Oculus Quest 2: nuestras gafas de realidad virtual todo en uno más avanzadas | Oculus.” <https://www.oculus.com/quest-2/> (accessed Nov. 30, 2020).
- [14] “Welcome To Bhaptics.” <https://www.bhaptics.com/> (accessed Dec. 01, 2020).
- [15] “Dexta Robotics - Touch the Untouchable.” <https://origin.dextarobotics.com/en-us/> (accessed Dec. 01, 2020).
- [16] “KAT VR Official Site - Virtual Reality Locomotion Technologies,” *KATVR*. <https://www.kat-vr.com/> (accessed Dec. 01, 2020).
- [17] “VIVE™ | VIVE Tracker.” <https://www.vive.com/us/accessory/vive-tracker/> (accessed Dec. 01, 2020).
- [18] “Cybershoes,” *Cybershoes* -. <https://www.cybershoes.io/> (accessed Dec. 01, 2020).

- [19] P. L. Nunez and R. Srinivasan, *Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG*, 2nd ed. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2006.
- [20] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell, *Principles of Neural Science, Fifth Edition*, Fifth., Book, Section vols. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014. [Online]. Available: neurology.mhmedical.com/content.aspx?aid=1141370944
- [21] C. Novo-Olivas, L. Guitiérrez, and J. Bribiesca, “Mapeo Electroencefalográfico y Neurofeedback,” 2010, pp. 371–412.
- [22] J. E. Hall, *Guyton & Hall, Tratado de fisiología médica*. 2021.
- [23] G. H. Klem, H. O. Lüders, H. H. Jasper, and C. Elger, “The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology.,” *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*, vol. 52, pp. 3–6, 1999.
- [24] S. G. Mason and G. E. Birch, “A general framework for brain-computer interface design,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 70–85, Mar. 2003, doi: 10.1109/TNSRE.2003.810426.
- [25] S. K. Mudgal, S. K. Sharma, J. Chaturvedi, and A. Sharma, “Brain computer interface advancement in neurosciences: Applications and issues,” *Interdisciplinary Neurosurgery*, vol. 20, p. 100694, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.inat.2020.100694.
- [26] J. D. Bayliss, “A Flexible Brain-Computer Interface.” 2001.
- [27] G. R. Muller-Putz and G. Pfurtscheller, “Control of an Electrical Prosthesis With an SSVEP-Based BCI,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 55, no. 1, pp. 361–364, Jan. 2008, doi: 10.1109/TBME.2007.897815.
- [28] J. Bermudez *et al.*, “cyberPRINT: Hacia una Arquitectura del Ser,” p. 4.
- [29] M. Bensch *et al.*, “Nessi: An EEG-Controlled Web Browser for Severely Paralyzed Patients,” *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2007, pp. 1–5, 2007, doi: 10.1155/2007/71863.
- [30] R. Leeb, V. Settgast, D. Fellner, and G. Pfurtscheller, “Self-paced exploration of the Austrian National Library through thought,” p. 8.
- [31] J. Mellinger, T. Hinterberger, M. Bensch, M. Schröder, and N. Birbaumer, “Surfing the web with electrical brain signals: The Brain Web Surfer (BWS) for the completely paralysed,” p. 7, 2003.
- [32] B. Blankertz *et al.*, “THE BERLIN BRAIN-COMPUTER INTERFACE PRESENTS THE NOVEL MENTAL TYPEWRITER HEX-O-SPELL,” p. 2.
- [33] E. Donchin, K. M. Spencer, and R. Wijesinghe, “The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface,” *IEEE Trans. Rehab. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 174–179, Jun. 2000, doi: 10.1109/86.847808.
- [34] O. Tomori and M. Moore, “The Neurally Controllable Internet Browser (BrainBrowser),” *NEW HORIZONS*, p. 2.
- [35] M. Imani and G. A. Montazer, “A survey of emotion recognition methods with emphasis on E-Learning environments,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 147, p. 102423, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jnca.2019.102423.
- [36] J. A. Russell, “A circumplex model of affect.,” *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 39, no. 6, pp. 1161–1178, 1980, doi: 10.1037/h0077714.
- [37] P. Lindner *et al.*, “Therapist-led and self-led one-session virtual reality exposure therapy for public speaking anxiety with consumer hardware and software: A randomized controlled trial,” *J.Anxiety Disord.*, vol. 61, no. Journal Article, pp. 45–54, 2019, doi: 10.1016/j.janxdis.2018.07.003.
- [38] E. Carl *et al.*, “Virtual reality exposure therapy for anxiety and related disorders: A meta-analysis of randomized controlled trials,” *J.Anxiety Disord.*, vol. 61, no. Journal Article, pp. 27–36, 2019, doi: 10.1016/j.janxdis.2018.08.003.
- [39] D. Freeman *et al.*, “Automated psychological therapy using immersive virtual reality for treatment of fear of heights: a single-blind, parallel-group, randomised controlled trial,” *Lancet Psychiatry*, vol. 5, no. 8, pp. 625–632, 2018, doi: 10.1016/S2215-0366(18)30226-8.
- [40] M. Maskey *et al.*, “An intervention for fears and phobias in young people with autism spectrum disorders using flat screen computer-delivered virtual reality and cognitive

- behaviour therapy,” *Research in Autism Spectrum Disorders*, vol. 59, no. Generic, pp. 58–67, 2019, doi: 10.1016/j.rasd.2018.11.005.
- [41] S. C. Moelbert *et al.*, “Assessing body image in anorexia nervosa using biometric self-avatars in virtual reality: Attitudinal components rather than visual body size estimation are distorted,” *Psychol.Med.*, vol. 48, no. 4, pp. 642–653, 2018, doi: 10.1017/S0033291717002008.
- [42] M. Rus-Calafell, P. Garety, E. Sason, T. J. K. Craig, and L. R. Valmaggia, “Virtual reality in the assessment and treatment of psychosis: a systematic review of its utility, acceptability and effectiveness,” *Psychol.Med.*, vol. 48, no. 3, pp. 362–391, 2018, doi: 10.1017/S0033291717001945.
- [43] C.-H. Chen, I.-J. Lee, and L.-Y. Lin, “Augmented reality-based video-modeling storybook of nonverbal facial cues for children with autism spectrum disorder to improve their perceptions and judgments of facial expressions and emotions,” *Comput.Hum.Behav.*, vol. 55, no. Journal Article, pp. 477–485, 2016, doi: 10.1016/j.chb.2015.09.033.
- [44] H. H. S. Ip *et al.*, “Enhance emotional and social adaptation skills for children with autism spectrum disorder: A virtual reality enabled approach,” *Comput.Educ.*, vol. 117, no. Journal Article, pp. 1–15, 2018, doi: 10.1016/j.compedu.2017.09.010.
- [45] P. Papatthomas and K. Goldschmidt, “Utilizing virtual reality and immersion video technology as a focused learning tool for children with autism spectrum disorder,” *J.Pediatr.Nurs.*, vol. 35, no. Journal Article, pp. 8–9, 2017, doi: 10.1016/j.pedn.2017.01.013.
- [46] M. J. Smith *et al.*, “Using community-engaged methods to adapt virtual reality job-interview training for transition-age youth on the autism spectrum,” *Research in Autism Spectrum Disorders*, vol. 71, no. Journal Article, p. 101498, 2020, doi: 10.1016/j.rasd.2019.101498.
- [47] S. M. N. Glegg and D. E. Levac, “Barriers, Facilitators and Interventions to Support Virtual Reality Implementation in Rehabilitation: A Scoping Review,” *PM&R*, vol. 10, no. 11, pp. 1237–1251.e1, 2018, doi: 10.1016/j.pmrj.2018.07.004.
- [48] M. G. Maggio *et al.*, “Cognitive rehabilitation in patients with traumatic brain injury: A narrative review on the emerging use of virtual reality,” *Journal of Clinical Neuroscience*, vol. 61, no. Journal Article, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1016/j.jocn.2018.12.020.
- [49] F. A. Felipe *et al.*, “Evaluation instruments for physical therapy using virtual reality in stroke patients: a systematic review,” *Physiotherapy*, no. Journal Article, 2019, doi: 10.1016/j.physio.2019.05.005.
- [50] J. B. Palma Lopes, N. de Almeida Carvalho Duarte, R. D. Lazzari, and C. S. Oliveira, “Virtual reality in the rehabilitation process for individuals with cerebral palsy and Down syndrome: A systematic review,” *J.Bodywork Movement Ther.*, no. Journal Article, 2018, doi: 10.1016/j.jbmt.2018.06.006.
- [51] C. Pazzaglia *et al.*, “Comparison of virtual reality rehabilitation and conventional rehabilitation in Parkinson’s disease: a randomised controlled trial,” *Physiotherapy*, no. Journal Article, 2019, doi: 10.1016/j.physio.2019.12.007.
- [52] R. Karamians, R. Proffitt, D. Kline, and L. V. Gauthier, “Effectiveness of Virtual Reality- and Gaming-Based Interventions for Upper Extremity Rehabilitation Post-Stroke: A Meta-Analysis,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, no. Generic, 2019, doi: 10.1016/j.apmr.2019.10.195.
- [53] C. Cao and R. J. Cerfolio, “Virtual or Augmented Reality to Enhance Surgical Education and Surgical Planning,” *Thoracic Surgery Clinics*, vol. 29, no. 3, pp. 329–337, 2019, doi: 10.1016/j.thorsurg.2019.03.010.
- [54] S. B. Tomlinson, B. K. Hendricks, and A. Cohen-Gadol, “Immersive Three-Dimensional Modeling and Virtual Reality for Enhanced Visualization of Operative Neurosurgical Anatomy,” *World Neurosurgery*, vol. 131, no. Journal Article, pp. 313–320, 2019, doi: 10.1016/j.wneu.2019.06.081.
- [55] A. K. Bartella *et al.*, “Virtual reality in preoperative imaging in maxillofacial surgery: implementation of ‘the next level’?,” *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 57, no. 7, pp. 644–648, 2019, doi: 10.1016/j.bjoms.2019.02.014.

- [56] H. Lesch, E. Johnson, J. Peters, and J. C. Cendán, “VR Simulation Leads to Enhanced Procedural Confidence for Surgical Trainees,” *Journal of Surgical Education*, vol. 77, no. 1, pp. 213–218, 2020, doi: 10.1016/j.jsurg.2019.08.008.
- [57] A. K. Bashabsheh, H. H. Alzoubi, and M. Z. Ali, “The application of virtual reality technology in architectural pedagogy for building constructions,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 58, no. 2, pp. 713–723, 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.06.002.
- [58] E. D. Innocenti *et al.*, “Mobile virtual reality for musical genre learning in primary education,” *Comput.Educ.*, vol. 139, no. Journal Article, pp. 102–117, 2019, doi: 10.1016/j.compedu.2019.04.010.
- [59] F. Blume, R. Göllner, K. Moeller, T. Dresler, A.-C. Ehlis, and C. Gawrilow, “Do students learn better when seated close to the teacher? A virtual classroom study considering individual levels of inattention and hyperactivity-impulsivity,” *Learning and Instruction*, vol. 61, no. Journal Article, pp. 138–147, 2019, doi: 10.1016/j.learninstruc.2018.10.004.
- [60] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, “A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda,” *Comput.Educ.*, vol. 147, no. Journal Article, p. 103778, 2020, doi: 10.1016/j.compedu.2019.103778.
- [61] G. Makransky, T. S. Terkildsen, and R. E. Mayer, “Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning,” *Learning and Instruction*, vol. 60, no. Journal Article, pp. 225–236, 2019, doi: 10.1016/j.learninstruc.2017.12.007.
- [62] S. M. C. Loureiro, J. Guerreiro, and F. Ali, “20 years of research on virtual reality and augmented reality in tourism context: A text-mining approach,” *Tourism Management*, vol. 77, no. Journal Article, p. 104028, 2020, doi: 10.1016/j.tourman.2019.104028.
- [63] I. P. Tussyadiah, D. Wang, T. H. Jung, and M. C. tom Dieck, “Virtual reality, presence, and attitude change: Empirical evidence from tourism,” *Tourism Management*, vol. 66, no. Journal Article, pp. 140–154, 2018, doi: 10.1016/j.tourman.2017.12.003.
- [64] T. Li and Y. Chen, “Will virtual reality be a double-edged sword? Exploring the moderation effects of the expected enjoyment of a destination on travel intention,” *Journal of Destination Marketing & Management*, vol. 12, no. Journal Article, pp. 15–26, 2019, doi: 10.1016/j.jdmm.2019.02.003.
- [65] M. Meissner, J. Pfeiffer, T. Pfeiffer, and H. Oppewal, “Combining virtual reality and mobile eye tracking to provide a naturalistic experimental environment for shopper research,” *Journal of Business Research*, vol. 100, no. Journal Article, pp. 445–458, 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2017.09.028.
- [66] D. E. Boyd and B. Koles, “Virtual reality and its impact on B2B marketing: A value-in-use perspective,” *Journal of Business Research*, vol. 100, no. Journal Article, pp. 590–598, 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2018.06.007.
- [67] X. Y. Leung, J. Lyu, and B. Bai, “A fad or the future? Examining the effectiveness of virtual reality advertising in the hotel industry,” *International Journal of Hospitality Management*, no. Journal Article, p. 102391, 2019, doi: 10.1016/j.ijhm.2019.102391.
- [68] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, p. S1755581720300110, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [69] V. Liagkou, D. Salmas, and C. Stylios, “Realizing Virtual Reality Learning Environment for Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 79, no. Journal Article, pp. 712–717, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.02.025.
- [70] H. Eschen, T. Kötter, R. Rodeck, M. Harnisch, and T. Schüppstuhl, “Augmented and Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry,” *Procedia Manufacturing*, vol. 19, no. Journal Article, pp. 156–163, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.01.022.
- [71] V. Liagkou and C. Stylios, “Introducing VR technology for increasing the digitalization of SMEs,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 451–456, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.101.
- [72] J. J. Roldán, E. Crespo, A. Martín-Barrio, E. Peña-Tapia, and A. Barrientos, “A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and

- process mining,” *Robot.Comput.Integrated Manuf.*, vol. 59, no. Journal Article, pp. 305–316, 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.004.
- [73] H. Zhang, “Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 717–722, 2017, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.05.005.
- [74] L. Pérez, E. Diez, R. Usamentiaga, and D. F. García, “Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces,” *Computers in Industry*, vol. 109, no. Generic, pp. 114–120, 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.05.001.
- [75] A. Karvouniari, G. Michalos, N. Dimitropoulos, and S. Makris, “An approach for exoskeleton integration in manufacturing lines using Virtual Reality techniques,” *Procedia CIRP*, vol. 78, no. Journal Article, pp. 103–108, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.315.
- [76] H. Lee, T. H. Jung, M. C. tom Dieck, and N. Chung, “Experiencing immersive virtual reality in museums,” *Information & Management*, no. Generic, p. 103229, 2019, doi: 10.1016/j.im.2019.103229.
- [77] M. Aebersold, J. Rasmussen, and T. Mulrenin, “Virtual Everest: Immersive Virtual Reality Can Improve the Simulation Experience,” *Clinical Simulation in Nursing*, vol. 38, no. Journal Article, pp. 1–4, 2020, doi: 10.1016/j.ecns.2019.09.004.
- [78] I. Nakarada-Kordic, S. Reay, G. Bennett, J. Kruse, A.-M. Lydon, and J. Sim, “Can virtual reality simulation prepare patients for an MRI experience?,” *Radiography*, no. Journal Article, 2019, doi: 10.1016/j.radi.2019.11.004.
- [79] Z. Feng, V. A. González, R. Amor, R. Lovreglio, and G. Cabrera-Guerrero, “Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review,” *Comput.Educ.*, vol. 127, no. Journal Article, pp. 252–266, 2018, doi: 10.1016/j.compedu.2018.09.002.
- [80] Y. Shi, J. Du, C. R. Ahn, and E. Ragan, “Impact assessment of reinforced learning methods on construction workers’ fall risk behavior using virtual reality,” *Autom.Constr.*, vol. 104, no. Journal Article, pp. 197–214, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.04.015.
- [81] J. Wolfartsberger, “Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review,” *Autom.Constr.*, vol. 104, no. Journal Article, pp. 27–37, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.03.018.
- [82] D. C. Beidel *et al.*, “Trauma management therapy with virtual-reality augmented exposure therapy for combat-related PTSD: A randomized controlled trial,” *J.Anxiety Disord.*, vol. 61, no. Journal Article, pp. 64–74, 2019, doi: 10.1016/j.janxdis.2017.08.005.
- [83] J. L. Maples-Keller, M. Price, S. Rauch, M. Gerardi, and B. O. Rothbaum, “Investigating Relationships Between PTSD Symptom Clusters Within Virtual Reality Exposure Therapy for OEF/OIF Veterans,” *Behavior Therapy*, vol. 48, no. 2, pp. 147–155, 2017, doi: 10.1016/j.beth.2016.02.011.
- [84] H. M. Zinzow *et al.*, “Virtual Reality and Cognitive-Behavioral Therapy for Driving Anxiety and Aggression in Veterans: A Pilot Study,” *Cognitive and Behavioral Practice*, vol. 25, no. 2, pp. 296–309, 2018, doi: 10.1016/j.cbpra.2017.09.002.
- [85] A. M. Norr, D. J. Smolenski, and G. M. Reger, “Effects of prolonged exposure and virtual reality exposure on suicidal ideation in active duty soldiers: An examination of potential mechanisms,” *Journal of Psychiatric Research*, vol. 103, no. Generic, pp. 69–74, 2018, doi: 10.1016/j.jpsychires.2018.05.009.
- [86] S. Schmidt, H.-G. Jo, M. Wittmann, and T. Hinterberger, “‘Catching the waves’ – slow cortical potentials as moderator of voluntary action,” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 68, pp. 639–650, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.neubiorev.2016.06.023.
- [87] I. Moreno *et al.*, “Los sistemas de interfaz cerebro-computadora basado en EEG: características y aplicaciones,” *I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. 13–26, Jul. 2019, doi: 10.33412/idt.v15.2.2230.
- [88] I. Lazarou, S. Nikolopoulos, P. C. Petrantonakis, I. Kompatsiaris, and M. Tsolaki, “EEG-Based Brain–Computer Interfaces for Communication and Rehabilitation of People with Motor Impairment: A Novel Approach of the 21st Century,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 12, p. 14, Jan. 2018, doi: 10.3389/fnhum.2018.00014.
- [89] U. Strehl *et al.*, “Neurofeedback of Slow Cortical Potentials in Children with Attention-

- Deficit/Hyperactivity Disorder: A Multicenter Randomized Trial Controlling for Unspecific Effects,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 11, Mar. 2017, doi: 10.3389/fnhum.2017.00135.
- [90] R. Fazel-Rezai, B. Z. Allison, C. Guger, E. W. Sellers, S. C. Kleih, and A. Kübler, “P300 brain computer interface: current challenges and emerging trends,” *Front. Neuroeng.*, vol. 5, 2012, doi: 10.3389/fneng.2012.00014.
- [91] F. Farooq, D. Looney, D. P. Mandic, and P. Kidmose, “EarEEG based visual P300 Brain-Computer Interface,” in *2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, Montpellier, France, Apr. 2015, pp. 98–101. doi: 10.1109/NER.2015.7146569.
- [92] F. Velasco-Álvarez, S. Sancha-Ros, E. García-Garaluz, Á. Fernández-Rodríguez, M. T. Medina-Juliá, and R. Ron-Angevin, “UMA-BCI Speller: An easily configurable P300 speller tool for end users,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 172, pp. 127–138, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.cmpb.2019.02.015.
- [93] S.-K. Yeom, S. Fazli, and S.-W. Lee, “P300 visual speller based on random set presentation,” in *2014 International Winter Workshop on Brain-Computer Interface (BCI)*, Gangwon province, Korea (South), Feb. 2014, pp. 1–2. doi: 10.1109/iww-BCI.2014.6782567.
- [94] A. Katyal and R. Singla, “A novel hybrid paradigm based on steady state visually evoked potential & P300 to enhance information transfer rate,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 59, p. 101884, May 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2020.101884.
- [95] T. W. Picton, “The P300 Wave of the Human Event-Related Potential:,” *Journal of Clinical Neurophysiology*, vol. 9, no. 4, pp. 456–479, Oct. 1992, doi: 10.1097/00004691-199210000-00002.
- [96] H.-J. Hwang, J.-H. Lim, Y.-J. Jung, H. Choi, S. W. Lee, and C.-H. Im, “Development of an SSVEP-based BCI spelling system adopting a QWERTY-style LED keyboard,” *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 208, no. 1, pp. 59–65, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.jneumeth.2012.04.011.
- [97] J.-H. Lim, H.-J. Hwang, and C.-H. Im, ““Eyes-closed” SSVEP-based BCI for binary communication of individuals with impaired oculomotor function,” in *2013 International Winter Workshop on Brain-Computer Interface (BCI)*, Gangwon Province, Korea (South), Feb. 2013, pp. 79–80. doi: 10.1109/IWW-BCI.2013.6506637.
- [98] F.-B. Vialatte, M. Maurice, J. Dauwels, and A. Cichocki, “Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives,” *Progress in Neurobiology*, vol. 90, no. 4, pp. 418–438, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.pneurobio.2009.11.005.
- [99] Q. Liu *et al.*, “Efficient representations of EEG signals for SSVEP frequency recognition based on deep multiset CCA,” *Neurocomputing*, vol. 378, pp. 36–44, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2019.10.049.
- [100] X. Chai *et al.*, “A hybrid BCI-controlled smart home system combining SSVEP and EMG for individuals with paralysis,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 56, p. 101687, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101687.
- [101] X. Han, S. Zhang, and X. Gao, “A study on reducing training time of BCI system based on an SSVEP dynamic model,” in *2019 7th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI)*, Gangwon, Korea (South), Feb. 2019, pp. 1–2. doi: 10.1109/IWW-BCI.2019.8737318.
- [102] C. Liu, S. Xie, X. Xie, X. Duan, W. Wang, and K. Obermayer, “Design of a video feedback SSVEP-BCI system for car control based on improved MUSIC method,” in *2018 6th International Conference on Brain-Computer Interface (BCI)*, Gangwon, Jan. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/IWW-BCI.2018.8311499.
- [103] M. A. Lopez-Gordo, A. Prieto, F. Pelayo, and C. Morillas, “Customized stimulation enhances performance of independent binary SSVEP-BCIs,” *Clinical Neurophysiology*, vol. 122, no. 1, pp. 128–133, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.clinph.2010.05.021.
- [104] Xiaorong Gao, Dingfeng Xu, Ming Cheng, and Shangkai Gao, “A bci-based environmental controller for the motion-disabled,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil.*

- Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 137–140, Jun. 2003, doi: 10.1109/TNSRE.2003.814449.
- [105] G. R. Kiran Kumar and M. Ramasubba Reddy, “Constructing an exactly periodic subspace for enhancing SSVEP based BCI,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 44, p. 101046, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.aei.2020.101046.
- [106] M. Hamedi, S.-H. Salleh, and A. M. Noor, “Electroencephalographic Motor Imagery Brain Connectivity Analysis for BCI: A Review,” *Neural Computation*, vol. 28, no. 6, pp. 999–1041, Jun. 2016, doi: 10.1162/NECO_a_00838.
- [107] N. Padfield, J. Zabalza, H. Zhao, V. Masero, and J. Ren, “EEG-Based Brain-Computer Interfaces Using Motor-Imagery: Techniques and Challenges,” *Sensors*, vol. 19, no. 6, p. 1423, Mar. 2019, doi: 10.3390/s19061423.
- [108] Z. Tang, S. Sun, S. Zhang, Y. Chen, C. Li, and S. Chen, “A Brain-Machine Interface Based on ERD/ERS for an Upper-Limb Exoskeleton Control,” *Sensors*, vol. 16, no. 12, p. 2050, Dec. 2016, doi: 10.3390/s16122050.
- [109] D. C. Irimia, R. Ortner, M. S. Poboroniuc, B. E. Ignat, and C. Guger, “High Classification Accuracy of a Motor Imagery Based Brain-Computer Interface for Stroke Rehabilitation Training,” *Front. Robot. AI*, vol. 5, p. 130, Nov. 2018, doi: 10.3389/frobt.2018.00130.
- [110] C. Wei, L. Chen, Z. Song, X. Lou, and D. Li, “EEG-based emotion recognition using simple recurrent units network and ensemble learning,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 58, p. 101756, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2019.101756.
- [111] J. A. Domínguez-Jiménez, K. C. Campo-Landines, J. C. Martínez-Santos, E. J. Delahoz, and S. H. Contreras-Ortiz, “A machine learning model for emotion recognition from physiological signals,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 55, p. 101646, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101646>.
- [112] L. Hanegraaf, S. Arunogiri, J. Hohwy, and A. Verdejo-Garcia, “Dysfunctional personality beliefs and emotion recognition in individuals with methamphetamine dependence,” *Addictive Behaviors*, vol. 105, p. 106336, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.addbeh.2020.106336.
- [113] S. M. Alarcao and M. J. Fonseca, “Emotions Recognition Using EEG Signals: A Survey,” *IEEE Trans. Affective Comput.*, vol. 10, no. 3, pp. 374–393, Jul. 2019, doi: 10.1109/TAFFC.2017.2714671.
- [114] L. Bozhkov, P. Georgieva, I. Santos, A. Pereira, and C. Silva, “EEG-based Subject Independent Affective Computing Models,” *Procedia Computer Science*, vol. 53, pp. 375–382, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.07.314.
- [115] Z. Liang, S. Oba, and S. Ishii, “An unsupervised EEG decoding system for human emotion recognition,” *Neural Networks*, vol. 116, pp. 257–268, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.04.003>.
- [116] A. Goshvarpour, A. Abbasi, and A. Goshvarpour, “An accurate emotion recognition system using ECG and GSR signals and matching pursuit method,” *Biomedical Journal*, vol. 40, no. 6, pp. 355–368, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.bj.2017.11.001.
- [117] H. Guo, Y. Huang, C. Lin, J. Chien, K. Haraikawa, and J. Shieh, “Heart Rate Variability Signal Features for Emotion Recognition by Using Principal Component Analysis and Support Vectors Machine,” in *2016 IEEE 16th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*, Nov. 2016, pp. 274–277. doi: 10.1109/BIBE.2016.40.
- [118] K. Takahashi, “Remarks on computational emotion recognition from vital information,” in *2009 Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Sep. 2009, pp. 299–304. doi: 10.1109/ISPA.2009.5297727.
- [119] M. Egger, M. Ley, and S. Hanke, “Emotion Recognition from Physiological Signal Analysis: A Review,” *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 343, pp. 35–55, May 2019, doi: 10.1016/j.entcs.2019.04.009.
- [120] D. yasmina, M. Hajar, and A. M. Hassan, “Using YouTube Comments for Text-based Emotion Recognition,” *Procedia Computer Science*, vol. 83, pp. 292–299, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.04.128.
- [121] R. Santhoshkumar and M. K. Geetha, “Deep Learning Approach for Emotion Recognition from Human Body Movements with Feedforward Deep Convolution Neural Networks,” *Procedia Computer Science*, vol. 152, pp. 158–165, Jan. 2019, doi:

- 10.1016/j.procs.2019.05.038.
- [122] D. Metcalfe, K. McKenzie, K. McCarty, and T. V. Pollet, “Emotion recognition from body movement and gesture in children with Autism Spectrum Disorder is improved by situational cues,” *Research in Developmental Disabilities*, vol. 86, pp. 1–10, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ridd.2018.12.008.
- [123] A. T.S. and R. M. R. Guddeti, “Affective database for e-learning and classroom environments using indian students’ faces, hand gestures and body postures,” *Future Generation Computer Systems*, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.future.2020.02.075.
- [124] A. K. Hassan and S. N. Mohammed, “A novel facial emotion recognition scheme based on graph mining,” *Defence Technology*, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.dt.2019.12.006.
- [125] W. Xiaohua, P. Muzi, P. Lijuan, H. Min, J. Chunhua, and R. Fuji, “Two-level attention with two-stage multi-task learning for facial emotion recognition,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 62, pp. 217–225, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jvcir.2019.05.009.
- [126] G. Tonguç and B. Ozaydın Ozkara, “Automatic recognition of student emotions from facial expressions during a lecture,” *Computers & Education*, vol. 148, p. 103797, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.compedu.2019.103797.
- [127] M. B. Akçay and K. Oğuz, “Speech emotion recognition: Emotional models, databases, features, preprocessing methods, supporting modalities, and classifiers,” *Speech Communication*, vol. 116, pp. 56–76, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.specom.2019.12.001.
- [128] J. Zhao, X. Mao, and L. Chen, “Speech emotion recognition using deep 1D & 2D CNN LSTM networks,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 47, pp. 312–323, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.bspc.2018.08.035.
- [129] T. Özseven, “A novel feature selection method for speech emotion recognition,” *Applied Acoustics*, vol. 146, pp. 320–326, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.11.028.
- [130] K. Mannepalli, P. N. Sastry, and M. Suman, “Emotion recognition in speech signals using optimization based multi-SVNN classifier,” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jksuci.2018.11.012.
- [131] B. A. Prayitno and S. Suyanto, “Segment Repetition Based on High Amplitude to Enhance a Speech Emotion Recognition,” *Procedia Computer Science*, vol. 157, pp. 420–426, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.08.234.
- [132] L. R. Borges, F. R. Martins, E. L. M. Naves, T. F. Bastos, and V. F. Lucena, “Multimodal System for Training at Distance in a Virtual or Augmented Reality Environment for Users of Electric-Powered Wheelchairs,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 30, pp. 156–160, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.146.
- [133] S. Liang, K.-S. Choi, J. Qin, W.-M. Pang, Q. Wang, and P.-A. Heng, “Improving the discrimination of hand motor imagery via virtual reality based visual guidance,” *Comput.Methods Programs Biomed.*, vol. 132, no. Journal Article, pp. 63–74, 2016, doi: 10.1016/j.cmpb.2016.04.023.
- [134] H. Wu *et al.*, “Evaluation of Motor Training Performance in 3D Virtual Environment via Combining Brain-computer Interface and Haptic Feedback,” *Procedia Computer Science*, vol. 107, no. Journal Article, pp. 256–261, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.03.096.
- [135] S.-C. Yeh *et al.*, “A multiplayer online car racing virtual-reality game based on internet of brains,” *J.Syst.Archit.*, vol. 89, no. Journal Article, pp. 30–40, 2018, doi: 10.1016/j.sysarc.2018.06.004.
- [136] C. G. Coogan and B. He, “Brain-Computer Interface Control in a Virtual Reality Environment and Applications for the Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 6, no. Journal Article, pp. 10840–10849, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2809453.
- [137] W.-Y. Hsu, “Brain-computer interface connected to telemedicine and telecommunication in virtual reality applications,” *Telematics and Informatics*, vol. 34, no. 4, pp. 224–238, 2017, doi: 10.1016/j.tele.2016.01.003.
- [138] M. A. Vaquero-Blasco, E. Perez-Valero, M. A. Lopez-Gordo, and C. Morillas, “Virtual Reality as a Portable Alternative to Chromotherapy Rooms for Stress Relief: A Preliminary Study,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, Art. no. 21, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20216211.

- [139] M. A. Vaquero-Blasco, E. Perez-Valero, C. Morillas, and M. A. Lopez-Gordo, “Virtual Reality Customized 360-Degree Experiences for Stress Relief,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21062219.
- [140] J. Zhang, Z. Yin, P. Cheng, and S. Nichele, “Emotion Recognition Using Multi-Modal Data and Machine Learning Techniques: A Tutorial and Review,” *Information Fusion*, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.inffus.2020.01.011.
- [141] J. Minguillon, M. A. Lopez-Gordo, and F. Pelayo, “Detection of attention in multi-talker scenarios: A fuzzy approach,” *Expert Systems with Applications*, vol. 64, pp. 261–268, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.07.042.
- [142] M. A. Lopez-Gordo, F. Pelayo, E. Fernandez, and P. Padilla, “Phase-shift keying of EEG signals: Application to detect attention in multitalker scenarios,” *Signal Processing*, vol. 117, pp. 165–173, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.sigpro.2015.05.004.
- [143] J. Minguillon, E. Perez, M. Lopez-Gordo, F. Pelayo, and M. Sanchez-Carrion, “Portable System for Real-Time Detection of Stress Level,” *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2504, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18082504.
- [144] J. Minguillon, M. A. Lopez-Gordo, D. A. Renedo-Criado, M. J. Sanchez-Carrion, and F. Pelayo, “Blue lighting accelerates post-stress relaxation: Results of a preliminary study,” *PLoS ONE*, vol. 12, no. 10, p. e0186399, Oct. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0186399.
- [145] J. Diemer, G. W. Alpers, H. M. Peperkorn, Y. Shiban, and A. Muehlberger, “The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality,” *Frontiers in Psychology*, vol. 6, no. Journal Article, p. 26, 2015, doi: 10.3389/fpsyg.2015.00026.
- [146] D. Kim and Y. J. Ko, “The impact of virtual reality (VR) technology on sport spectators’ flow experience and satisfaction,” *Comput.Hum.Behav.*, vol. 93, no. Journal Article, pp. 346–356, 2019, doi: 10.1016/j.chb.2018.12.040.
- [147] S. Bermúdez i Badia *et al.*, “Toward Emotionally Adaptive Virtual Reality for Mental Health Applications,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 23, no. 5, pp. 1877–1887, 2019, doi: 10.1109/JBHI.2018.2878846.
- [148] K. Dedovic, R. Renwick, N. K. Mahani, V. Engert, S. J. Lupien, and J. C. Pruessner, “The Montreal Imaging Stress Task: using functional imaging to investigate the effects of perceiving and processing psychosocial stress in the human brain,” *J Psychiatry Neurosci*, p. 7.
- [149] A. R. Subhani, W. Mumtaz, M. N. B. M. Saad, N. Kamel, and A. S. Malik, “Machine Learning Framework for the Detection of Mental Stress at Multiple Levels,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13545–13556, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2723622.
- [150] A. Brugnera, C. Zarbo, M. P. Tarvainen, P. Marchettini, R. Adorni, and A. Compare, “Heart rate variability during acute psychosocial stress: A randomized cross-over trial of verbal and non-verbal laboratory stressors,” *International Journal of Psychophysiology*, vol. 127, pp. 17–25, May 2018, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2018.02.016.
- [151] L. Han, Q. Zhang, X. Chen, Q. Zhan, T. Yang, and Z. Zhao, “Detecting work-related stress with a wearable device,” *Computers in Industry*, vol. 90, pp. 42–49, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compind.2017.05.004.
- [152] R. Jenke, A. Peer, and M. Buss, “Feature Extraction and Selection for Emotion Recognition from EEG,” *IEEE Trans. Affective Comput.*, vol. 5, no. 3, pp. 327–339, Jul. 2014, doi: 10.1109/TAFFC.2014.2339834.
- [153] J. Minguillon, M. A. Lopez-Gordo, and F. Pelayo, “Stress Assessment by Prefrontal Relative Gamma,” *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 10, Sep. 2016, doi: 10.3389/fncom.2016.00101.
- [154] “RABio w8 website,” *rabio*. <https://rabiow.wixsite.com/rabio> (accessed Nov. 02, 2021).
- [155] “Versatile EEG,” *Bitbrain*, Sep. 03, 2019. <https://www.bitbrain.com/es/productos-neurotecnologia/semi-dry-eeg/versatile-eeg> (accessed Dec. 11, 2020).
- [156] R. Cassani, T. H. Falk, F. J. Fraga, M. Cecchi, D. K. Moore, and R. Anghinah, “Towards automated electroencephalography-based Alzheimer’s disease diagnosis using portable low-density devices,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 33, pp. 261–271, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.bspc.2016.12.009.

- [157] D. V. Moretti, A. Prestia, C. Fracassi, G. Binetti, O. Zanetti, and G. B. Frisoni, “Specific EEG Changes Associated with Atrophy of Hippocampus in Subjects with Mild Cognitive Impairment and Alzheimer’s Disease,” *International Journal of Alzheimer’s Disease*, vol. 2012, pp. 1–8, 2012, doi: 10.1155/2012/253153.
- [158] C. Jeunet *et al.*, “Uncovering EEG Correlates of Covert Attention in Soccer Goalkeepers: Towards Innovative Sport Training Procedures,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 1705, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-58533-2.
- [159] S. R. Steinhubl *et al.*, “Cardiovascular and nervous system changes during meditation,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 9, Mar. 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00145.
- [160] A. Lutz, L. L. Greischar, N. B. Rawlings, M. Ricard, and R. J. Davidson, “Long-term meditators self-induce high-amplitude gamma synchrony during mental practice,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, no. 46, pp. 16369–16373, Nov. 2004, doi: 10.1073/pnas.0407401101.
- [161] Q. Huang, M. Yang, H. Jane, S. Li, and N. Bauer, “Trees, grass, or concrete? The effects of different types of environments on stress reduction,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 193, p. 103654, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103654.
- [162] S. Hong, D. Joung, J. Lee, D.-Y. Kim, S. Kim, and B.-J. Park, “The Effects of Watching a Virtual Reality (VR) Forest Video on Stress Reduction in Adults,” *J. People Plants Environ*, vol. 22, no. 3, pp. 309–319, Jun. 2019, doi: 10.11628/ksppe.2019.22.3.309.
- [163] V. Tran, “Positive affect negative affect scale (PANAS),” *Encyclopedia of behavioral medicine*, pp. 1508–1509, 2013.
- [164] J. Amores, R. Richer, N. Zhao, P. Maes, and B. M. Eskofier, “Promoting relaxation using virtual reality, olfactory interfaces and wearable EEG,” in *2018 IEEE 15th international conference on wearable and implantable body sensor networks (BSN)*, 2018, pp. 98–101.
- [165] G. Perhakaran, A. M. Yusof, M. E. Rusli, M. Z. M. Yusoff, I. Mahalil, and A. R. R. Zainuddin, “A study of meditation effectiveness for virtual reality based stress therapy using EEG measurement and questionnaire approaches,” in *Innovation in Medicine and Healthcare 2015*, Springer, 2016, pp. 365–373.
- [166] F. Soyka, M. Leyrer, J. Smallwood, C. Ferguson, B. E. Riecke, and B. J. Mohler, “Enhancing stress management techniques using virtual reality,” in *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, Anaheim California, Jul. 2016, pp. 85–88. doi: 10.1145/2931002.2931017.
- [167] A. L. Butt, S. Kardong-Edgren, and A. Ellertson, “Using Game-Based Virtual Reality with Haptics for Skill Acquisition,” *Clinical Simulation in Nursing*, vol. 16, no. Generic, pp. 25–32, 2018, doi: 10.1016/j.ecns.2017.09.010.
- [168] K. Pfeffel, M. Elezi, P. Ulsamer, and N. H. Müller, “Virtual Reality as a Stress Reduction Measure – Chilling Out on the Beach in My Living Room,” in *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems*, vol. 12206, P. Zaphiris and A. Ioannou, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 176–189. doi: 10.1007/978-3-030-50506-6_13.
- [169] A. Taneja, S. B. Vishal, V. Mahesh, and B. Geethanjali, “Virtual reality based neuro-rehabilitation for mental stress reduction,” in *2017 Fourth International Conference on Signal Processing, Communication and Networking (ICSCN)*, Chennai, India, Mar. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICSCN.2017.8085665.
- [170] G. Pfurtscheller, Ch. Neuper, D. Flotzinger, and M. Pregenzer, “EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement,” *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 103, no. 6, pp. 642–651, Dec. 1997, doi: 10.1016/S0013-4694(97)00080-1.
- [171] M. Y. Ladekar, S. S. Gupta, Y. V. Joshi, and R. R. Manthalkar, “EEG based visual cognitive workload analysis using multirate IIR filters,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 68, p. 102819, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.bspc.2021.102819.
- [172] S. G. Hart and L. E. Staveland, “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,” in *Advances in Psychology*, vol. 52, P. A. Hancock and N. Meshkati, Eds. North-Holland, 1988, pp. 139–183. doi: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.

- [173] E. Mihelj, M. Bächinger, S. Kikkert, K. Ruddy, and N. Wenderoth, “Mental individuation of imagined finger movements can be achieved using TMS-based neurofeedback,” *NeuroImage*, vol. 242, p. 118463, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.neuroimage.2021.118463.
- [174] T. Harmony *et al.*, “EEG delta activity: an indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks,” *International Journal of Psychophysiology*, vol. 24, no. 1, pp. 161–171, Nov. 1996, doi: 10.1016/S0167-8760(96)00053-0.
- [175] M. U. Iqbal, B. Srinivasan, and R. Srinivasan, “Dynamic assessment of control room operator’s cognitive workload using Electroencephalography (EEG),” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 141, p. 106726, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.106726.
- [176] R. Mahmoud, T. Shanableh, I. P. Bodala, N. V. Thakor, and H. Al-Nashash, “Novel Classification System for Classifying Cognitive Workload Levels Under Vague Visual Stimulation,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 21, pp. 7019–7028, Nov. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2727539.