



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

Entornos virtuales para la rehabilitación funcional de la muñeca

Virtual environments for functional wrist rehabilitation

Autor:
D. Sergio Talegón de la Fuente
Tutor:
D. Javier Pérez Turiel

Valladolid, 29 de junio de 2023

TÍTULO: Entornos virtuales para la rehabilitación funcional de la muñeca

AUTOR: Sergio Talegón de la Fuente

TUTOR: Javier Pérez Turiel

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Sistemas y Automática

TRIBUNAL

PRESIDENTE: D. Javier Pérez Turiel

SECRETARIO: Juan Carlos Fraile Marinero

VOCAL: Jesús Poza Crespo

SUPLENTE 1: Roberto Hornero Sánchez

SUPLENTE 2: Alberto Herreros López

FECHA: Jueves 29 de junio de 2023

CALIFICACIÓN:

Resumen

El Daño Cerebral Adquirido (DCA) afecta en España a más de 435.000 personas y más de 100.000 casos nuevos son notificados al año. La secuela más común de esta patología es la hemiparesia, consistente en la pérdida de fuerza muscular del lado contralateral a la lesión cerebral. Esta secuela compromete la movilidad de las manos y muñecas de gran parte de los supervivientes de un DCA, una limitación que afecta de forma severa la independencia de aquellos que la sufren. Esto es debido, en gran parte, a la importancia que tienen en las actividades cotidianas los movimientos de estas partes del cuerpo. Desafortunadamente, la rehabilitación de la muñeca es tan compleja como lo es su estructura anatómica y biomecánica. Es por ello de vital importancia encontrar formas de rehabilitar de forma rápida y efectiva dicha articulación. El uso de tecnologías como la robótica o la realidad extendida a través de *serious games* es realmente prometedor para la aceleración de la recuperación de estos pacientes. Por esta razón, en el presente trabajo se describe el proceso de diseño y desarrollo de un primer prototipo de un entorno virtual (EV) para la rehabilitación funcional de la muñeca llamado *StarWrist*, así como los requisitos para la integración de este tipo de EV en la plataforma M3Rob del Instituto de Tecnologías Avanzadas de la Producción (ITAP) de la Universidad de Valladolid.

Palabras clave Daño Cerebral Adquirido, Neurorehabilitación, Muñeca, Serious Games, Realidad Virtual

Abstract

Acquired Brain Injury (ABI) affects more than 435,000 people in Spain and more than 100,000 new cases are reported each year. The most common sequela of this pathology is hemiparesis, consisting of the loss of muscle strength on the side contralateral to the brain injury. This sequela compromises the hand and wrist mobility of a large proportion of ABI survivors, a limitation that severely affects the independence of those who suffer from it. This is largely due to the importance of the movements of these body parts in everyday activities. Unfortunately, wrist rehabilitation is as complex as its anatomical and biomechanical structure. It is therefore of vital importance to find ways to effectively and quickly rehabilitate this joint. The use of technologies such as robotics or extended reality through serious games holds great promise for the acceleration of the recovery of these patients. For this reason, this paper describes the design and development process of a first prototype of a virtual environment (VE) for the functional rehabilitation of the wrist called *StarWrist* as well as the requirements for the integration of this type of VE within the M3Rob platform of the Institute of Advanced Production Technologies (ITAP) of the University of Valladolid.

Keywords Acquired Brain Injury, Neurorehabilitation, Wrist, Serious Games, Virtual Reality

Agradecimientos

A todas las personas que me habéis acompañado estos cuatro años.

A todas las personas que me habéis apoyado cuando más lo necesitaba,
en especial a mi madre, mi padre y mi hermano.

A todos aquellos que han hecho posible este trabajo.

A todos vosotros, **muchas gracias**.

Tabla de contenidos

1	Introducción	11
	1.1. Daño Cerebral Adquirido	
	1.2. Robótica y realidad virtual en neurorrehabilitación	
	1.3. Objetivo del Trabajo de Fin de Grado	
2	Daño Cerebral Adquirido	13
	2.1. Introducción	
	2.2. Etiología y epidemiología	
	2.3. Secuelas motoras	
	2.4. Rehabilitación, neurorrehabilitación y neuroplasticidad	
	2.5. Factores de recuperación en el paciente neurológico	
3	La articulación de la muñeca	21
	3.1. Introducción	
	3.2. Estudio anatómico	
	3.3. Estudio biomecánico	
4	Entornos virtuales y robótica en rehabilitación de muñeca	25
	4.1. Realidad extendida	
	4.2. Realidad virtual en neurorrehabilitación motora	
	4.3. Realidad aumentada en neurorrehabilitación motora	
	4.4. Entornos virtuales para neurorrehabilitación de muñeca	
	4.5. Robots para rehabilitación de muñeca	
	4.6. Modalidades de entrenamiento en rehabilitación robótica	
5	Materiales y métodos	37
	5.1. Herramientas y materiales utilizados	
	5.2. Requisitos de integración en la plataforma M3Rob	
	5.3. Diseño del entorno de realidad virtual	
	5.4. Desarrollo del software en Unity	
6	Resultados	61
7	Discusión y líneas futuras	63

Lista de figuras y tablas

<i>Figura 1. Articulaciones de la muñeca: (1) radiocarpiana y (2) mediocarpiana.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2. Movimientos de la muñeca. De izquierda a derecha y de arriba abajo: aducción, abducción, flexión y extensión</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Movimiento de circunducción de la muñeca.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4. Ángulos de flexión-extensión frente ángulos de abducción-aducción en movimientos de circunducción de la muñeca.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Continuo de la virtualidad de Milgram y Kishino (1994).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Paciente de un traumatismo craneoencefálico caminando dentro de un EV proporcionado por un sistema de proyección en el Walter Reed National Military Medical Center de Estados Unidos.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7. (a) Aspecto del EV y (b) feedback positivo al finalizar la tarea.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. (a) Presentación del dispositivo mientras un sujeto realiza la tarea asignada, (b) vista superior del joystick y (c) vista lateral del joystick</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Prototipo por impresión 3D del joystick.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 10. Visión general del nivel 1 (a) y del nivel 2 (b).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11. Captura de pantalla del juego.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 12. Representación gráfica de la posición del paciente respecto de los ángulos umbral. (a) El siguiente movimiento puede realizarse y (b) movimiento en proceso.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 13. Previsualización de los seis juegos disponibles en la plataforma InMotion®. 32</i>	
<i>Figura 14. (a) Prototipo desarrollado por el MIT, (b) InMotion® de BIONIK Laboratories Corp, (c) Prototipo del RiceWrist, (d) Ejes de movimiento del RiceWrist, (e) Módulo MAHI OpenWrist combinado con el exoesqueleto de mano ReNeu Maestro, (f) Ejes de movimiento del MAHI OpenWrist</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15. Módulo robótico del M3Rob para rehabilitación motora de muñeca.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 16. Esquema de las especificaciones comunes para la futura colección de serious games de M3Rob.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 17. Diagrama de secuencia de la interacción entre la HMI y el MG aplicado a StarWrist.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18. Etapas del diseño del entorno de realidad virtual.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19. Los dos prototipos de serious games descartados: (a) juego de cocinar hamburguesas "CookingWrist" y (b) juego del laberinto "MazeWrist".....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 20. GameObjects que conforman el juego, recogidos en la hierarchy.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 21. Pantalla mostrada por el objeto LoadingGameUI durante el periodo de carga del juego.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22. Pantalla de instrucciones mostrada por el objeto GameRulesUI una vez que el juego se ha cargado.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23. Pantalla de cuenta atrás gestionada por el objeto GameStartCountdownUI. 57</i>	

<i>Figura 24. Juego en marcha, en el que se puede observar la barra de tiempo y el marcador de puntuación</i>	<i>58</i>
<i>Figura 25. Captura de pantalla del juego en la que se muestra la flecha de ayuda</i>	<i>58</i>
<i>Figura 26. Mensaje de felicitación tras haber atravesado un anillo.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 27. Pantalla de finalización de la partida.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 28. Usuario jugando a StarWrist utilizando como control los movimientos de su muñeca izquierda.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 29. HMI de M3Rob, desde la que se lanza StarWrist y se configuran sus parámetros iniciales.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 1. Diez principios de la neurociencia sobre la plasticidad neuronal.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2. Los 15 principios de neurorrehabilitación y sus descripciones</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3. ROM de referencia de la muñeca recogidos por Schünke et al</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4. Modos de juego disponibles.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Parámetros de inicio comunes a todos los juegos.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6. Posibles estados del serious game.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7. Principios de la neurorrehabilitación seleccionados para el diseño del entorno virtual.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 8. Parámetros de inicio de partida y sus valores por defecto</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9. Componentes de la UI del juego, agrupados en el objeto Canvas.....</i>	<i>55</i>

1. Introducción

1.1 Daño Cerebral Adquirido

El Daño Cerebral Adquirido (DCA) es una patología caracterizada por una lesión repentina de las estructuras encefálicas cuyo origen no es hereditario, congénito, degenerativo ni perinatal [1]. Su causa más común es el ictus [2], una lesión caracterizada por la aparición aguda de un déficit neurológico focal derivado de una alteración en la circulación del sistema nervioso central [3]. Gran parte de los pacientes de DCA sufren de secuelas motoras, siendo una de las más comunes la hemiparesia o pérdida de fuerza muscular del lado contralateral a la lesión cerebral [4]. Estas secuelas motoras tienen un gran impacto negativo sobre la independencia del paciente, especialmente si involucran la marcha o los movimientos de la mano y muñeca, esenciales en el día a día. La recuperación de dichas funciones motoras perdidas se fundamenta en la neurorrehabilitación, un proceso asistencial basado en el entrenamiento repetitivo de actividades que fomentan la neuroplasticidad.

1.2 Robótica y realidad virtual en neurorrehabilitación

Gracias a las ventajas que ofrecen, la robótica y la realidad virtual (VR, del inglés *Virtual Reality*) han sido unos de los avances tecnológicos que más interés han despertado en el campo de la neurorrehabilitación en los últimos años [5]. Por un lado, la robótica permite la realización de sesiones de terapia repetitivas, orientadas a la ejecución de tareas específicas y bajo condiciones controladas. Además, permite evaluar de forma objetiva la evolución del paciente a través del registro de los movimientos y rendimiento del paciente. Por otro lado, las tecnologías de VR, a través de los *serious* y *exergames*, suponen un entretenimiento y motivación extra para el paciente, disminuyen su frustración y aumentan su concentración. La combinación de ambas tecnologías ha demostrado contribuir de forma notable en la reducción de las discapacidades motoras de personas que han sufrido un DCA.

1.3 Objetivo del Trabajo de Fin de Grado

El objetivo del presente trabajo es doble. Por un lado, se busca definir el conjunto de requisitos que debe cumplir un entorno virtual (EV) concebido para la rehabilitación funcional de la muñeca en pacientes de DCA para poder ser incorporado en la plataforma M3Rob del Instituto de Tecnologías Avanzadas de la Producción (ITAP) de la Universidad de Valladolid. Por otro lado, se busca diseñar y desarrollar un primer prototipo de EV siguiendo las especificaciones establecidas anteriormente.

2. Daño cerebral adquirido

2.1 Introducción

La patología del DCA engloba toda lesión de las estructuras encefálicas cuyo origen no sea hereditario, congénito, degenerativo ni perinatal [1] y que tenga lugar de forma repentina. Se caracteriza por desencadenar en el paciente un conjunto de secuelas dependiente del área del encéfalo lesionada y la gravedad del daño [6].

2.2 Etiología y epidemiología

La última *Encuesta de Discapacidad, Autonomía Personal y Situaciones de Dependencia* publicada en 2022 por el Instituto Nacional de Estadística [2] nombra al ictus como principal causa del DCA. Por un lado, el 84% de los casos en España son producidos por este trastorno de la circulación; el porcentaje restante, por otro lado, está asociado a causas como traumatismos craneoencefálicos, tumores cerebrales, anoxias o infecciones.

Se trata de una enfermedad con una alta prevalencia: actualmente en nuestro país, más de 435 400 personas sufren de DCA y 104 701 nuevos casos son notificados al año [2].

2.3 Secuelas motoras

Una vez superada la fase aguda de un ictus, un traumatismo craneoencefálico o cualquier otra lesión englobada en el concepto de DCA, es muy habitual que el paciente presente algún tipo de secuela asociada al control motor. El control motor, entendido como el proceso por el cual el sistema nervioso central produce movimientos corporales coordinados e intencionados, puede ser afectado tras un DCA de tres formas distintas [7]:

- 1) Por una lesión del sistema piramidal
- 2) Por una lesión de los ganglios basales, el cerebelo y sus vías asociadas
- 3) Afectación indirecta en el control motor por lesión del sistema vestibular o visual.

Cuando tiene lugar una lesión del sistema piramidal, el paciente presenta una serie de signos negativos y positivos conocidos en su conjunto como la enfermedad de la motoneurona superior. Entre los signos negativos se encuentran la paresia o debilidad muscular, la plejía o pérdida de la función motora, la pérdida de destreza, la pérdida de control de movimiento selectivo, la fatiga, el deterioro de la planificación motora y el deterioro del control motor. Por otro lado, entre los signos positivos se encuentran la hiperreflexia y la espasticidad muscular [7] [4].

En el caso de los pacientes de ictus, la secuela motora más común es la hemiparesia [4], consistente en la pérdida de fuerza muscular del lado contralateral a la lesión cerebral. Concretamente, la hemiparesia afecta la movilidad de las extremidades superiores de aproximadamente dos tercios de los supervivientes de ictus europeos [8]. Más precisamente, la Sociedad Industrial Internacional de Tecnología Avanzada en Rehabilitación (IISART) expone que 1 de cada 2 supervivientes de ictus desarrollará algún tipo de discapacidad motora en manos y muñecas [9]. La hemiparesia también se suele acompañar de los siguientes factores: lentitud en la realización de movimientos, comienzo rápido de fatiga, excesiva sensación de esfuerzo y la dificultad para producir fuerza de forma eficaz en el contexto de una tarea. La hemiparesia y todos estos factores fueron unificados por Patten et al. [10] bajo el nombre de “debilidad post-ictus”.

Las secuelas motoras tienen un gran impacto negativo sobre la independencia del paciente. Al verse limitados en la realización de actividades, incluidas las más cotidianas, los pacientes suelen depender en gran medida de la asistencia de otras personas. A su vez, dicha dependencia cataliza la aparición de trastornos emocionales y de la conducta tales como la depresión o la anhedonia [11]. La recuperación de las capacidades perdidas se vuelve, por tanto, un elemento esencial en su tratamiento.

2.4 Rehabilitación, neurorehabilitación y neuroplasticidad

La rehabilitación o rehabilitación funcional es la recuperación de funciones perdidas, disminuidas o deterioradas por agresiones internas o externas al cuerpo humano. Consiste en el reentrenamiento basado en la repetición de actividades que facilitan los procesos de neuroplasticidad, reforzando de manera positiva una o más tareas e inhibiendo otras [5] [12].

La neurorehabilitación es un proceso asistencial complejo dirigido a restituir, minimizar o compensar en lo posible los déficits funcionales aparecidos en la persona afectada por una discapacidad grave, como consecuencia de una lesión del sistema nervioso central [13]. Al igual que la rehabilitación convencional, la neurorehabilitación está basada en el entrenamiento repetitivo de actividades que fomenten la neuroplasticidad. En los últimos años, avances científicos y tecnológicos como los fármacos, los injertos celulares, la robótica, la realidad virtual y la estimulación magnética transcraneal han despertado un gran interés entre los especialistas de la neurorehabilitación [5].

La neuroplasticidad o plasticidad neuronal se define como la capacidad que tiene el tejido nervioso para cambiar y adaptarse a los estímulos que le rodean, implicando cambios fisiológicos y estructurales en el cerebro como resultado de la interacción del organismo con el medio externo. Como resultado de la experiencia, las neuronas son capaces de reorganizar sus conexiones sinápticas y modificar su

comportamiento [5], resultando en una reestructuración de la organización cortical. Cuando un paciente con secuelas motoras se somete a un entrenamiento repetitivo que involucra un movimiento determinado, el cerebro experimenta cambios neuronales que refuerzan el circuito neuronal dañado o establecen circuitos alternativos; cuando este entrenamiento tiene lugar de forma constante y prolongada, dichos cambios pueden llegar a consolidarse. La neuroplasticidad es máxima durante el desarrollo cerebral en la etapa prenatal y durante la infancia, fenómeno que explica por qué las lesiones que se producen en edades tempranas presentan habitualmente una mayor recuperación que cuando tienen lugar en la edad adulta [14].

2.5 Factores de recuperación en el paciente neurológico

Los factores que determinan la recuperación de un paciente neurológico están íntimamente ligados al concepto de plasticidad neuronal. En las últimas dos décadas, son numerosos los autores que se han dedicado a describirlos de forma exhaustiva. A continuación, se detallan los 10 principios de la neurociencia sobre la plasticidad neuronal descritos por Kleim y Jones (Tabla 1, [15]), cruciales en la recuperación de pacientes sometidos a neurorrehabilitación:

- **Pérdida de función por falta de entrenamiento:** los circuitos neuronales que no se involucran de forma activa en la realización de una tarea durante un periodo prolongado de tiempo comienzan a degradarse.
- **Mejora de la función por entrenamiento:** un entrenamiento prolongado puede inducir plasticidad dentro de regiones cerebrales específicas, tanto en personas sanas como en pacientes que hayan sufrido una lesión a nivel cerebral.
- **Especificidad:** las distintas formas de neuroplasticidad y cambios asociados al comportamiento dependen de experiencias de naturalezas específicas.
- **Repetitividad:** realizar repeticiones puede ser necesario para inducir un cambio duradero en los circuitos neuronales que permita al paciente mantener (e incluso mejorar) la función recuperada una vez finalizada la terapia.
- **Intensidad:** la intensidad de los entrenamientos y estimulaciones puede afectar la inducción de la neuroplasticidad. En rehabilitación motora, el número de sinapsis en el córtex motor se ve incrementado con la intensidad de la terapia. A pesar de ello, ejercicios de alta intensidad podrían suponer un sobreentrenamiento contraproducente que empeore la función.

- **Duración:** el fenómeno de la neuroplasticidad puede entenderse como una compleja cascada de eventos de naturaleza diversa (expresión de neurotransmisores, uniones intercelulares, neurogénesis, etc.). La aparición de estos eventos ocurre en momentos temporales distintos; por ello, la naturaleza y relevancia de los mismos en el proceso de rehabilitación depende del instante en el que se estudie.
- **Relevancia:** para que un paciente integre una función nueva (o en proceso de recuperación) el entrenamiento debe ser lo suficientemente motivante y exigente, de forma que desencadene el fenómeno de neuroplasticidad.
- **Edad:** debido a la atrofia neuronal y sináptica que caracteriza el envejecimiento cerebral normal, la capacidad de neuroplasticidad dependiente de entrenamiento se ve reducida con la edad.
- **Transferencia:** la inducción de plasticidad dentro de un conjunto de circuitos neuronales puede promover la plasticidad simultánea o sucesiva en circuitos asociados a otras funciones.
- **Interferencia:** al contrario que la transferencia, la neuroplasticidad asociada al entrenamiento de una función puede interferir de forma negativa en la inducción de neuroplasticidad en otras áreas, impidiendo la adquisición de otras habilidades.

En 2019, Maier et al. [16] propusieron una lista de 15 principios de la neurorrehabilitación a partir del análisis de 17 artículos sobre juegos de VR para rehabilitación motora de pacientes de ictus (Tabla 2). Según los autores, los siguientes principios constituyen los componentes de una rehabilitación efectiva en este tipo de pacientes:

- **Práctica repetitiva:** el uso prolongado y repetido del miembro afectado mediante la realización de movimientos que requieren cierto grado de habilidad o destreza (*skilled movements*) desencadena cambios localizados en el área cerebral correspondiente.
- **Práctica espaciada:** la implementación de periodos de descanso de una duración adecuada entre repeticiones y sesiones de terapia mejora el rendimiento del paciente.
- **Dosis:** dosis elevadas inducen cambios en la neuroplasticidad, reorganización de los circuitos neuronales, mejoran la excitabilidad cortical y mejoran las funciones motoras. La dosis puede ser medida a través del número de horas dedicadas a terapia, la frecuencia de las sesiones o la

duración de las mismas. Cabe destacar que la dosis correcta para cada tipo de terapia y cada una de las fases post-ictus está aún por determinar.

- **Tarea específica:** las condiciones en las que tiene lugar el entrenamiento deben ser lo más similares posible a las condiciones reales en las que se van a poner en práctica los movimientos. La forma más común de abordar este principio es a través del entrenamiento de movimientos involucrados en actividades cotidianas.
- **Práctica variable:** introducir variación en las sesiones de rehabilitación se asocia a una mejor retención y generalización, a pesar de dificultar el desempeño inicial del paciente. La variabilidad puede introducirse, o bien variando ciertos elementos dentro de una secuencia de entrenamiento constante, o bien presentando de forma aleatoria distintas secuencias de entrenamiento.
- **Dificultad creciente:** adaptar las dificultad del entrenamiento a las capacidades del paciente conlleva mejores resultados que cuando la dificultad del mismo es constante. El punto óptimo de aprendizaje tiene lugar cuando la dificultad dependiente de las habilidades del paciente permite un equilibrio entre el rendimiento del paciente y las exigencias del procesamiento de la información.
- **Estimulación multisensorial:** implementar dos o más tipos de feedback sensorial puede mejorar la habilidad de detectar, discriminar y reconocer información sensorial. Aplicada al entrenamiento de movimientos, la estimulación multisensorial puede ayudar al establecimiento de contingencias sensoriomotoras.
- **Feedback explícito:** mostrar de forma explícita información relativa al rendimiento del paciente tiene un efecto importante en el reaprendizaje de funciones motoras. Por un lado, penalizar al paciente puede acelerar el proceso, mientras que, por otro lado, un refuerzo positivo asegura una retención a largo plazo de lo aprendido. El feedback explícito puede mostrarse tanto de forma visual como auditiva.
- **Feedback implícito:** la retroalimentación implícita del desempeño en la ejecución de los movimientos permite mejorar el aprendizaje de los mismos a través de la corrección de errores de predicción sensoriomotora. El feedback implícito puede ofrecerse de forma visual, auditiva o háptica.
- **Uso del miembro parético:** la terapia debe involucrar la movilización del miembro afectado y la restricción del sano. De lo contrario, el paciente tenderá a utilizar el segundo de forma predominante.

- **Representación de avatar:** la observación de la acción realizada durante la terapia a través de la representación virtual del paciente o parte de él promueve la recuperación de las funciones motoras perdidas. En el caso de las terapias pasivas, la simulación por pantalla de movimientos ficticios puede estimular la recuperación del miembro parético.
- **Práctica con objetivo:** los movimientos que se realizan con un objetivo desencadenan una mayor actividad en las áreas sensoriomotoras del cerebro, lo que se traduce en una mejora en el aprendizaje motor. Esto se debe a que una práctica de este tipo requiere, por un lado, de movimientos complejos en los que se involucran varios músculos y, por otro lado, de una atención focalizada en el efecto de los movimientos y no en los movimientos en sí mismos.
- **Movimiento marcado rítmicamente:** el uso de señalización auditiva de ritmos presenta efectos beneficiosos en la recuperación de funciones motoras. Ante estos estímulos, el paciente sincroniza sus movimientos con secuencias rítmicas, incrementando la actividad neuronal del área motora del cerebro y del cerebelo. Como resultado, el cerebro genera una representación mental del ritmo que permite la anticipación de movimientos motores.
- **Práctica mental del movimiento:** la práctica mental de los movimientos ha demostrado ser una herramienta beneficiosa en la recuperación de pacientes con una discapacidad motora severa.
- **Interacción social:** el efecto de la interacción con otras personas en el desempeño de los pacientes es un elemento poco estudiado en el campo de la neurorrehabilitación. A pesar de ello, se ha demostrado que la interacción social hace que pacientes de ictus se involucren más en las actividades requeridas.

En un metaanálisis realizado posteriormente por Doumas et al. [17], los autores analizaron el impacto que tienen los 11 primeros principios propuestos en [16] en la eficacia de juegos de VR diseñados específicamente para rehabilitación motora de las extremidades superiores en pacientes que han sufrido un ictus. Tras evaluar hasta 42 ensayos, incluyendo un total de 1760 participantes, llegaron a la conclusión de que, independientemente de la plataforma tecnológica utilizada, implementar 8 o más de estos principios mejora la eficacia de los juegos serios en el proceso de rehabilitación.

Tabla 1. Diez principios de la neurociencia sobre la plasticidad neuronal [18, 15]

Principio	Descripción
Pérdida de función por falta de entrenamiento	Si una función cerebral específica no se entrena, esta se degrada y puede llegar a perderse
Mejora de la función por entrenamiento	El entrenamiento de una función cerebral específica puede conllevar una mejora de esta
Especificidad	La naturaleza del entrenamiento dictamina la naturaleza de la plasticidad
Repetitividad	La inducción de plasticidad requiere de suficientes repeticiones
Intensidad	La inducción de plasticidad requiere de suficiente intensidad de entrenamiento
Duración	Diferentes formas de plasticidad ocurren a distintos tiempos
Relevancia	El entrenamiento debe ser lo suficientemente importante/relevante como para inducir plasticidad
Edad	La plasticidad inducida por entrenamiento ocurre más fácilmente en pacientes jóvenes
Transferencia	La plasticidad inducida por un entrenamiento concreto puede mejorar la adquisición de otras habilidades
Interferencia	La plasticidad inducida por un entrenamiento concreto puede interferir en la adquisición de otras habilidades

Tabla 2. Los 15 principios de neurorrehabilitación y sus descripciones [16]

Principio de neurorrehabilitación	Descripción del principio
Práctica repetitiva*	Uso prolongado y repetitivo del miembro afectado
Práctica espaciada*	Entrenamiento estructurado en tiempo con descansos entre repeticiones o sesiones
Dosis*	Sesiones de entrenamiento de larga duración y con frecuencia elevada
Tarea específica*	Entrenamiento de movimientos asociados con actividades cotidianas
Práctica variable*	Entrenamiento con tareas variables
Dificultad creciente*	Incremento de la dificultad dependiendo del estado y evolución del paciente
Estimulación multisensorial*	Entorno que ofrece dos o más tipos de feedback sensorial
Feedback explícito*	Retroalimentación explícita del desempeño del paciente
Feedback implícito*	Retroalimentación implícita del desempeño del paciente durante la realización de la tarea
Uso del miembro parético*	Entrenamiento con tareas que exijan la movilización del miembro afectado
Representación de avatar*	Representación del paciente o de parte de él en la interfaz gráfica
Práctica con objetivo	Realización de tareas que tengan un objetivo
Movimiento marcado rítmicamente	Uso de señales auditivas para sincronizar los movimientos con patrones rítmicos
Práctica mental del movimiento	El paciente simula en su mente los movimientos a realizar
Interacción social	Presencia de interacciones sociales durante la rehabilitación

(Nota: los asteriscos hacen referencia a los principios evaluados por Doumas et al. [17]).

3. La articulación de la muñeca

3.1 Introducción

La muñeca es uno de los elementos con mayor complejidad estructural y de movimiento del aparato locomotor humano. Por un lado, su delimitación anatómica es ambigua y depende de la bibliografía que se consulte. Por ello, es importante definir, en primer lugar, qué quiere decir la palabra muñeca cuando es mencionada en el presente trabajo. Por otro lado, es esencial determinar los grados de libertad (DOF, del inglés *Degrees Of Freedom*) y el rango de movimiento (ROM, del inglés *Range Of Motion*) que permite dicha articulación, para así poder establecer los movimientos a realizar durante la terapia. Con estos dos objetivos se lleva a cabo, a continuación, un estudio anatómico y biomecánico de la misma.

3.2 Estudio anatómico

Algunos autores como Drake et al. [19] plantean que la articulación de la muñeca es aquella que se establece entre el radio, el disco articular del extremo distal del cúbito, y los huesos escafoides, semilunar y piramidal. Es decir, para estos autores la muñeca se corresponde únicamente con la articulación radiocarpiana. Sin embargo, muchos otros extienden esta definición y consideran que la articulación de la muñeca se compone a su vez de las articulaciones radiocarpiana y mediocarpiana [20] [21] [22], siendo esta última aquella en la que se articulan los huesos de las filas proximal y distal del carpo [23]. Puesto que ambas articulaciones participan de forma conjunta en los movimientos de la mano, de aquí en adelante se considerará como muñeca al conjunto articulación radiocarpiana-articulación mediocarpiana (Figura 1).

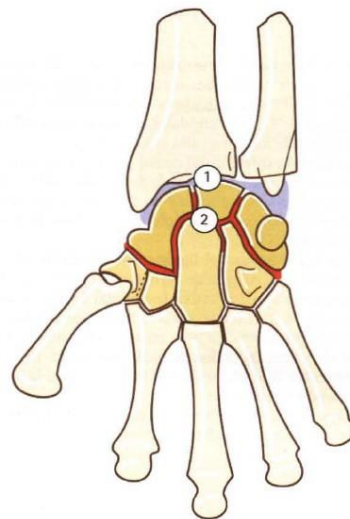


Figura 1. Articulaciones de la muñeca: (1) radiocarpiana y (2) mediocarpiana [24].

Todas las articulaciones de la muñeca son de tipo sinovial y, en conjunto, se comportan como una sinovial de tipo elipsoidea. Este tipo de articulaciones se caracteriza anatómicamente por presentar una superficie cóncava y otra convexa, ambas de forma ovalada y que encajan la una en la otra. Por un lado, la articulación radiocarpiana sí que es estrictamente elipsoidea; por otro lado, la articulación mediocarpiana, a pesar de estar compuesta de dos articulaciones, una de tipo artrodia y otra de tipo elipsoidea, se comporta también como una elipsoidea.

3.3 Estudio biomecánico

Las articulaciones de tipo elipsoidea poseen dos DOF, permitiendo así el movimiento en dos planos. En el caso de la muñeca, los movimientos permitidos son los siguientes: aducción y abducción en el plano frontal y flexión y extensión en el plano sagital, todos ellos representados en la Figura 2. La combinación de movimientos en ambos planos hace también posible la realización de complejos movimientos de circunducción (Figura 3).

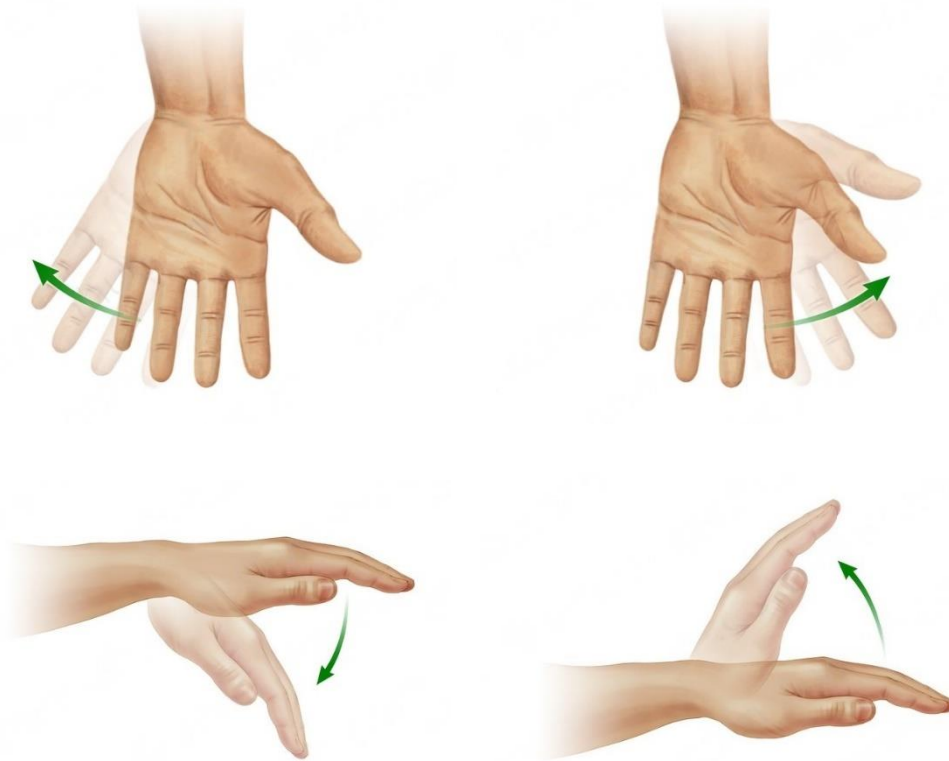


Figura 2. Movimientos de la muñeca. De izquierda a derecha y de arriba abajo: aducción, abducción, flexión y extensión [25].

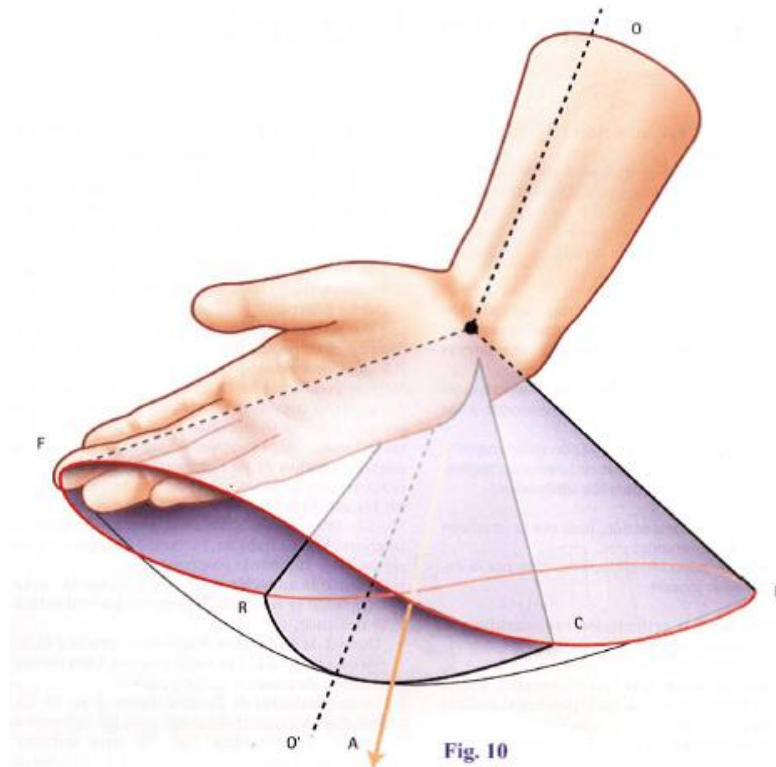


Figura 3. Movimiento de circunducción de la muñeca [24].

El ROM de una articulación es la amplitud de movimiento, expresada en grados, que presenta desde la posición anatómica hasta el límite extremo del movimiento del segmento en una dirección determinada [22]. Los ROM de la muñeca, al igual que los de cualquier otra articulación, varían ligeramente de una persona a otra, pero se han establecido valores medios de referencia para la población general sana. Por supuesto, cuando existe una patología que restringe los movimientos de la muñeca, los ROM correspondientes se ven reducidos.

Todo movimiento articular tiene asociado dos ROM, uno activo y otro pasivo. Por un lado, el ROM activo es aquel que resulta únicamente del uso de los músculos propios del paciente, mientras que el ROM pasivo es aquel que se consigue tras la aplicación de una fuerza externa. En el caso de los movimientos de aducción y abducción de la muñeca, sus respectivos ROM activos y pasivos son coincidentes [24]. En la Tabla 3 se exponen los ROM activos de la muñeca recogidos por Schünke et al. [26].

Otro aspecto a tener en cuenta es que la amplitud de los movimientos de la muñeca se ve modificada cuando estos tienen lugar de forma combinada debido a la tensión que presentan los ligamentos involucrados. Por un lado, la amplitud de la aducción y la abducción se reduce cuando se dan movimientos de flexión y extensión

Tabla 3. ROM de referencia de la muñeca recogidos por Schünke et al. [26]

Movimiento	ROM (°)
Flexión	60-80
Extensión	40-60
Abducción	20
Aducción	30-40

y, al contrario, la amplitud de estos últimos se ve reducida cuando la muñeca se encuentra aducida o abducida. Por ello, el movimiento de circunducción resultante tiene el aspecto ovoide representado en la Figura 4. Por otro lado, la amplitud de los cuatro movimientos se ve influenciada también por movimientos externos a la muñeca, como son la pronación y supinación del antebrazo [24] y los movimientos de apertura y cierre de la mano.

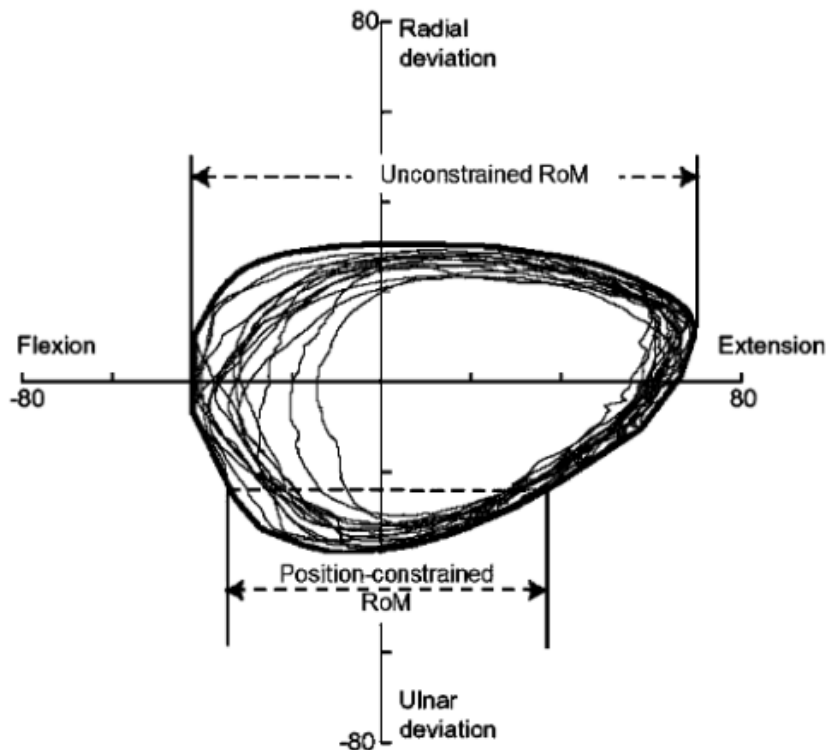


Figura 4. Ángulos de flexión-extensión frente ángulos de abducción-aducción en movimientos de circunducción de la muñeca [27].

4. Entornos virtuales y robótica en rehabilitación de muñeca

4.1 Realidad extendida

La realidad extendida (XR, del inglés *Extended Reality*) es el concepto que engloba de forma genérica todas las tecnologías inmersivas, incluidas la VR y la realidad aumentada (AR, del inglés *Augmented Reality*). Es importante destacar que el abanico de tecnologías de XR no se entiende como algo discreto, sino como algo verdaderamente continuo y difícil de delimitar. Milgram y Kishino representaron por primera vez todas ellas en una escala que denominaron “continuo de la virtualidad”, que va desde lo completamente real, la realidad, hasta lo completamente virtual, la “virtualidad” (Figura 5). Todo el espectro de tecnologías comprendidas entre ambos extremos recibe el nombre de realidad mixta (MR, del inglés *Mixed Reality*), caracterizadas por la combinación de elementos de los mundos real y virtual.



Figura 5. Continuo de la virtualidad de Milgram y Kishino (1994) [28]

4.2 Realidad virtual en neurorrehabilitación motora

Debido a su novedad, sus múltiples formas de presentarse y su continua expansión, el concepto de VR no cuenta con una única definición. Sintetizando varias de las disponibles en la bibliografía actual [29] [30] [31], se podría decir que la VR consiste en la simulación por ordenador de entornos completamente virtuales de carácter inmersivo que se asemejan de un modo u otro al mundo real y con los que el usuario puede interactuar.

La información presentada al usuario a través de los entornos no reales o entornos virtuales (EV) puede ser de distinta naturaleza, siendo la más habitual la información visual-auditiva. De la misma forma, el hardware utilizado para presentar dicha información puede ser muy variado; por ejemplo, la información visual suele ser proporcionada a través de cascos de realidad virtual (HMD, del inglés *Head-Mounted Display*), sistemas de proyección (Figura 6) o pantallas convencionales [29].



Figura 6. Paciente de un traumatismo craneoencefálico caminando dentro de un EV proporcionado por un sistema de proyección en el Walter Reed National Military Medical Center de Estados Unidos [32].

En los últimos años, el uso de la VR ha experimentado un notable desarrollo y crecimiento en todo tipo de sectores. La neurorrehabilitación, como no podía ser de otra manera, también ha buscado valerse de esta tecnología, y lo hace a través de los *serious* y los *exergames*.

Los *serious games*, juegos cuyos objetivos principales son la educación o la rehabilitación [17], plantean una serie de ventajas frente a los métodos de rehabilitación convencional. Primero, suponen un entretenimiento y motivación extra en el paciente, haciendo que se involucre de forma activa y que, por tanto, deje de pensar en su limitación. Las condiciones de juego, al ser personalizables, disminuyen la frustración y se adaptan a las necesidades exactas del paciente. Además, la configurabilidad del nivel de dificultad permite fomentar la atención y la recuperación motora más eficiente. Por último, la posibilidad de inmersión que ofrecen los *serious games* también está valorado de forma positiva. En pacientes que han sufrido un ictus, todos estos factores favorecen, en última instancia, la reorganización de las vías neuromotoras, contribuyendo así en la reducción de las discapacidades motoras. Adicionalmente, el registro del rendimiento del paciente incorporado en muchas de estas tecnologías permite evaluar la evolución de dichos paciente a lo largo de todo el proceso de rehabilitación [29] [33] [34]. En cuanto a su eficacia frente a los métodos de rehabilitación convencionales, se ha demostrado que los *serious games*, independientemente de su uso combinado con dispositivos

robóticos, ofrece mejores resultados en pacientes con discapacidad motora en las extremidades superiores tras haber sufrido un ictus [17].

Los *exergames* son juegos que resultan de la combinación de ejercicio y juegos digitales, los cuales requieren de la acción de regiones grandes del cuerpo como son el tronco, las piernas o los brazos, quedando excluidos los movimientos de los dedos o las muñecas. Dependiendo de su diseño, estos juegos pueden ser utilizados con distintos fines, como puede ser la mejora de la resistencia cardiorrespiratoria o la mejora del control sensoriomotor [35], y sus ventajas son similares a las de los *serious games*. Sin embargo, debido a que están limitados a movimientos de regiones grandes del cuerpo, los *exergames* no tienen apenas relevancia en la rehabilitación de movimientos finos como los que realiza la mano o la muñeca.

El carácter inmersivo de los *serious* y *exergames*, entendido este como el grado en que estos consiguen trasladar las sensaciones del usuario al mundo virtual [29], depende de muchos factores tales como la naturaleza del hardware utilizado, su calidad, el tipo de interacción hombre-máquina (HCI) o el propio diseño del EV. Como se acaba de mencionar, la posibilidad de inmersión que ofrecen estas tecnologías es un aspecto muy positivo. De hecho, existe evidencia científica que indica que una mayor sensación de presencia puede conllevar una respuesta emocional más profunda, un aumento en la motivación y, en algunos casos, un aumento del rendimiento [36]. Sin embargo, exponerse a un sistema altamente inmersivo como son los HMD también conlleva ciertos problemas como son la fatiga ocular, la somnolencia, la desorientación o los dolores de cabeza [29], problemas que no deben ser ignorados y que pueden jugar un papel muy importante especialmente en el campo de la neurorrehabilitación. Por ello, en ocasiones es más recomendable utilizar sistemas menos inmersivos visualmente, como son los monitores de ordenador, e incrementar el grado de inmersión mediante otros métodos como la implementación de feedback háptico y auditivo.

4.3 Realidad aumentada en neurorrehabilitación motora

La tecnología de AR está basada en la superposición de elementos digitales, como gráficos, texto o sonido, con el entorno real del usuario. Esto se consigue a través de dispositivos que incorporan cámaras u otros sensores, como teléfonos inteligentes, tabletas, gafas especiales o sistemas de proyección [37]. La AR también permite la implementación de *serious* y *exergames* en la neurorrehabilitación y, aunque comparte muchas de las características que ofrece la VR, también presenta algunas ventajas frente a esta tecnología. Por ejemplo, al combinarse los entornos real y virtual, el entrenamiento realizado por el paciente durante las sesiones de rehabilitación puede tomar un carácter más realista, de forma que la transferencia de las habilidades adquiridas a las tareas cotidianas sea mucho más fácil y fluida.

4.4 Entornos virtuales para neurorehabilitación de muñeca

Las tecnologías de XR pueden emplearse para la rehabilitación motora de numerosas regiones anatómicas del aparato locomotor, entre las que se encuentra la muñeca. Esta articulación de elevada complejidad anatómica y biomecánica posee un papel esencial en los movimientos asociados a tareas cotidianas, como son comer, vestirse, escribir o manipular casi cualquier tipo de objeto. Por esta razón, el desarrollo de tecnologías de rehabilitación, entre las que se encuentra la VR, es esencial para asegurar una recuperación acelerada cuando esta se vea dañada.

Hasta hace unos pocos años, era difícil encontrar dispositivos y EV cuyo objetivo fuese exclusivamente el entrenamiento de la muñeca. La mayoría de estos combinaban los movimientos de la muñeca con otros tales como la pronación y supinación del antebrazo o los múltiples movimientos de la mano. Sin embargo, recientemente se han desarrollado gran cantidad de EV en los que los movimientos de la muñeca son trabajados de forma específica. A continuación, se describen a modo ilustrativo algunos de los EV desarrollados en los últimos años específicamente para neurorehabilitación de muñeca en supervivientes de ictus.

En [38], Nath et al. diseñaron un *serious game* (Figura 7.a) en el cual, a través de una pantalla de ordenador y haciendo uso del joystick *Logitech Extreme 3d Pro* como interfaz motora entre el usuario y el EV, el paciente debe desplazar un coche por un recorrido en tres dimensiones mientras evita colisionar con obstáculos (Figura 8). El objetivo del juego es alcanzar una posición objetivo en un tiempo límite. El joystick permite únicamente un desplazamiento de $\pm 5^\circ$ en cada plano de movimiento. El movimiento de *yaw* del joystick desplaza el coche hacia delante y hacia atrás, correspondiéndose con los movimientos de aducción y abducción de la muñeca respectivamente; el movimiento de *pitch* desplaza el coche hacia la izquierda y hacia la derecha correspondiéndose con los movimientos de flexión y extensión de la muñeca respectivamente. Estas tareas se presentan en siete niveles distintos, cada uno caracterizado por unos tipos de recorrido, un número determinado de obstáculos, un tiempo límite diferente y, en los últimos dos niveles, la implementación de tareas cognitivas. Mientras que los niveles más fáciles tienen recorridos con un único camino, los más complicados tienen recorridos laberínticos, en cuyo caso los pacientes disponen como ayuda de la visión cenital del laberinto. El feedback del rendimiento del paciente en las tareas se presenta de dos formas distintas. Por un lado, colisionar con algún obstáculo se traduce en una señal auditiva que notifica al paciente del error. Por otro lado, al final de la partida el EV ofrece al paciente un mensaje cuyo objetivo es motivar al paciente (Figura 7.b). En su artículo, Nath et al. también proponen una serie de métricas de rendimiento y las evalúa tanto en pacientes de ictus crónico como en controles. Estas métricas son: tiempo en completar la tarea, error relativo, suavidad de la trayectoria y gráficos de trayectoria. Una de las limitaciones encontradas es el ROM restringido del joystick utilizado, el cual no se adapta al ROM de la muñeca.



Figura 7. (a) Aspecto del EV y (b) feedback positivo al finalizar la tarea [38].

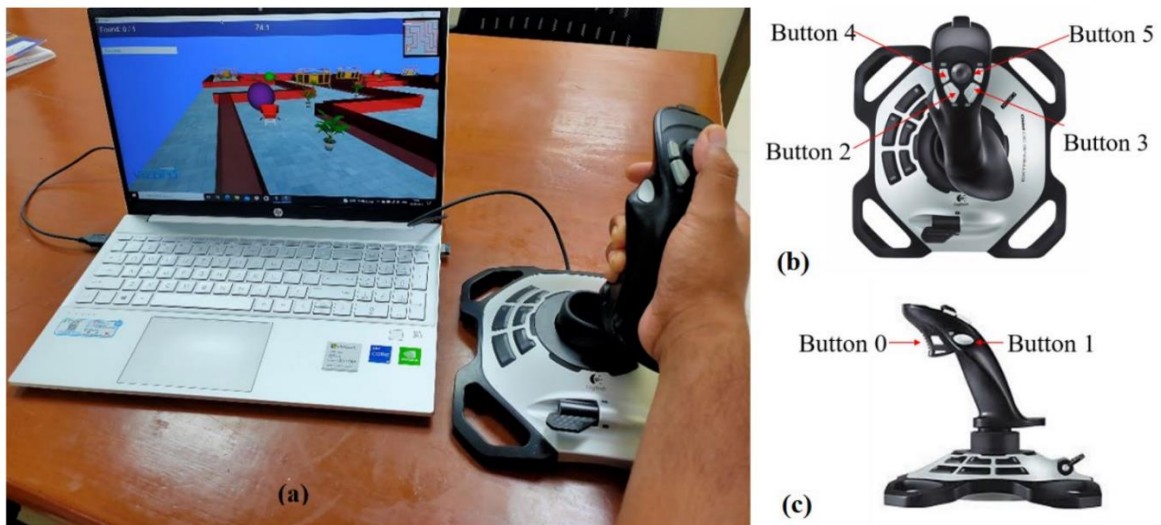


Figura 8. (a) Presentación del dispositivo mientras un sujeto realiza la tarea asignada, (b) vista superior del joystick y (c) vista lateral del joystick [38].

Farasyfa et al. [39] desarrollaron un EV en tres dimensiones, de carácter inmersivo y controlado con un joystick de 2 DOF. La información visual se transmite al paciente a través de unos casos de VR. Inspirado en el juego *The Roller Ball* desarrollado previamente para el tratamiento del Síndrome del túnel carpiano [40], el paciente debe desplazar una pelota por un circuito evitando tocar los obstáculos y caer al vacío e intentando tocar todos los objetivos. Mediante el uso del joystick, el paciente puede desplazar la bola hacia delante (aducción), hacia atrás (abducción), hacia la derecha (extensión o flexión si se utiliza la mano derecha o izquierda respectivamente) y hacia la izquierda (flexión o extensión si se utiliza la mano derecha o izquierda respectivamente) (Figura 9). El juego consta de dos niveles. El nivel 1, representado en la Figura 10.a, se constituye de un recorrido simple delimitado por paredes a los dos lados que impiden que la bola caiga al vacío, y una pequeña curva con una ligera caída. Pasada la curva, el circuito se vuelve recto, pero esta vez el paciente debe esquivar una serie de obstáculos equiespaciados y colocados

en zigzag. Durante todo el recorrido, hay presente un total de 5 cubos que deben ser tocados por la bola. Sólo cuando el paciente consigue tocar los 5, este pasa al siguiente nivel. El nivel 2, representado en la Figura 10.b, se caracteriza por una mayor dificultad y requiere de mayor atención y esfuerzo. El recorrido es más complejo, con subidas y bajadas y sin paredes a los lados que impidan caer al vacío, por lo que el paciente debe realizar movimientos más precisos y estables. El sistema también registra la actividad electromiográfica a través de una banda que se coloca en el antebrazo del paciente. Este registro es utilizado por los investigadores como métrica de evaluación del paciente. Los autores consideran que la falta de impedancia del joystick hace que el movimiento sea difícil de controlar, por lo que proponen implementar un control de impedancia que permita una recuperación más rápida y efectiva.

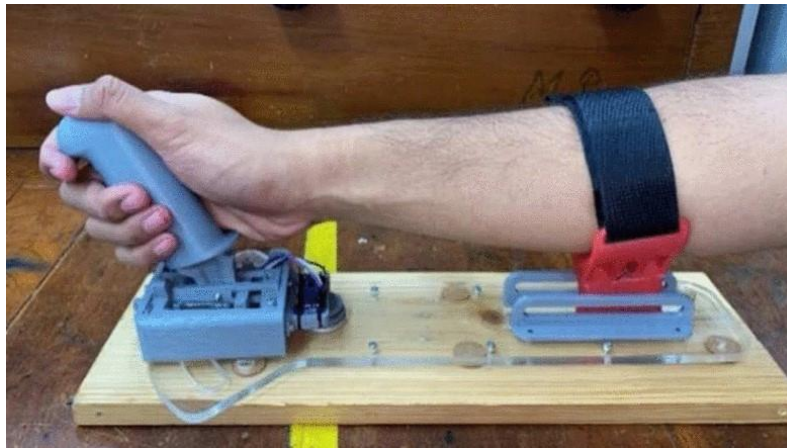


Figura 9. Prototipo por impresión 3D del joystick

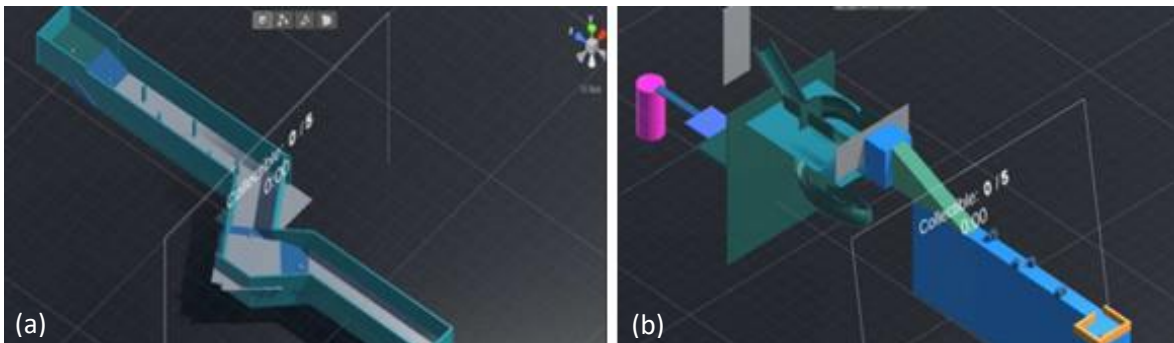


Figura 10. Visión general del nivel 1 (a) y del nivel 2 (b)

Lamprecht et al. [41] también desarrollaron un *serious game* que permite la rehabilitación de muñeca en pacientes que, tras haber sufrido un ictus, han

desarrollado discapacidad motora en la muñeca. A través de una pantalla de ordenador, el usuario se sumerge en un escenario en el que está representado un coche de policía que se desplaza a una velocidad constante por una carretera (Figura 11). Mediante el uso de un robot háptico, el usuario desplaza de izquierda a derecha dicho coche mientras intenta esquivar al resto. Para ello, debe rotar su muñeca desde una posición neutral hasta alcanzar un ángulo umbral determinado. Un nivel se considera superado cuando el paciente consigue evitar todas las colisiones en un tiempo determinado. La interfaz de usuario (UI) representa de forma gráfica la posición de la muñeca del paciente frente a la posición neutral y los ángulos umbral (Figura 12): por un lado, las líneas rojas son estacionarias y representan los ángulos umbral; por otro lado, la línea verde se desplaza con los movimientos de la muñeca, volviéndose amarilla cuando un movimiento ha comenzado y aún no ha acabado.



Figura 11. Captura de pantalla del juego

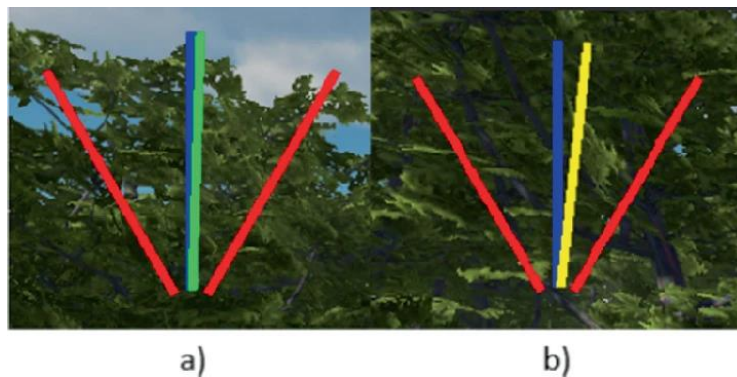


Figura 12. Representación gráfica de la posición del paciente respecto de los ángulos umbral. (a) El siguiente movimiento puede realizarse y (b) movimiento en proceso

Los parámetros de configuración de partida de este juego son: número de carriles, ángulo umbral a la izquierda, ángulo umbral a la derecha, ángulo de

posición neutral, velocidad del coche, distancia entre obstáculos y duración de la terapia. Este serious game no incorpora niveles de dificultad predeterminados, lo que permite al rehabilitador adaptar de forma personalizada las condiciones de juego. El EV también incorpora feedback háptico, a través del cual se puede dificultar o favorecer el movimiento del paciente, dependiendo del tipo de terapia y el grado de afectación motora que presente. Dependiendo de la configuración del robot, este permite tres modos de juego distintos: flexión-extensión, abducción-aducción y pronación-supinación.

Las diversas plataformas software que se han expuesto hasta ahora han sido desarrollados de la mano de grupos de investigación universitarios y, por el momento, no han llegado a ser comercializados. Sin embargo, en los últimos años también han aparecido EV específicos con este mismo propósito en el mundo de la industria. Por ejemplo, el software que incorporan los dispositivos InMotion® WRIST e InMotion® ARM/HAND de la empresa norteamericana BIONIK Laboratories Corp. incluye varios *serious games* para el entrenamiento de la muñeca, brazo y mano, todos ellos con representación gráfica en 2 dimensiones (Figura 13).

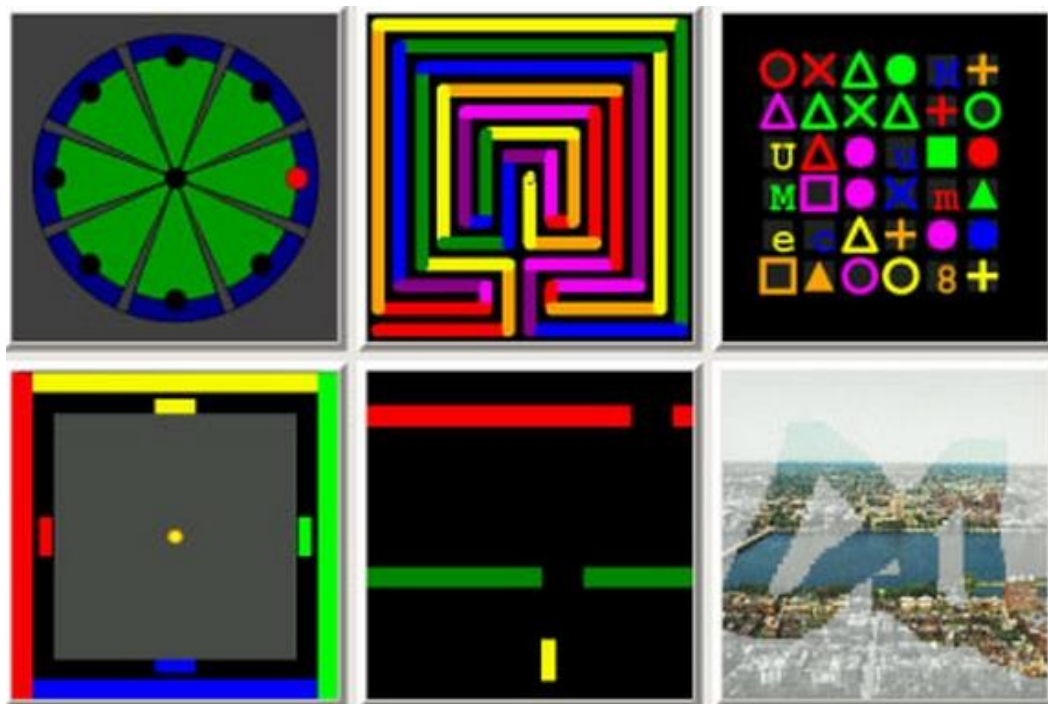


Figura 13. Previsualización de los seis juegos disponibles en la plataforma InMotion® [42]

4.5 Robots para rehabilitación de muñeca

El uso de robótica en la neurorrehabilitación aparece con el objetivo de resolver ciertos problemas asociados a la rehabilitación tradicional. Por un lado, la rehabilitación tradicional o manual requiere de mucha dedicación y tiempo por parte de los rehabilitadores y fisioterapeutas, pues son ellos los que controlan que los movimientos se realicen de forma correcta. Se trata de un proceso repetitivo e intenso, y muchas veces aburrido, pues no entretiene al paciente. A todo esto, se suma el hecho de que no ofrece ningún método objetivo para evaluar o registrar la evolución del paciente, sino que, por el contrario, depende absolutamente del criterio del profesional [43]. Por otro lado, la neurorrehabilitación robótica busca solucionar estos problemas, permitiendo:

- Sesiones de terapia intensas, repetitivas y de mayor duración, ajustadas a las capacidades actuales del paciente.
- Una planificación más eficiente.
- El planteamiento de terapias orientadas a la ejecución de tareas específicas (*task-oriented therapy*) y con un alto grado de variabilidad.
- Registrar los movimientos y el rendimiento del paciente a lo largo de todas las sesiones, de forma que se pueda evaluar de forma completamente objetiva su evolución y la posible adaptación de las terapias.
- Una mayor versatilidad a la hora de proporcionar feedback al paciente.
- Un enfoque mucho más entretenido y motivante para el paciente si se combina con el uso de tecnologías XR.

En 2020, Hussain et al. recogieron en [43] un total de 18 robots diseñados específicamente para rehabilitación de muñeca, de los cuales se presentan dos en este trabajo con el fin de ilustrar algunos de los enfoques de diseño más relevantes. El primero de ellos, desarrollado por el *Newman Laboratory for Biomechanics and Human Rehabilitation* del *Massachusetts Institute of Technology* (Figura 14.a) [44], es un robot de tipo *end-effector* que posteriormente ha sido comercializado durante algunos años por la empresa BIONIK Laboratories Corp. Se trata, en efecto, del dispositivo InMotion® WRIST mencionado en el apartado anterior (Figura 14.b), un robot que ofrece 3 DOF, correspondientes a los movimientos de pronación-supinación del antebrazo, flexión-supinación y abducción-aducción de la muñeca, y que cuenta con un sistema de accionamiento basado en servomotores. Este robot, al igual que el resto de la compañía, asiste en los movimientos del paciente para ayudarle a completar distintas terapias de rehabilitación, al mismo tiempo que registra su actividad motora [45]. A día de hoy, el modelo InMotion® WRIST ha

dejado de ser comercializado por la empresa a pesar de seguir siendo utilizado en las clínicas de rehabilitación.

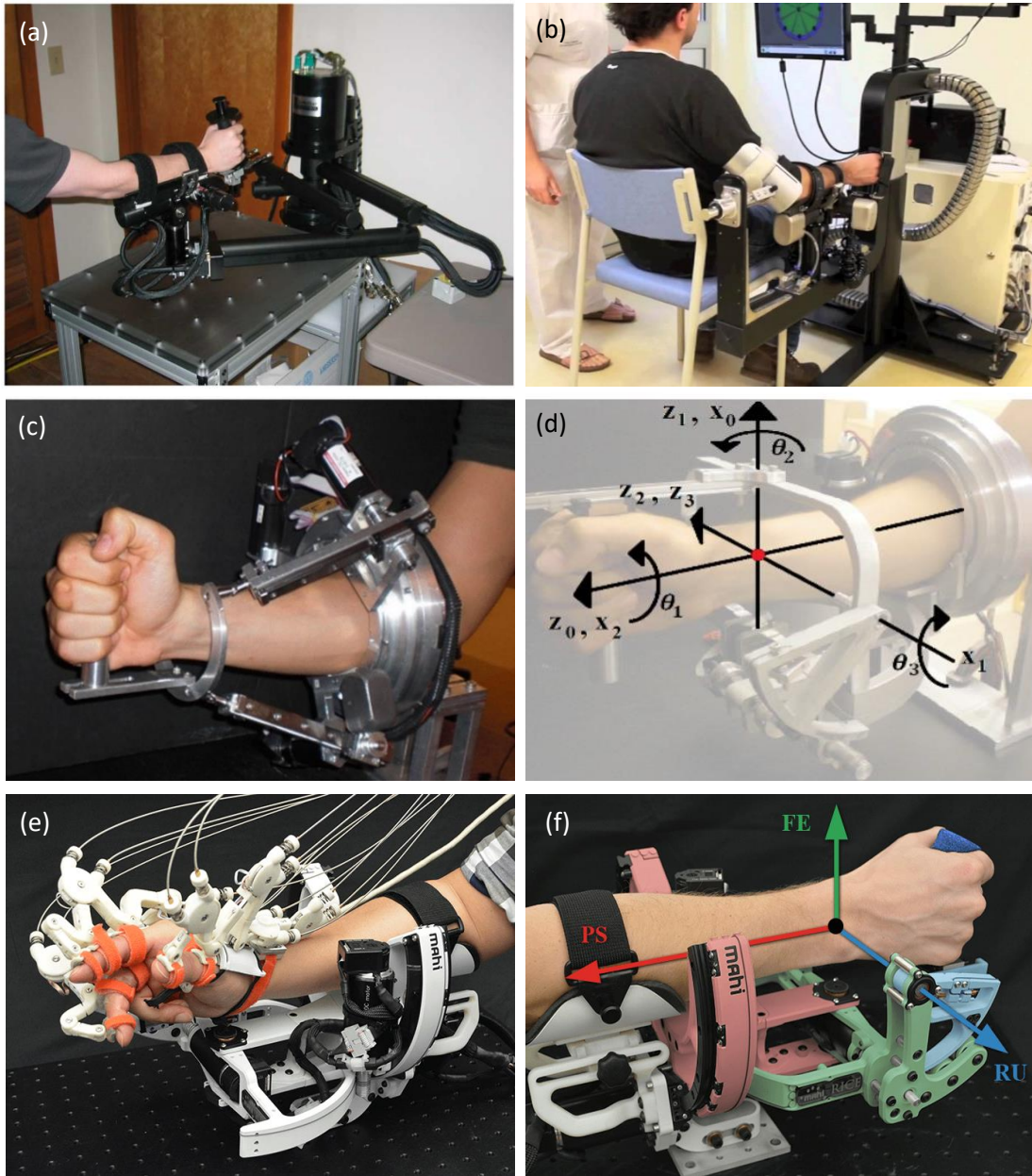


Figura 14. (a) Prototipo desarrollado por el MIT [44], (b) InMotion® de BIONIK Laboratories Corp [42], (c) Prototipo del RiceWrist [46], (d) Ejes de movimiento del RiceWrist [47], (e) Módulo MAHI OpenWrist combinado con el exoesqueleto de mano ReNeu Maestro [49], (f) Ejes de movimiento del MAHI OpenWrist [49].

El segundo, desarrollado por el MAHI Lab de la Universidad de Rice y apodado RiceWrist (Figura 14.c) [46], es un robot de tipo exoesqueleto que, a través de 3

articulaciones rotatorias permite el movimiento en 3 DOF correspondientes a los mismos movimientos que el anterior (Figura 14.d) [47]. De forma adicional, una articulación prismática extra asegura el correcto alineamiento de los ejes anatómicos con los del robot [43]. En este caso, los movimientos de muñeca son accionados por un sistema de motores eléctricos rotativos de alto par y el movimiento del antebrazo es accionado mediante un motor de corriente continua sin escobillas y con accionamiento directo [43] [48]. En 2017, el mismo laboratorio refinó el diseño de este dispositivo presentando *MAHI OpenWrist* [49], un dispositivo que introduce ciertas mejoras tanto a nivel estético como funcional. Entre ellas, *MAHI OpenWrist* permite su uso combinado con el módulo *ReNeu Maestro*, lo que hace posible la rehabilitación combinada de mano y muñeca (Figura 14.e y Figura 14.f).

El proyecto M3Rob (del español “Mente-Mano-Muñeca”) (Figura 15) propone una plataforma robótica para la neurorrehabilitación motora de mano y muñeca y la recuperación de funciones cognitivas perdidas tras sufrir un ictus. Se trata de un proyecto actualmente en desarrollo y ejecutado de forma conjunta por el Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción (ITAP) y el Grupo de Ingeniería Biomédica (GIB), ambos de la Universidad de Valladolid. M3Rob representa la continuación de su anterior trabajo *RobHand*, un exoesqueleto cuyo objetivo era la recuperación de la función motora de la mano. El robot de M3Rob incorpora un nuevo módulo de muñeca compatible con el módulo *RobHand* y nuevos sensores electroencefalográficos y de fuerza. El módulo de muñeca ofrece 3 DOF gracias a 3 articulaciones rotatorias accionadas cada una por un motor DC con escobillas. Los movimientos de pronación-supinación del antebrazo, y los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción de la muñeca tienen unos ROM de 180° , 135° y 110° respectivamente [50].



Figura 15. Módulo robótico del M3Rob para rehabilitación motora de muñeca.

4.6 Modalidades de entrenamiento en rehabilitación robótica

La mayor parte de los dispositivos robóticos utilizados en ensayos clínicos o en la práctica clínica ofrecen cuatro modalidades de entrenamiento: activo, activo-asistido, pasivo y resistivo [51]. En el entrenamiento activo, el paciente ejecuta los movimientos sin ningún tipo de ayuda externa; en el entrenamiento activo-asistido, el sistema robótico ayuda en cierta medida al paciente a realizar los movimientos solicitados; en el entrenamiento pasivo, no se requiere movimiento por parte del paciente, sino que es el robot el que mueve su extremidad o extremidades, y se suele realizar en aquellos cuya movilidad está muy reducida o es inexistente; por último, el entrenamiento resistivo exige un esfuerzo extra por parte del paciente a la hora de realizar los movimientos, pues el robot ejerce una resistencia externa en contra de ellos.

5. Materiales y métodos

5.1 Herramientas y materiales utilizados

La plataforma escogida para el diseño del entorno virtual fue Unity, motor de videojuegos desarrollado por Unity Technologies y uno de los más extendidos en la industria. Concretamente, la versión utilizada de su editor fue la 2021.3.9f1.

Para poder diseñar la lógica que da jugabilidad al entorno se hizo uso de Visual Studio 2022, entorno de desarrollo integrado (IDE) desarrollado por Microsoft. Toda la lógica fue programada en el lenguaje de programación multiparadigma C#.

Algunos de los recursos gráficos utilizados fueron tomados de la Unity Asset Store. En total fueron utilizados tres paquetes, de los cuales se tomaron los siguientes elementos:

1. Modelo 3D de la nave espacial, perteneciente al paquete *UAV Trident* [52].
2. Modelo 2D del anillo de puntuación, perteneciente al *paquete Vast Outer Space* [53].
3. Modelo 3D de un asteroide, perteneciente al paquete *Vast Outer Space* [53].
4. Modelo 3D de un planeta, perteneciente al paquete *Vast Outer Space* [53].
5. Gráficos del espacio exterior, perteneciente al paquete *SpaceSkies Free* [54].

Adicionalmente, las herramientas y fuentes tipográficas escogidas para el diseño de la UI fueron tomadas del paquete *Textmesh Pro*. El resto de los elementos gráficos son de creación propia y su diseño viene especificado en apartados posteriores.

El ecosistema tecnológico en el que se incluye el presente trabajo es el proyecto M3Rob, una de las plataformas robóticas descritas en el apartado 4.5 y que está compuesta esencialmente de los siguientes elementos: el robot, un ordenador de sobremesa, dos monitores, el motor gráfico (MG) y la Interfaz Hombre-Máquina (HMI).

Los motores de búsqueda utilizados tanto durante el proceso de ideación del entorno de realidad virtual como a lo largo de todo el proyecto fueron los siguientes: PubMed, IEEE Xplore, ResearchGate y Scopus. Para administrar las fuentes bibliográficas consultadas se hizo uso del gestor Zotero.

5.2 Requisitos de integración en la plataforma M3Rob

En la primera fase del proyecto se logró establecer una serie de requisitos o especificaciones comunes para todos los *serious games* de rehabilitación de muñeca que quieran ser integrados en la plataforma M3Rob (Figura 16).

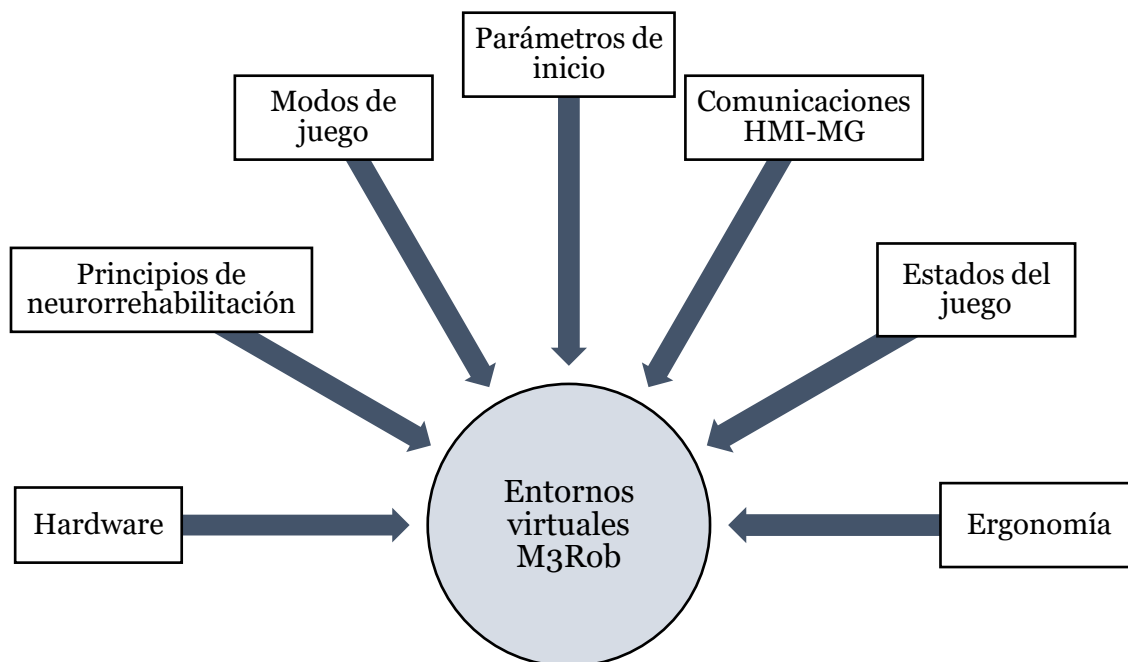


Figura 16. Esquema de las especificaciones comunes para la futura colección de serious games de M3Rob.

Primer requisito: Hardware visual-auditivo utilizado

Para facilitar su implementación en el entorno de terapias desarrollado por los investigadores del ITAP, la información visual-auditiva de los EV será presentada a través de un monitor convencional y un sistema de altavoces conectado al ordenador.

Segundo requisito: Maximización del número de principios de la neurorrehabilitación implementados

Basándose en la conclusión extraída por Doumas et al. [17] y descrita en el apartado 2.5, los juegos deberán implementar, como mínimo, 8 de los 11 primeros principios de la neurorrehabilitación enumerados en la Tabla 2.

Tercer requisito: Modos de juego

Los juegos deberán poder ofrecer los 3 modos recogidos en la Tabla 4, de forma que sea posible trabajar tanto de forma individual y como conjuntamente los distintos movimientos de la muñeca. El movimiento de pronación-supinación del antebrazo queda excluido del diseño.

Tabla 4. Modos de juego disponibles

Modo de juego	Descripción
<i>FE Only</i>	Involucra exclusivamente movimientos de flexión y extensión
<i>UR Only</i>	Involucra exclusivamente movimientos de abducción y aducción
<i>FE & UR</i>	Involucra movimientos combinados o de circunducción

Además, el juego debe poder adaptarse a cualquiera de las modalidades de entrenamiento descritas en el apartado 4.6.

Cuarto requisito: Parámetros de inicio comunes

Al inicializarse, los juegos deberán recibir, como mínimo, los parámetros recogidos en la Tabla 5:

Tabla 5. Parámetros de inicio comunes a todos los juegos

Parámetro	Unidades	Posibles valores	Tipo de dato
Miembro parético	-	Muñeca derecha, muñeca izquierda	Float32
Duración de la terapia	s	> 0	Float32
Modo de juego	-	FE Only, UR Only, FE & UR	Float32
Ángulo máximo UR	deg	(0, 20] °	Float32
Ángulo mínimo UR	deg	[-35, 0) °	Float32
Ángulo máximo FE	deg	< 75 °	Float32
Ángulo mínimo FE	deg	> -45 °	Float32

- **Miembro parético:** determina la muñeca que se va a rehabilitar (muñeca derecha o izquierda). El valor de este parámetro deberá ser indicado atendiendo a los códigos de instrucciones comunes a toda la plataforma M3Rob. La correcta definición de este parámetro es importante, pues el signo de los ángulos de flexión-extensión viene determinado por la extremidad que se esté entrenando.

- **Duración de la terapia:** determina la duración en segundos de la partida. Al final del tiempo indicado, el juego terminará y deberá volver a ser lanzado por el rehabilitador si este desea que la terapia continúe.
- **Modo de juego:** determina cuál de los modos recogidos en la Tabla 4 se selecciona. Los valores que puede tomar son adimensionales y, de nuevo, deberán ser indicados atendiendo a los códigos de instrucciones comunes a toda la plataforma M3Rob.
- **Ángulo máximo FE y Ángulo mínimo FE:** sus valores vienen expresados en grados, y equivalen a las amplitudes máxima y mínima del movimiento de flexión-extensión que van a ser exigidas al paciente durante la terapia.
- **Ángulo máximo UR y Ángulo mínimo UR:** de nuevo sus valores vienen expresados en grados, y equivalen a las amplitudes máxima y mínima del movimiento de abducción-aducción que van a ser exigidas al paciente durante la terapia.

A mayores, los juegos deben recibir uno o varios parámetros de inicio específicos que permitan la modulación de la dificultad del mismo, tales como la velocidad de actuación o la especificación de un nivel de dificultad determinado.

Quinto requisito: Comunicaciones HMI-MG

El intercambio de información entre el HMI y el MG (Figura 17) se deberá realizar mediante sockets siguiendo el Protocolo de Control de la Transmisión (TCP, del inglés Transmission Control Protocol). Para ello, el proyecto de Unity deberá incorporar un objeto específico encargado de recibir y enviar información al HMI. Una vez lanzado el ejecutable, el HMI deberá enviar al MG los parámetros de inicio y una señal de START que dé comienzo a la partida. Durante esta, deberá existir un intercambio constante de información: por un lado, la HMI enviará al MG información relativa a la posición del robot; por otro lado, el MG enviará al MG información asociada a los movimientos que debería realizar el paciente para completar de forma óptima la tarea asignada. Además, el MG deberá enviar al HMI información relativa al rendimiento del paciente al final de cada partida. Por último, el MG recibirá un mensaje de KILL para finalizar el juego.

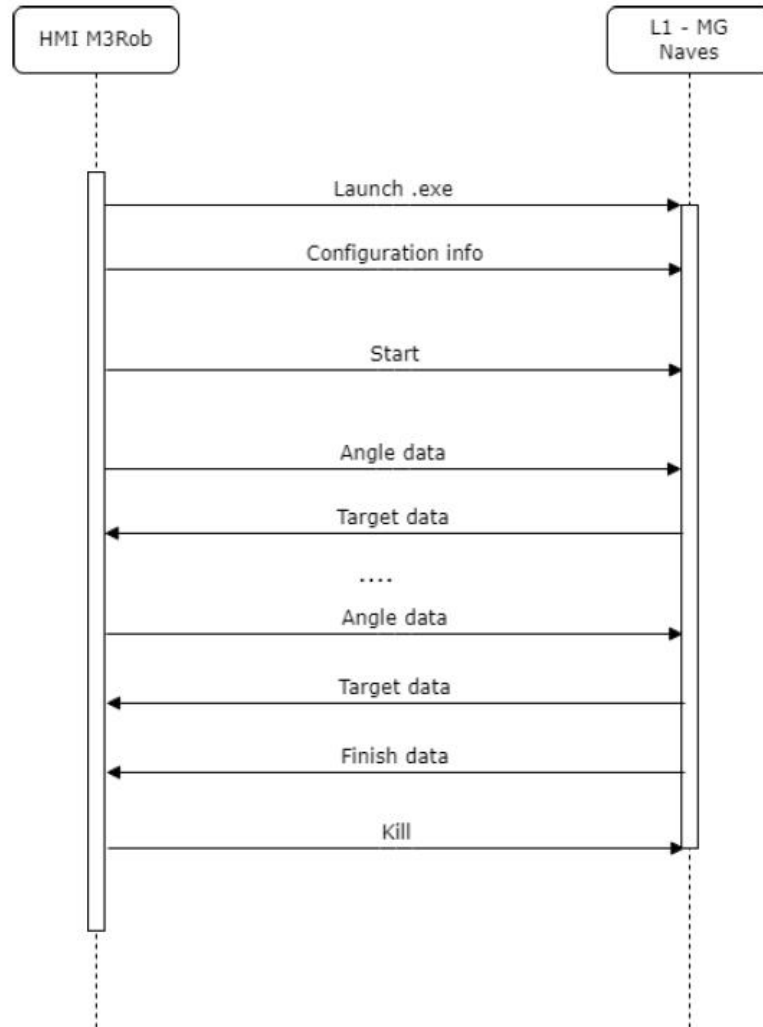


Figura 17. Diagrama de secuencia de la interacción entre la HMI y el MG aplicado a StarWrist.

Sexto requisito: Estados del juego

Los estados del juego establecen las distintas fases del juego, permitiendo determinar, por ejemplo, si el MG está esperando los parámetros de inicio, si deben mostrarse por pantalla las reglas del juego o si el juego está en curso. Para que exista una homogeneidad entre los distintos EV de la plataforma M3Rob, todos ellos deberán tener en su estructura interna los estados recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Posibles estados del serious game

Nombre del estado	Significado
WaitingToStart	El juego muestra un mensaje que indica que el juego se está cargando
GameRules	Se muestra por pantalla las reglas del juego
Transition	Pantalla de transición entre las reglas del juego y la cuenta atrás
CountdownToStart	Pantalla cuenta atrás de una duración de 5 segundos
GamePlaying	Pantalla de juego en curso
GameOver	Pantalla que indica que el juego ha finalizado

Séptimo requisito: Ergonomía

Como se expuso en el apartado 2.2, la etiología predominante del DCA es el ictus, una enfermedad que afecta mayoritariamente a personas de edad igual o superior a los 65 años; concretamente, el 67.6 % de los afectados en España presenta este perfil demográfico [55]. Por esta razón, el diseño de los EV deberá adaptarse a las limitaciones intelectuales y físicas de los mismos. Tomando como referencia los aspectos de ergonomía del diseño de juegos para este perfil demográfico establecidos en [56], a continuación se describen los requisitos de ergonomía del diseño que deben respetarse dentro de la plataforma M3Rob:

- **Relación de aspecto de la pantalla:** los juegos deberán utilizar una relación de aspecto estándar, como es la proporción 16:9.
- **Dimensiones de la pantalla:** la pantalla deberá ser de grandes dimensiones, maximizando así la visibilidad del contenido.
- **Localización de las reglas y marcadores de puntuación y tiempo restante:** estos elementos deberán situarse en el campo de visión del jugador y, por ello, no deberán colocarse en la parte inferior de la pantalla.
- **Nivel de detalle gráfico:** se deberán utilizar símbolos simples y claros, evitando imágenes demasiado detalladas que puedan distraer al usuario de lo verdaderamente esencial.

- **Contenido auditivo:** su implementación es altamente recomendable, aunque no obligatoria.
- **Tipos y tamaños de las fuentes tipográficas:** se deberá utilizar un conjunto homogéneo de fuentes tipográficas que sean fáciles de leer y de un tamaño superior a 13 puntos.
- **Contenido escrito:** para facilitar su lectura, las frases deberán ser cortas y concisas, y deberá existir un contraste adecuado entre el texto y el fondo.

5.3 Diseño del entorno de realidad virtual

Durante el proceso de diseño se logró establecer, de forma concreta, los siguientes aspectos: finalidad y características del juego, tipo de terapia buscada, selección e implementación de los principios de la neurorrehabilitación y aspectos relacionados con la ergonomía del diseño. El diagrama de flujo representado en la Figura 18 esquematiza las etapas seguidas durante dicho proceso:

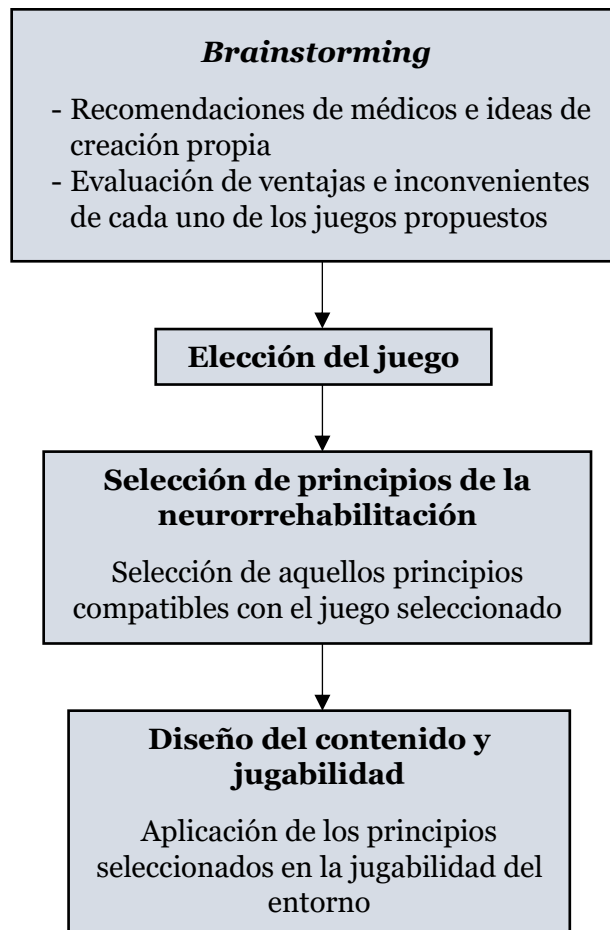


Figura 18. Etapas del diseño del entorno de realidad virtual.

5.3.1 Brainstorming y elección del juego

Los distintos posibles juegos fueron planteados por médicos de los centros hospitalarios con los que el grupo de Robótica Médica del ITAP trabaja de forma habitual, en particular la Unidad de Daño Cerebral del Centro Hospitalario Benito Menni y el Servicio de Rehabilitación del Hospital Clínico Universitario de Valladolid. Tras evaluar las distintas opciones y realizar varios prototipos (Figura 19) se decidió desarrollar un juego que consistiese en desplazar una nave espacial de izquierda a derecha y de arriba abajo a través de un entorno tridimensional mientras el paciente debe recoger objetivos y esquivar obstáculos. A este juego se le asignó posteriormente el nombre de *StarWrist*.

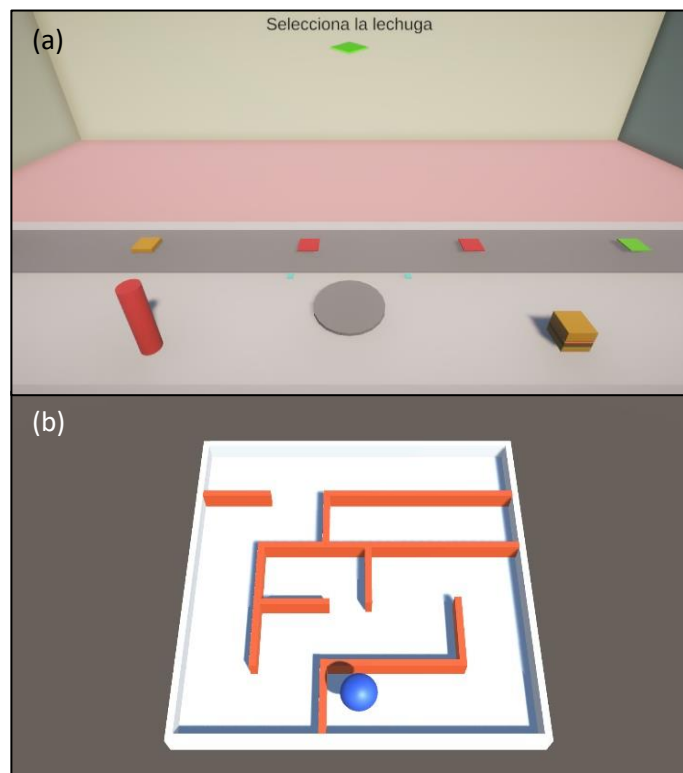


Figura 19. Los dos prototipos de serious games descartados: (a) juego de cocinar hamburguesas "CookingWrist" y (b) juego del laberinto "MazeWrist".

Las razones que llevaron a esta elección fueron varias. En primer lugar, se observó que los *serious games* existentes que involucraban el desplazamiento de un personaje, asociaban siempre el movimiento de aducción a la traslación del personaje hacia adelante. Esta traslación, en su mayoría necesariamente constante durante toda la partida, hace que el paciente no entrene de forma óptima la totalidad del ROM de los movimientos tanto de aducción-abducción como de flexión-extensión. Por un lado, al mantener la muñeca aducida de forma casi constante, el

paciente no entrena el movimiento de abducción. Por otro lado, el acoplamiento que existe entre ambos movimientos hace que el ROM del movimiento de flexión-extensión se vea disminuido. El concepto de movilidad que subyace a la idea de *StarWrist*, por el contrario, no exigiría el mantenimiento constante de un movimiento, pues la traslación hacia adelante se podría implementar de forma constante y automática, favoreciendo así el entrenamiento completo de la articulación. En segundo lugar, se trata de un juego que permite la fácil integración de gran cantidad de principios de neurorrehabilitación, tales como el incremento de la dificultad o la práctica repetitiva. En tercer y último lugar, a pesar de que en el presente trabajo sólo se busque implementar la terapia activa, *StarWrist* permitiría en un futuro la integración de las 4 modalidades de entrenamiento descritas en el apartado 4.6.

5.3.2 Selección de principios de la neurorrehabilitación

Durante esta etapa se buscó maximizar el número de principios de la neurorrehabilitación expuestos en la Tabla 2 que iban a ser implementados durante el diseño en el entorno virtual. Para ello, se seleccionaron aquellos que intervenían directamente en el proceso de diseño y que eran compatibles con *StarWrist* (Tabla 7).

Tabla 7. Principios de la neurorrehabilitación seleccionados para el diseño del entorno virtual

Principios de neurorrehabilitación
Práctica repetitiva
Dosis
Tarea específica
Práctica variable
Dificultad creciente
Estimulación multisensorial
Feedback explícito
Feedback implícito
Uso del miembro parético
Práctica con objetivo

El principio de “práctica espaciada” no fue considerado en este apartado porque no se trataba de un elemento estrictamente dependiente del diseño. Sería responsabilidad del rehabilitador o fisioterapeuta establecer los tiempos de juego y descanso de las sesiones de rehabilitación.

Los principios de “representación de avatar”, “movimiento marcado rítmicamente”, “práctica mental del movimiento” e “interacción social” fueron descartados por su incompatibilidad con el diseño del juego.

En definitiva, sólo en el diseño del juego intervinieron 10 principios de la neurorrehabilitación. A mayores, si durante su uso en rehabilitación se pautase una práctica espaciada, el número de principios implementados ascendería a 11, superando en 3 unidades el requisito establecido por Doumas et al. [17].

5.3.3 Diseño del contenido y jugabilidad

Una vez seleccionados los principios de la neurorrehabilitación compatibles con *StarWrist*, se procedió a establecer cómo iban a ser implementados cada uno de ellos en la jugabilidad del entorno. Durante este proceso, fue respetada la totalidad de los requisitos de ergonomía planteados en el apartado 5.2.

5.3.3.1 Práctica repetitiva

Para asegurar el uso prolongado y repetitivo de la muñeca afectada durante la sesión de entrenamiento, el programa generará una secuencia aleatoria de anillos (objetivos) y asteroides (obstáculos) dentro de un rango de movilidad indicado por el rehabilitador antes de iniciar el juego. El paciente deberá realizar movimientos de muñeca de forma repetitiva para conseguir atravesar el mayor número de objetivos y evitar colisionar con los obstáculos antes de que se acabe el tiempo.

5.3.3.2 Dosis

Para asegurar que las sesiones de entrenamiento puedan ser de larga duración sin tener que lanzar el juego repetidamente, los programas subyacentes al juego deberán estar preparados para poder ofrecer tiempos de juego elevados. De esta forma, la generación de objetivos y obstáculos será automática y totalmente independiente de la duración de la sesión seleccionada por el rehabilitador antes de iniciar el juego.

5.3.3.3 Tarea específica

Los movimientos de abducción-aducción, flexión-extensión y de circunducción, correspondientes a los movimientos necesarios para la realización de actividades cotidianas, serán los únicos controles del juego. Los movimientos de aducción-abducción de la muñeca controlarán la posición de la nave en el eje de las ordenadas,

y los movimientos de flexión-extensión de la muñeca controlarán la posición de la nave en el eje de las abscisas. El desplazamiento en el eje Z será automático y dependerá de la velocidad seleccionada por el rehabilitador antes de iniciar el juego. De esta forma, avanzar en el circuito no significará mantener la muñeca en constante aducción.

Cuando la muñeca se encuentre en posición inicial o de reposo, la localización de la nave espacial en el plano X-Y será (0, 0). Por un lado, el desplazamiento en el eje de las ordenadas será negativo si se realiza el movimiento de aducción y positivo si se realiza el movimiento de abducción. Por otro lado, el signo del desplazamiento en el eje de las abscisas dependerá de la muñeca utilizada, siendo negativo cuando la muñeca izquierda se extiende o la muñeca derecha se flexione, y positiva cuando la muñeca izquierda se flexione o la muñeca derecha se extienda.

5.3.3.4 *Práctica variable*

StarWrist permitirá tres modos de juego distintos, recogidos en la Tabla 4, de forma que la tarea no sea siempre la misma y, a mayores, se adapte a las necesidades específicas de cada paciente. La generación automática de objetivos y obstáculos se adaptará a cada uno de estos modos, de forma que sólo se generen en el espacio al que está restringido el movimiento. Adicionalmente, el rehabilitador podrá indicar si quiere o no que aparezcan obstáculos. Antes de iniciarse el juego, deberá seleccionar un valor entre 0 y 1 que representa la probabilidad de aparición de un obstáculo, siendo 0 la ausencia de obstáculos y 1 la presencia asegurada de un obstáculo por cada anillo generado.

La velocidad de desplazamiento de la nave, uno de los parámetros de inicio específicos de *StarWrist*, permitirá regular la sensación de velocidad de la nave espacial en el eje Z. Su valor, expresado en metros partido de segundos, no determina la dificultad del juego, puesto que esta vendrá determinada exclusivamente por el modo de juego, el tiempo entre objetivos y la proporción obstáculos/objetivos.

5.3.3.5 *Dificultad creciente*

La dificultad de la experiencia podrá ser modulada a través de los siguientes tres factores: el modo de juego, el tiempo entre objetivos y la proporción obstáculo/objetivo:

- **Modo de juego:** los modos de juego que involucran movimientos en un solo plano (modos *FE Only* y *UR Only*) son considerados de menor dificultad que el modo de juego en el que intervienen movimientos en ambos planos (modo *FE & UR*) debido a la mayor complejidad de estos.
- **Tiempo entre objetivos:** el rehabilitador podrá establecer el tiempo que tarda la nave en desplazarse entre objetivos consecutivos. Los parámetros de

inicio *Tiempo máximo* y *Tiempo mínimo* permitirán evolucionar el tiempo entre objetivos a lo largo de la sesión, de forma que este se vaya acortando y que la dificultad se incremente progresivamente.

- **Proporción obstáculos/objetivos:** aparte de añadir variabilidad al juego, la presencia de obstáculos también modula la dificultad de este. Un mayor número de obstáculos requiere de una mayor concentración por parte del paciente y la realización de movimientos más complejos.

Al igual que la velocidad de desplazamiento, estos factores se incorporarán al *serious game* como parámetros de inicio específicos de *StarWrist*.

5.3.3.6 Estimulación multisensorial

El entorno buscará estimular al paciente a través de estímulos visuales, auditivos y hápticos. A nivel visual, el diseño deberá ser lo más atractivo posible, con modelos realistas y tridimensionales de la nave, los objetivos y los obstáculos. A nivel auditivo, también se expondrá al usuario a una serie de elementos sonoros relacionados con su desempeño en el juego. La plataforma M3Rob permitirá, más adelante, la incorporación de estimulación háptica mediante la regulación de la impedancia del robot atendiendo a la posición de los objetivos y las trayectorias ideales.

5.3.3.7 Feedback explícito

El paciente tendrá a su disposición en todo momento un marcador con la puntuación asociada al número de objetivos que ha conseguido atravesar y una barra que represente el tiempo restante. El marcador se situará en la esquina superior izquierda y la barra de tiempo en la esquina superior derecha. Cada vez que atravesase un objetivo, la puntuación ascenderá en diez puntos; por el contrario, si el paciente no logra alcanzar un objetivo a tiempo o impacta contra un obstáculo, este no se verá penalizado. En caso de impactar contra un obstáculo, la nave espacial temblará ligeramente durante un tiempo menor a un segundo para ilustrar que el impacto ha alterado la estabilidad de la nave. Además, el MG presentará en la zona inferior de la pantalla un mensaje motivador cada vez que el paciente atravesase un objetivo y un mensaje sonoro de carácter alegre. El objetivo de todos estos elementos es mantener al paciente motivado durante toda la partida, un importante factor asociado a una mejor y más rápida recuperación neuromotora [57] [16].

De forma adicional, si la distancia en el plano X-Y entre la nave espacial y el siguiente objetivo es demasiado elevada, a modo de ayuda aparecerá en pantalla una flecha indicando hacia dónde se debe desplazar.

5.3.3.8 Feedback implícito

El feedback implícito o inherente viene dado, principalmente, por la correlación entre los movimientos que realiza el paciente con el robot y el desplazamiento de la nave espacial. Además, la HMI permite la opción de escalar los ángulos del paciente, haciendo que el desplazamiento visualizado sea mayor que el verdaderamente realizado y contribuyendo, de nuevo, a la motivación del paciente. El feedback háptico que podría incorporar *StarWrist* en un futuro también es considerado una forma de feedback inherente que ofrecería, de forma implícita, información relativa a la posición de los objetivos y trayectorias ideales.

5.3.3.9 Uso del miembro parético

StarWrist obligará en todo momento la movilización del miembro parético, adaptando su funcionamiento interno a la extremidad que se esté rehabilitando (izquierda o derecha).

5.3.3.10 Práctica con objetivo

El paciente deberá llegar al final del circuito habiendo conseguido el mayor número de puntos posible y habiendo evitado el impacto contra obstáculos, todo ello bajo las condiciones determinadas por el rehabilitador (duración de la terapia, rango de movimiento, modo de juego, velocidad de desplazamiento, tiempo entre objetivos y proporción obstáculos/objetivos).

5.4 Desarrollo del software en Unity

A continuación, se detallan los elementos desarrollados en el editor de Unity que implementan todas las funcionalidades descritas en apartados anteriores.

5.4.1 Elementos de la jerarquía (*hierarchy*)

La jerarquía o *hierarchy* recoge los elementos fundamentales que conforman el juego, conocidos como *GameObjects* u objetos, y los presenta en forma de lista (Figura 20). Aquellos objetos marcados con una flecha son denominados *Parent GameObjects* u “objetos padre”, que se comportan como carpetas albergando otros objetos denominados *Children GameObjects* u “objetos hijo”. Se trata de una forma muy útil de agrupar elementos cuyo objetivo es doble: por un lado, facilita la organización de la jerarquía para que esta sea lo más comprensible posible; por otro lado, permite asignar propiedades o componentes idénticas a un grupo de objetos hijo. Los siguientes apartados describen el contenido de los *GameObjects* de forma exhaustiva.

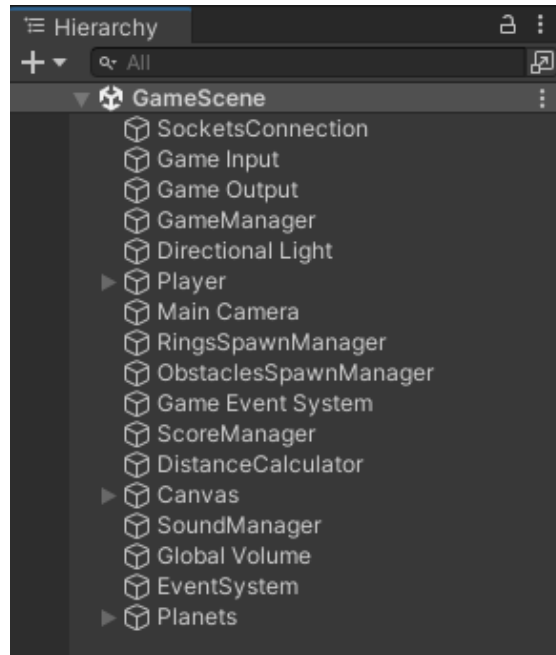


Figura 20. GameObjects que conforman el juego, recogidos en la hierarchy.

5.4.2 Game Manager

La finalidad de este objeto es gestionar los aspectos más esenciales juego: establecer la conexión HMI-MR y los estados del juego. En su script asociado se definen los distintos estados que puede tomar el juego, recogidos en la Tabla 6. El paso de *WaitingToStart* a *GameRules* ocurre cuando el objeto *Sockets Connection* recibe la señal START. La duración de los estados *GameRules*, *Transition* y *CountdownToStart* vienen determinados por unos contadores internos de 7, 2 y 5 segundos de duración respectivamente.

Aunque no se mencione de forma explícita en el resto de apartados, los estados y los cambios de estados son detectados por muchos de los objetos que componen el juego a través de suscripciones y funciones booleanas.

5.4.3 Sockets Connection

Cuando el juego es lanzado y tiene lugar la conexión MG-HMI ordenada por el *Game Manager*, comienza la recepción de mensajes que tiene lugar en el objeto *Sockets Connection*. Este objeto recibe en primer lugar, los valores indicados por el rehabilitador para los parámetros de inicio (Tabla 8) y, en caso de que haya olvidado configurar alguno de ellos, el programa usará unos valores por defecto. Una vez recibidos los parámetros de inicio, *Sockets Connection* espera un mensaje de START que, cuando es recibido, desencadena en el *Game Manager* el cambio de estado de *WaitingToStart* a *GameRules*.

5.4.4 Game Input

Trabaja de forma conjunta con el objeto *Sockets Connection* para gestionar la recepción periódica de la posición en ángulos del robot. Con el objetivo de manejar los posibles desfases o retrasos durante el envío o recepción de dicha información, *Game Input* hace uso de una cola o “queue”, una estructura que sigue el concepto de “First in, first out” (FIFO).

Tabla 8. Parámetros de inicio de partida y sus valores por defecto

Nombre del parámetro	Unidad	Valor por defecto	Nombre de la variable en la clase <i>SocketsConnection</i>
Extremidad	-	Mano derecha	TARGET_LIMB
Duración de la terapia	s	120	DURATION_OF_THERAPY
Ángulo máximo FE	deg	45	MAX_ANGLE_FE
Ángulo mínimo FE	deg	-45	MIN_ANGLE_FE
Ángulo máximo UR	deg	30	MAX_ANGLE_UR
Ángulo mínimo UR	deg	-15	MIN_ANGLE_UR
Modo de juego	-	FE & UR	RINGS_MAP
Velocidad de la terapia*	m/s	3	FORWARD_SPEED
Tiempo máximo entre targets*	s	10	MAX_TIME_CONSECUTIVE_TARGET
Tiempo mínimo entre targets*	s	5	MIN_TIME_CONSECUTIVE_TARGET
Cantidad de obstáculos*	-	1	NUMBER_OBSTACLES_NORMALIZED

(Nota: Los asteriscos hacen referencia a los parámetros de inicio específicos de *StarWrist*)

5.4.5 Player

El objeto *Player* engloba todo elemento relacionado con la nave espacial y su posición inicial es el origen del sistema de coordenadas. Este objeto de tipo *parent* contiene el modelo 3D de la nave espacial y presenta las siguientes componentes:

- *Script Player*
- *Rigidbody*
- Box Collider

La lógica (contenida en las componentes del objeto) fue separada de la representación gráfica de la nave con el objetivo de facilitar la modificación de esta última en posteriores actualizaciones del EV. Para entender mejor la función de este objeto, a continuación, se detallan cada uno de los elementos mencionados.

5.3.4.1 Modelo 3D de la nave espacial

La posición de este modelo 3D no varía respecto a la del objeto padre. Contiene una componente de tipo *Animator* que, junto con los scripts *StarshipAnimator* y *StarshipRotation*, controlan las animaciones de la nave espacial. Por un lado, el script *StarshipAnimator* desencadena una ligera vibración de esta cuando el paciente impacta con un asteroide. Por otro lado, el script *StarshipRotation* genera una ligera rotación de la nave espacial dependiente de la posición en los ejes X e Y con el objetivo final de incrementar el realismo del juego.

5.3.4.1 Script Player

En este script se encapsularon las funcionalidades de desplazamiento de la nave espacial y detección de objetivos y obstáculos, todas ellas descritas a continuación:

- **Desplazamiento de la nave espacial:** cada fotograma, el script registra la entrada de los ángulos enviados por la HMI y previamente procesados por *Sockets Connection* y *Game Input*. Aplica al vector entrada un escalado ángulo-distancias virtuales (una rotación de 4° del robot equivale a un desplazamiento de 1 metro en el EV), trunca aquellos ángulos que superan los límites establecidos y desplaza el objeto *Player* a la posición del plano X-Y indicada por el vector resultante. A mayores, lo desplaza en el eje Z a la velocidad indicada como parámetro inicial.
- **Detección de objetivos:** cuando el objeto *Player* atraviesa un anillo objetivo, activa el evento “TenPoints” al que están suscritos el gestor de puntuación *Score Manager* y el gestor de sonidos *Game Manager*. Esto desencadena un ascenso de 10 puntos en la puntuación total, un incremento unitario en el número de objetivos alcanzados y la reproducción un sonido de carácter alegre.
- **Detección de obstáculos:** cuando el objeto *Player* impacta contra un asteroide, el script contabiliza el número de obstáculos no evitados y activa el evento “AsteroidImpact”, al que están suscritos el script *StarshipAnimator*, desencadenando el efecto visual de vibración descrito anteriormente.

5.4.6 RingsSpawnManager

La finalidad de este objeto es la generación aleatoria y automática de instancias o copias del *prefab* (un *GameObject* con componentes y propiedades asociadas) que

representa el anillo objetivo. Este *prefab*, llamado *TenPointsRing*, contiene el diseño 2D del anillo y tiene asociado un script homónimo y un colisionador de caja que permiten su detección por el objeto *Player* cuando sea atravesado.

Para llevar a cabo su función, *RingsSpawnManager* toma los ángulos mínimos y máximos proporcionados por el rehabilitador y adoptará un modelo de generación diferente según el modo de juego seleccionado. En todos ellos, el primer paso es redimensionar los ángulos límite aplicando un escalado ángulo-distancias virtuales igual al utilizado para los ángulos de entrada provenientes del robot.

En los modos de juego FE Only y UR Only, los anillos son generados en el eje X y en el eje Y respectivamente mediante una función aleatoria de distribución uniforme. En el modo de juego FE & UR, la generación es más compleja, pues debe adaptarse al espacio de forma ovoide resultante del acoplamiento que existe entre los movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión. Con el objetivo de simplificar esta forma, los anillos se generan dentro de un espacio geométrico delimitado por dos semielipses cortadas por el eje menor y con las siguientes características:

- Las dos semielipses se encuentran en lados opuestos respecto del eje Y, dando lugar a (i) una elipse convencional, en caso de que sus semiejes mayores sean iguales o (ii) una elipse con forma de ovoide, en caso de que sus semiejes mayores difieran el uno del otro.
- El semieje mayor (paralelo al eje X) de la semielipse derecha se corresponde con la distancia X máxima y el de la semielipse izquierda se corresponde con la distancia X mínima.
- Las semielipses se encuentran desplazadas en el eje Y de forma que el valor máximo de generación respecto de ese eje se corresponde con la distancia Y máxima y el valor mínimo es la distancia Y mínima.

En este modo de juego, el FE & UR, se implementó un algoritmo que permite, en caso de que los semiejes mayores sean iguales, la generación de puntos distribuidos homogéneamente por toda una elipse y, en caso de que los semiejes mayores no sean iguales, una distribución que asegura la generación del mismo número de anillos en el lado izquierdo que en el derecho y con una distribución homogénea dentro de cada semielipse. La homogeneidad del algoritmo se fundamenta en tomar la definición en forma polar de la elipse y generar ángulos de forma aleatoria, dando más peso a aquellos en los que el radio es más grande. Para ello, se hace uso de la función de densidad de probabilidad del espacio geométrico delimitado por la elipse y el método de la transformada inversa para generar los valores que deseamos.

Por supuesto, independientemente del modo de juego, los anillos no se generan en un mismo plano XY, sino que éste se desplaza en el sentido positivo del eje Z de forma continua. La posición del eje Z en la que se generan los anillos depende del tiempo entre objetivos configurado al inicio de la partida, que puede mantenerse o no constante durante la misma. De esta forma, si en un momento dado el valor de

este parámetro es 5 y la velocidad de la nave es 3, la distancia entre un anillo y el siguiente será de 15 metros virtuales. En la práctica, la distancia es un aspecto de carácter puramente visual, pues lo importante es el tiempo entre objetivos con el que dispone el paciente.

Es conveniente destacar que la generación del siguiente anillo no tiene lugar hasta que el objeto *Player* alcanza la posición del último generado.

5.4.7 ObstaclesSpawnManager

La finalidad de este objeto es similar al *RingsSpawnManager*, aunque en vez de instanciar anillos realiza copias del *prefab Asteroid*, que toma el papel de obstáculo. Este *prefab*, al igual que el *TenPointsRing*, contiene el diseño 3D de un asteroide y lleva asociado un script llamado *Obstacle* y un colisionador de caja que posibilita su detección cuando *Player* impacta contra él.

El algoritmo de generación es el mismo que el del *RingsSpawnManager*, aunque presenta dos ligeras diferencias. En primer lugar, los asteroides sólo se generan si, cuando se instancia un anillo, se cumple la condición de que un valor aleatorio generado entre 0 y 1 sea menor que el valor del parámetro de inicio “cantidad de obstáculos”. En segundo lugar, en el eje Z los obstáculos se generan a una distancia que excede en un 150% la del anillo, para que su localización se encuentre, de forma aproximada, a mitad del camino del siguiente anillo.

5.4.8 Main Camera

La cámara es esencial para la correcta visualización del juego. A través del script *CameraPosition*, su posición se actualiza cada frame de forma que sea igual a la de la nave menos un ligero desfase tanto de posición como de rotación. De esta forma, se obtiene una visualización en tercera persona que permite una interacción intuitiva con la misma.

5.4.9 Game Output

Al final de la partida, el script asociado a este objeto recoge los valores correspondientes al número de anillos generados, de anillos alcanzados, de asteroides generados y de asteroides no evitados. Finalmente, los muestra a través de la ventana de la consola del editor.

5.4.10 Score Manager

Mediante su suscripción al evento “TenPoints”, el gestor de puntuación se encarga de contabilizar el número de anillos atravesados y el número de puntos

conseguidos. Se trata de un objeto simple al que están vinculados otros como el *Game Output* o el marcador de puntuación de la UI.

5.4.11 Distance Calculator

A través del script homónimo, este objeto calcula y ofrece a través de una función pública la distancia que existe entre la nave espacial y el anillo objetivo actual. Esta función, junto con otras, es utilizada por el objeto *DirectionIndicatorUI* de la UI, que muestra una flecha de ayuda cuando el paciente está demasiado alejado de la posición objetivo. A mayores, esta información de posición podrá ser utilizada más adelante para incorporar el feedback háptico.

5.4.12 Game Event System

La función de este objeto es gestionar los eventos del juego “TenPoints” y “AsteroidImpact”, asociados a la detección de anillos y obstáculos del objeto *Player* respectivamente. Su funcionamiento viene codificado en el script *GameEvents*.

5.4.13 Canvas

El *GameObject Canvas* agrupa los ocho componentes que conforman la UI del juego (Tabla 9):

Tabla 9. Componentes de la UI del juego, agrupados en el objeto Canvas

Elementos de la UI
<i>LoadingGameUI</i>
<i>GameRulesUI</i>
<i>GameStartCountdownUI</i>
<i>GamePlayingClockUI</i>
<i>ScoreManagerUI</i>
<i>DirectionIndicatorUI</i>
<i>CongratulationsUI</i>
<i>GameOverUI</i>

La implementación de todos los componentes se llevó a cabo respetando los principios de ergonomía planteados en los requisitos de integración en la plataforma M3Rob. Buscando la homogeneidad estética, se utilizaron únicamente dos fuentes

tipográficas disponibles en Unity (“Electronic Highway Sign” y “Roboto-bold”) y se aplicó una gama cromática de tonos morados a todos los componentes gráficos.

El objeto *LoadingGameUI* muestra por pantalla el mensaje “Cargando juego...” durante el estado del juego *WaitingToStart* (Figura 21). El objetivo de este mensaje es mostrar un entorno amigable al paciente mientras el programa está cargando, en lugar de mostrar una pantalla en negro o una previsualización del juego.



Figura 21. Pantalla mostrada por el objeto *LoadingGameUI* durante el periodo de carga del juego.

El objeto *GameRulesUI* muestra por pantalla las reglas o instrucciones del juego. Como se observa en la Figura 22, estas instrucciones se componen de tres frases simples y concisas relativas al objetivo del juego (“Toma el control de la nave espacial”, “Consigue atravesar todos los anillos” y “Evita impactar contra los asteroides”). Para facilitar su comprensión, acompañando a estas frases se encuentran tres simples ilustraciones 2D de la nave espacial, los anillos y los asteroides.

El objeto *GameStartCountdownUI* muestra en la zona central de la pantalla una cuenta atrás de 5 segundos que avisa al paciente del inicio inminente del juego (Figura 23). De esta forma, se intenta que comience a jugar con una atención máxima.

El objeto *GamePlayingClockUI*, una vez que el juego ha comenzado, muestra en la zona superior derecha de la pantalla el tiempo restante, y lo hace a través de una barra cuyo contenido va menguando según avanza el tiempo (Figura 24). Al final de la partida, la barra se vacía completamente.

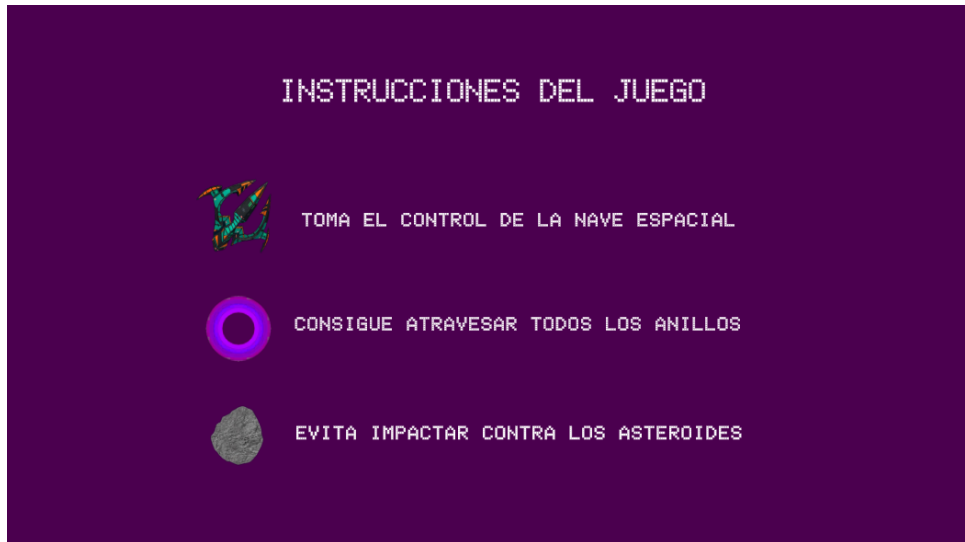


Figura 22. Pantalla de instrucciones mostrada por el objeto GameRulesUI una vez que el juego se ha cargado.

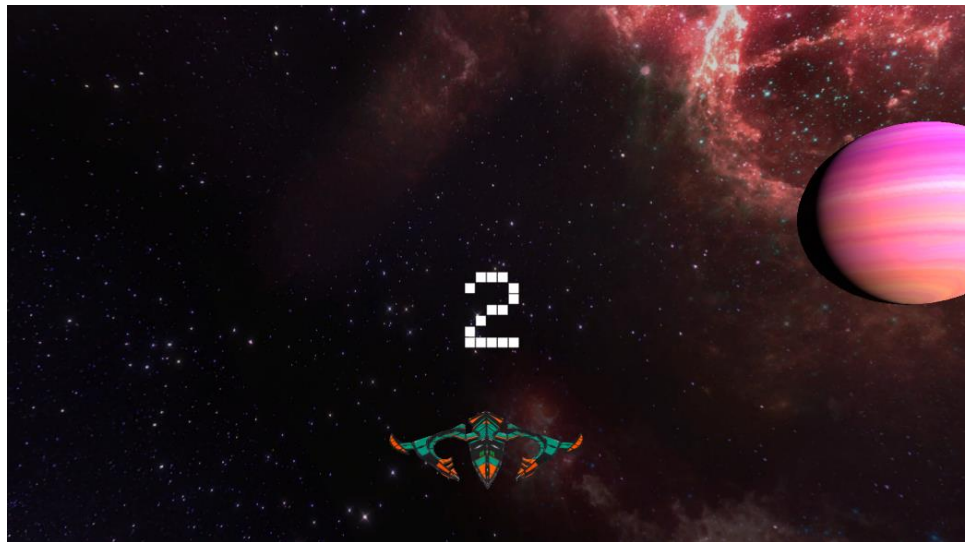


Figura 23. Pantalla de cuenta atrás gestionada por el objeto GameStartCountdownUI.

Durante la partida, el objeto *ScoreManagerUI* permite visualizar en la esquina superior izquierda de la pantalla el contador de puntos conseguidos por el paciente (Figura 24).

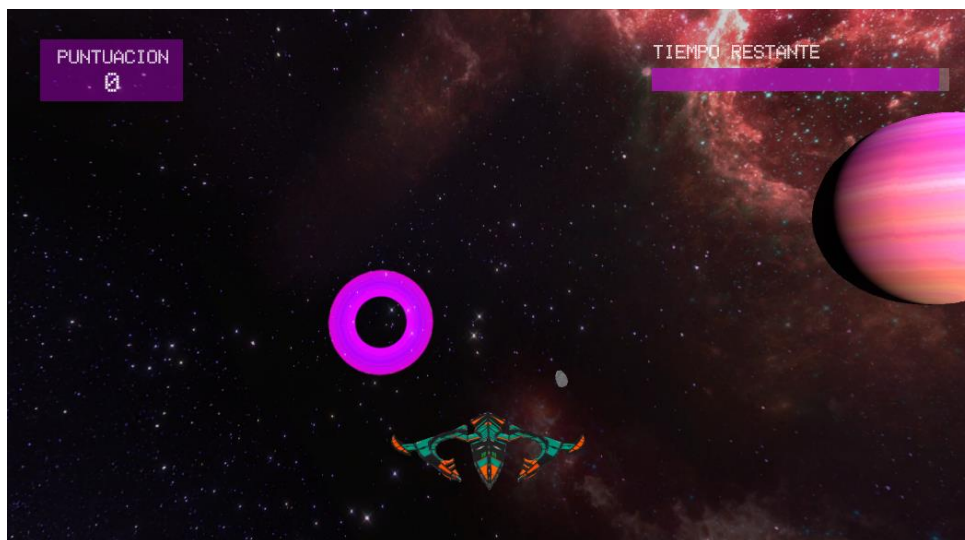


Figura 24. Juego en marcha, en el que se puede observar la barra de tiempo y el marcador de puntuación.

El objeto *DirectionIndicatorUI* se encarga de gestionar la “flecha de ayuda”, cuya orientación determina el sentido que el paciente debe tomar para alcanzar el siguiente objetivo. Sólo se muestra por pantalla cuando el módulo de la distancia entre la nave y el siguiente objetivo, extraída del objeto *DistanceCalculator*, sea mayor que un valor configurable. De lo contrario, permanece oculta. Para no obstruir la visión ni causar distracciones, dicha flecha aparece superpuesta a la nave espacial como puede observarse en la Figura 25.

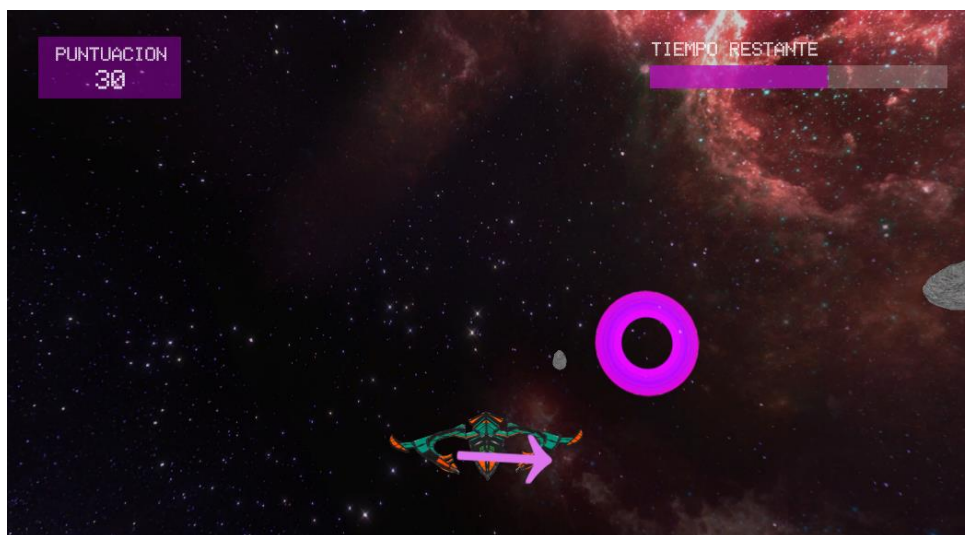


Figura 25. Captura de pantalla del juego en la que se muestra la flecha de ayuda.

El objeto *CongratulationsUI* muestra un mensaje de felicitación cuando el paciente atraviesa un anillo (Figura 26) cuyo contenido se extrae de forma aleatoria

de un set predefinido. Las frases disponibles en este set son las siguientes: "¡Bien hecho!", "¡Eso es!", "¡Así se hace!" y "¡Sigue así, capitán!". Su contenido es totalmente personalizable y puede ampliarse tanto como se desee.

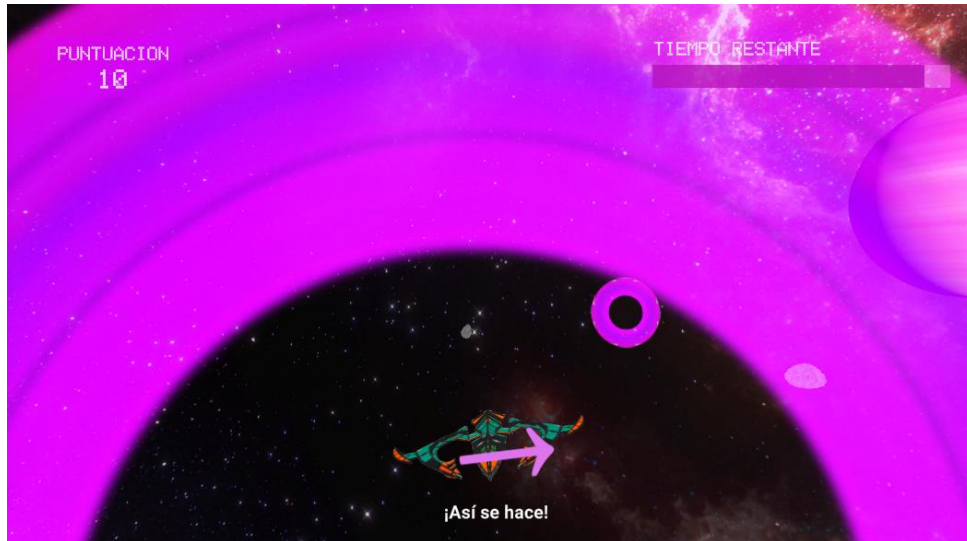


Figura 26. Mensaje de felicitación tras haber atravesado un anillo.

Por último, el objeto *GameOverUI* lanza al final de la partida una pantalla en la que se muestra la puntuación obtenida (Figura 27).



Figura 27. Pantalla de finalización de la partida.

5.4.14 Sound Manager

El objeto *SoundManager* gestiona los dos sonidos del juego: la música de fondo, tomada de [58] y el efecto sonoro asociado al evento *GotTenPoints* [59].

5.4.15 Otros elementos del diseño

Durante la fase de diseño de *StarWrist* fueron implementados otros elementos no tan esenciales para la jugabilidad, aunque sí necesarios para generar un EV estimulante y visualmente atractivo. Entre ellos se encuentra el diseño del espacio exterior, el cual fue implementado a través de la personalización del *SkyBox* de la escena, o la presencia de un modelo 3D de un planeta al inicio de cada partida. También es relevante mencionar el uso del Canal de Renderizado Universal (URP, del inglés *Universal Render Pipeline*) durante todo el proceso de diseño y desarrollo del juego con el objetivo de conseguir un renderizado 3D lo más realista posible.

6. Resultados

El presente proyecto culminó con la implementación de *StarWrist* en la plataforma M3Rob y su puesta a prueba con el módulo robótico de la misma. Para ello, se contó con la ayuda del equipo de investigación del ITAP y del equipamiento tecnológico del mismo. Tras la satisfactoria configuración tanto del software como del hardware, se procedió a realizar un set de pruebas de control que permitieron constatar el correcto funcionamiento del *serious game*. Este set se compuso de diferentes configuraciones de parámetros de inicio (ángulos límite, tiempos de reacción, velocidad de la nave espacial, etc.). Durante su evaluación, *StarWrist* fue utilizado por diferentes integrantes del grupo de investigación, todos ellos sujetos sanos y sin ningún tipo de discapacidad motora (Figura 28).



Figura 28. Usuario jugando a *StarWrist* utilizando como control los movimientos de su muñeca izquierda.

Atendiendo a su jugabilidad, las pruebas arrojaron resultados positivos. En primer lugar, en todas las ocasiones el entorno se lanzó desde la HMI de manera fluida (Figura 29), transmitiendo la configuración especificada al MG sin ningún problema. En segundo lugar, la nave siguió adecuadamente los movimientos de la

muñeca, y los anillos y obstáculos se generaron dentro de los rangos indicados. En tercer lugar, todos los componentes de la UI permitieron una interacción usuario-EV confortante a la par que estimulante. En tercer y último lugar, la extracción de información relativa al rendimiento del usuario funcionó de forma adecuada. En definitiva, la combinación de todos estos elementos resultó en una fuente de entretenimiento para los usuarios y que respeta, al mismo tiempo, la totalidad de requisitos especificados para la implementación de EV en la plataforma M3Rob.

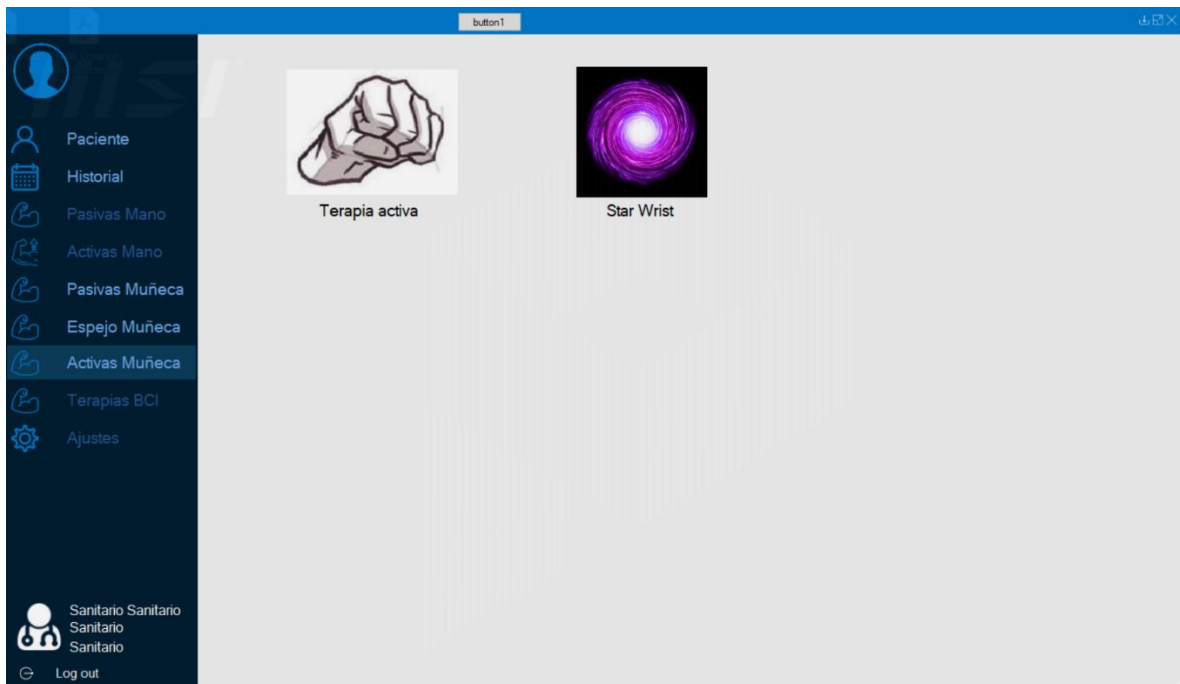


Figura 29. HMI de M3Rob, desde la que se lanza StarWrist y se configuran sus parámetros iniciales.

7. Discusión y líneas futuras

El diseño de *StarWrist* supone un avance importante en el desarrollo del proyecto M3Rob, pues se trata del primer *serious game* de la plataforma que tiene como objetivo la neurorrehabilitación de la muñeca y que permite la implementación de estrategias de asistencia asistivas, activas y resistivas. Al igual que su objetivo, el resultado de este proyecto es doble. Por un lado, se ha conseguido desarrollar un juego funcional, atractivo y con un gran potencial de ser trasladado a la práctica clínica. Además, su diseño supone una mejora en el entrenamiento del movimiento de abducción-aducción frente a juegos similares existentes en la literatura, gracias al desplazamiento automático en el eje Z de la nave espacial. Por otro lado, se han logrado describir con éxito seis requisitos de integración de EV en la plataforma M3Rob cuya finalidad es facilitar el desarrollo de futuros nuevos juegos para rehabilitación de muñeca.

A pesar de que el balance general sea positivo, hay que recalcar que, a día de hoy, *StarWrist* es únicamente un primer prototipo y, por ello, su desarrollo no acaba aquí. Durante la siguiente etapa, este *serious game* deberá ser llevado al entorno clínico para ser evaluado a través de su uso por pacientes de DCA. Además, deberá ser necesario escuchar las opiniones y valoraciones del personal médico por dos razones: por una parte, la continuación del desarrollo de *StarWrist* no tendría sentido sin su aprobación y, por otra parte, ellos han de indicar aquellos elementos del juego que deben ser retirados, incorporados o mejorados.

Durante el diseño del EV fueron varias las ideas desechadas por superar los límites establecidos para el Trabajo de Fin de Grado, pero que podrían ser implementadas en un futuro. Entre ellas, se encuentra el desarrollo de un algoritmo que pueda regular de forma inteligente la dificultad del juego atendiendo a distintas métricas de rendimiento del paciente. De esta forma, el rehabilitador no tendría que modificar entre partidas ninguno de los parámetros de inicio. Otra de las propuestas descartadas consistía en establecer una serie de niveles (fácil, intermedio y difícil), restringiendo la dificultad del juego a las capacidades de cada paciente de DCA. Por último, se planteó añadir anillos objetivo con colores, puntuaciones y tamaños distintos, incorporando una mayor variabilidad en el diseño del juego que redujese la monotonía del mismo.

Referencias

- [1] Brain Injury Association of America, «What is the difference between an acquired brain injury and a traumatic brain injury?,» [En línea]. Disponible en: www.biausa.org. [Último acceso: marzo 2023].
- [2] Instituto Nacional de Estadística (INE), «Encuesta de discapacidad, autonomía personal y situaciones de dependencia,» 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176782&menu=resultados&idp=1254735573175.
- [3] G. A. Donnan, M. Fisher, M. Macleod y S. M. Davis, «Stroke,» *The Lancet*, vol. 371, n^o 9624, pp. 1612-1623, 2008.
- [4] Instituto de rehabilitación neurológica IRENEA, «Las secuelas motoras más comunes en un ictus,» 14 enero 2019. [En línea]. Disponible en: <https://irenea.es/blog-dano-cerebral/secuelas-motoras-mas-comunes-en-un-ictus/#:~:text=Entre%20las%20secuelas%20motoras%20m%C3%A1s,ictus%2C%20suele%20ser%20la%20hemiparesia..> [Último acceso: marzo 2023].
- [5] F. E. Leon-Sarmiento, E. Bayona y J. Bayona-Prieto, «Neurorrehabilitación. La otra revolución del siglo XXI,» *Acta Médica Colombiana*, vol. 34, n^o 2, pp. 88-92, 2009.
- [6] Federación Española De Daño Cerebral, «Daño Cerebral Adquirido,» [En línea]. Disponible en: <https://fedace.org/dano-cerebral>. [Último acceso: febrero 2023].
- [7] M. Miriam Segal, «Motor Control,» de *Brain Injury Medicine*, Elsevier, 2020, pp. 206-210.
- [8] Y. Béjot, H. Bailly, J. Durier y M. Giroud, «Epidemiology of stroke in Europe and trends for the 21st century,» *La Presse Médicale*, vol. 45, n^o 12 (Parte 2), pp. e391-e398, 2016.
- [9] IISART - The International Industry Society in Advanced Rehabilitation Technology, «IISART Education - Slidepool 1: Basic Knowledge - A Movement Therapy Perspective,» 2015. [En línea]. Disponible en: <https://iisart.org/education>. [Último acceso: 30 mayo 2023].
- [10] C. Patten, J. Lexell y H. E. Brown, «Weakness and strength training in persons with poststroke hemiplegia: Rationale, method, and efficacy,» *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 41, n^o 3a, pp. 293-312, 2004.
- [11] J. I. Quemada y N. Mimentza, «Informaciones psiquiátricas - Los trastornos emocionales y conductuales postictus,» Hermanas hospitalarias del Sagrado Corazón de Jesús, Barcelona, 2016.
- [12] L. Lennihan y G. M. Seliger, Houston H, Rowland L, eds. *Merritt's Textbook of Neurology*, 9 ed., Baltimore: Williams & Wilkins, 1995, pp. 1002-1005.

- [13] J. Vidal-Samsó, «La neurorehabilitación, un proceso de alta complejidad,» *Neurología*, vol. 70, n° 12, p. 433, 2020.
- [14] L. M. L. Roa, «Neuroplasticidad y sus implicaciones en la rehabilitación,» *Universidad y Salud*, vol. 14, n° 2, pp. 197-204, 2012.
- [15] J. A. Kleim y T. A. Jones, «Principles of Experience-Dependent Neural Plasticity: Implications for Rehabilitation After Brain Damage (Supplement),» *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, vol. 51, n° 1, pp. 225-239, 2008.
- [16] M. Maier, B. Rubio Ballester y P. F. M. J. Verschure, «Principles of Neurorehabilitation After Stroke Based on Motor Learning and Brain Plasticity Mechanisms,» *Front. Syst. Neurosci.*, vol. 13, n° 74, 2019.
- [17] I. Dumas, G. Everard, S. Dehem y T. Lejeune, «Serious games for upper limb rehabilitation after stroke: a meta-analysis,» *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, n° 100, 2021.
- [18] R. Colombo y V. Sanguineti, *Rehabilitation Robotics. Technology and Application - 1ª edición*, Academic Press, 2018.
- [19] R. L. Drake, A. W. Vogl y A. W. M. Mitchell, *Gray. Anatomía para estudiantes - 3ª Edición*, 2015, p. 795.
- [20] F. H. Martini, R. B. Tallitsch y J. L. Nath, *Anatomía humana - 9ª edición*, Pearson Educación, 2017.
- [21] J. B. Rodríguez, *Cuadernos de Anatomía. Aparato locomotor*, vol. Vol. II Extremidad superior. Cabeza y cuello, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2020.
- [22] S. J. Hall, *Biomecánica Básica - Novena edición*, McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, 2022.
- [23] F. Paulsen y J. Waschke, Sobotta. *Atlas de anatomía humana*, Elsevier Urban & Fischer, 2012, p. 153.
- [24] A. I. Kapandji, *Fisiología Articular - 6ª edición*, vol. 1. Miembro superior, 2012.
- [25] C. Serrano, «Articulación de la muñeca (radiocarpiana),» Kenhub, 30 noviembre 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/articulacion-de-la-muneca-radiocarpiana>. [Último acceso: 30 mayo 2023].
- [26] M. Schünke, E. Schulte y U. Schumacher, *Prometheus. Texto y Atlas de Anatomía - 5.ª edición*, vol. Tomo I. Anatomía general y aparato locomotor, Editorial Médica Panamericana, 2021.
- [27] Z.-M. Li, L. Kuxhaus, J. A. Fisk y T. H. Christophel, «Coupling between wrist flexion–extension and radial–ulnar deviation,» *Clinical Biomechanics*, vol. 20, pp. 177-183, 2005.

- [28] P. Milgram y F. Kishino, «A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,» *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E77D, n° 12, pp. 1321-1329, 1994.
- [29] P. L. (Tamar) Weiss, R. Kizony, U. Feintuch, D. Rand y N. Katz, «Virtual reality applications in neurorehabilitation,» de *Textbook of Neural Repair and Rehabilitation*, vol. II: Medical Neurorehabilitation, 2006, p. 198.
- [30] D. Perez-Marcos, «Virtual reality experiences, embodiment, videogames and their dimensions in neurorehabilitation,» *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 15, n° 113, 2018.
- [31] S. Viñas-Diz y M. Sobrido-Prieto, «Realidad virtual con fines terapéuticos en pacientes con ictus: revisión sistemática,» *Neurología*, vol. 31, n° 4, pp. 255-277, 2016.
- [32] J. Eddins, Artist, *A traumatic brain injury patient*. [Art]. U.S. Air Force photo by J.M. Eddins Jr., 2017.
- [33] B. Ferreira y P. Menezes, «An Adaptive Virtual Reality-Based Serious Game for Therapeutic Rehabilitation,» *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 16, n° 4, pp. 63-70, 2020.
- [34] A. Demeco, L. Zola, A. Frizziero, C. Martini, A. Palumbo, R. Foresti, G. Buccino y C. Constantino, «Immersive Virtual Reality in Post-Stroke Rehabilitation,» *Sensors*, vol. 23, n° 1712, 2023.
- [35] J. Weimeyer, J. Deutsch, L. A. Malone, J. L. Rowland, M. C. Swartz, J. Xiong y F. F. Zhang, «Recommendations for the Optimal Design of Exergame Interventions for Persons with Disabilities: Challenges, Best Practices, and Future Research,» *GAMES FOR HEALTH JOURNAL: Research, Development, and Clinical Applications*, vol. 4, n° 1, pp. 58-62, 2015.
- [36] M. J. Schuemie, P. van der Straaten, M. Krijn y C. A. van der Mast, «Research on presence in virtual reality: a survey,» *Cyberpsychol. Behav.*, vol. 4, n° 2, pp. 183-201, 2001.
- [37] R. Khokale, G. S. Mathew, S. Ahmed, S. Maheen, M. Fawad, P. Bandaru, A. Zerín, Z. Nazir, I. Khawaja, I. Sharif, Z. U. Abdin y A. Akbar, «Virtual and Augmented Reality in Post-stroke Rehabilitation: A Narrative Review,» *Cureus*, vol. 15, n° 4, 2023.
- [38] D. Nath, N. Singh, M. Saini, M. V. Padma Srivastava y A. Mehndiratta, «Design and Validation of Virtual Reality Task for Neuro-Rehabilitation of Distal Upper Extremities,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, n° 1442, 2022.
- [39] A. Farasyfa, A. Arifin y E. A. Suprayitno, «Wrist Rehabilitation Using A 3D Mouse-Joystick Prototype Base Virtual Reality Game With Myoelectric Signal Evaluation System For Post-Stroke Patients,» de *2022 International Conference on Computer Engineering, Network, and Intelligent Multimedia (CENIM)*, 2022.

- [40] I. Pachoulakis y D. Tsilidi, «Technology-assisted Carpal Tunnel Syndrome Rehabilitation using serious games: the Roller Ball example.,» *European Journal of Applied Sciences*, vol. 4, n° 4, 2016.
- [41] E. Lamprecht, A. Abbasimoshaci y T. A. Kern, «Development of a Wrist Rehabilitation Game with Haptic Feedback,» de *11th Wireless Mobile Communication and Healthcare*, 2022.
- [42] F. Team, «InMotion ARM, WRIST and HAND Robots Redefine Neurorehabilitation,» Fitness gaming, 21 septiembre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.fitness-gaming.com/news/health-and-rehab/inmotion-arm-wrist-and-hand-robots-redefine-neurorehabilitation.html>. [Último acceso: 2023 junio 2023].
- [43] S. Hussain, P. K. Jamwal, P. Van Vliet y M. H. Ghayesh, «State of the Art Robotic Devices for Wrist Rehabilitation: Design and Control Aspects,» *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 50, n° 5, pp. 361-372, 2020.
- [44] H. I. Krebs, B. T. Volpe, D. Williams, J. Celestino, S. K. Charles, D. Lynch y N. Hogan, «Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation,» *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 15, n° 3, pp. 327-335, 2007.
- [45] B. I. Robotics, «InMotion® ARM for Neurological Rehabilitation,» [En línea]. Disponible en: <https://bioniklabs.com/inmotion-arm/>. [Último acceso: 2 junio 2023].
- [46] A. U. Pehlivan, F. Sergi y M. K. Omalley, «A subject-adaptive controller for wrist robotic rehabilitation,» *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, n° 3, pp. 1338-1350, 2015.
- [47] A. U. Pehlivan, F. Sergi, A. Erwin, N. Yozbatiran, G. E. Francisco y M. K. O'Malley, «Design and validation of the RiceWrist-S exoskeleton for robotic rehabilitation after incomplete spinal cord injury,» *Robotica*, vol. 32, n° 8, pp. 1415-1431, 2014.
- [48] A. Gupta, M. K. O'Malley, V. Patoglu y C. Burgar, «Design, control and performance of RiceWrist: A force feedback wrist exoskeleton for rehabilitation and training,» *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, n° 2, pp. 233-251, 2008.
- [49] C. Rose, A. A. Deshpande y M. K. O'Malley, «Design and characterization of the OpenWrist: A robotic wrist exoskeleton for coordinated hand-wrist rehabilitation,» de *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, 2017.
- [50] A. Cisnal, V. Martínez-Cagigal, G. Alonso-Linaje, S. Moreno-Calderón, J. Pérez Turiel, R. Hornero y J. C. Fraile Marinero, «An Overview of M3Rob, a Robotic Platform for Neuromotor and Cognitive Rehabilitation Using Augmented Reality,» de *XL Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, Valladolid, 2022.
- [51] A. Basteris, S. M. Nijenhuis, A. H. Stienen, J. H. Buurke, G. B. Prange y F. Amirabdollahian, «Training modalities in robot-mediated upper limb rehabilitation in stroke: a framework for classification based on a systematic review,» *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 11, n° 111, 2014.

- [52] J. Grafskiy, Artist, *UAV Trident*. [Art]. Unity Asset Store, 2016.
- [53] P. Creations, Artist, *Vast Outer Space*. [Art]. Unity Asset Store, 2017.
- [54] P. BYTES, Artist, *SpaceSkies Free*. [Art]. Unity Asset Store, 2017.
- [55] Sociedad Española de Neurología, «El atlas del ictus,» 2019.
- [56] L. Sauvé, «Société pour l'apprentissage à vie (Savie),» 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.savie.ca/SAVIE/Publications/Jeux/045_Sauve%20_WSSFEnglish_2013_vf.pdf. [Último acceso: 14 Febrero 2023].
- [57] J. B. Nielsen, M. Willerslev-Olsen, L. Christiansen y J. Lundbye-Jensen, «Science-Based Neurorehabilitation: Recommendations for Neurorehabilitation From Basic Science,» *Journal of Motor Behavior*, vol. 47, n^o Issue 1: Neural Enhancement for Independent Living, pp. 7-17, 2015.
- [58] Vislevski, Compositor, *Beautiful Ethereal Ambient Music (Copyright Free)*. [Grabación de sonido]. Tunetank: Free Music for Content Creators. 2023.
- [59] F. A. Zone, Compositor, *Bonus Points Sound Effect*. [Grabación de sonido]. SilverPlatter Audio. 2018.