

Andrea Pérez Valle

Diseño e implementación de juego serio para la plataforma robótica M3Rob dirigido a la neurorrehabilitación de pacientes de accidente cerebrovascular.

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Dirigido por la Dra. Ana Císnal de la Rica

Grado de Ingeniería Biomédica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2024

Resumen

El ictus, una de las principales causas de discapacidad mundial, produce secuelas neurológicas, motoras, cognitivas y emocionales crónicas. La hemiparesia, que reduce la fuerza muscular del lado opuesto a la lesión cerebral, es una secuela común que compromete la movilidad de manos y muñecas, afectando severamente la independencia de los pacientes. La rehabilitación de la muñeca es compleja debido a su estructura anatómica y biomecánica.

La combinación de realidad virtual, gamificación, robótica y terapia convencional ha demostrado potencial para mejorar la rehabilitación, incrementando la motivación y adherencia de los pacientes y reduciendo su dependencia física y cognitiva.

Este Trabajo de Fin de Grado presenta el diseño y desarrollo de “*Bubble Catch*”, un prototipo de entorno virtual para la rehabilitación de la muñeca, y su integración en la plataforma M3Rob del ITAP de la Universidad de Valladolid. Se abordan retos de la neurorrehabilitación gamificada, integrando conocimientos de neurofisiopatología, biomecánica, programación, análisis de datos y control robótico, con el objetivo de mejorar la situación actual mediante un *serious game* para M3Rob.

Palabras clave

Realidad Virtual, Robótica Médica, Accidente Cerebrovascular.

Agradecimientos

A mis padres, por confiar siempre en mí y hacerme valorar el brillo del esfuerzo, la motivación y lo humano.

A mi familia por apoyarme y dar alas a la curiosidad que me ha traído hasta hoy, aquí y ahora.

A todo el equipo del grupo de Robótica Médica de ITAP por guiarme e incentivarme a realizar el proyecto y por acogerme tan bien.

A Tarragona, los *castells* y a toda la gente que me han brindado por ser la familia que he escogido, crecer conmigo y hacer de esta ciudad un hogar.

A Ania, seguro que estaría orgullosa de ver dónde he llegado. Allá donde estés, ésta va por nosotras.

Contenido

Resumen	1
Agradecimientos	2
Lista de figuras	4
Lista de tablas	4
1 Introducción.....	5
1.1 Estado del Arte	5
1.2 Proyecto M3Rob.....	6
1.3 Motivación y Objetivo del Trabajo de Fin de Grado.....	7
2 Accidente Cerebrovascular.....	7
2.1 Accidente Isquémico y Hemorrágico	8
2.2 Epidemiología.....	8
2.3 Secuelas Motoras	9
2.4 Secuelas Psicológicas, Emocionales y Cognitivas	10
2.5 Situación Clínica	11
3 Neurorehabilitación y Neuroplasticidad.....	15
4 Biomecánica del Complejo Articular de la Muñeca.....	19
4.1 Anatomía	19
4.2 Rangos de Movimiento Fisiológicos	20
5 RV, RA y gamificación	21
6 Materiales y Metodología.....	25
6.1 Sistema M3Rob	25
6.2 Unity	28
6.3 Desarrollo Software.....	29
6.4 Principios de Diseño de un Juego Serio para Neurorehabilitación	30
7 Análisis del resultado	30
7.1 Detalles de Implementación	31
7.1.1 Concepto de <i>Singleton</i>	31
7.1.2 Unidades Espaciales de Trabajo	32
7.1.3 Elementos Estéticos del Juego.....	33
8 Discusión y Líneas Futuras.....	34
9 Conclusiones.....	35
Referencias	37

Lista de figuras

Figura 1. Clasificación del paciente de ACV	8
Figura 2. Ejes y planos anatómicos [24].	9
Figura 3. Ubicación de algunas regiones cerebrales [28].	11
Figura 4. Fases de protocolos según la modalidad de la terapia [14].	14
Figura 5. Ubicación de las partes del complejo articular de la muñeca [49].	19
Figura 6 . Curvas convexas del complejo [49].	19
Figura 7. Movimientos propios de la muñeca [51].	20
Figura 8. Circunducción de la muñeca [49].	21
Figura 9. Juegos de diferentes estudios con metodologías más sencillas.	23
Figura 10. Juegos más elaborados en cuanto a objetivos y diseño.	24
Figura 11. Estructura M3Rob.	26
Figura 12. Modelo CAD del módulo del dispositivo robotizado M3Rob.	27
Figura 13. Sistema de coordenadas de M3Rob	28
Figura 14. Estructura del patrón Singleton (Ejemplo GameManager)	31
Figura 15. Rotaciones de la mano.	32
Figura 16. Rotaciones de la muñeca según los ángulos de Euler [64].	32

Lista de tablas

Tabla 1. Principales secuelas características de pacientes de ACV.	11
Tabla 2. Escalas de evaluación de funciones motoras más utilizadas.	12
Tabla 3. Ejemplos prácticos de neurorrehabilitación gamificada.	17
Tabla 4. ROM de articulación radiocarpiana.	20
Tabla 5. Parámetros DH del dispositivo M3Rob.	28

1 Introducción

1.1 Estado del Arte

El ictus es una de las enfermedades que mayor discapacidad genera en sus supervivientes. De hecho, se estima que aproximadamente el 85% de las personas que han sufrido un accidente cerebrovascular (ACV) experimentan hemiparesia inmediatamente después, y entre el 55% y el 75% padecen problemas motores importantes en uno de los brazos de forma crónica¹ [1], lo que induce limitaciones a la hora de realizar actividades de la vida diaria (AVD) [2].

Varios estudios han informado de la dificultad de rehabilitar la función motora especialmente en individuos en fase crónica, ya que, para ellos, la neuroplasticidad² espontánea casi ha desaparecido [3], [4]. En concreto, la alta complejidad anatómica y dinámica de los miembros superiores, exige actividades de rehabilitación con intensidad, variedad, especificidad, motivación y biorretroalimentación con prácticas adecuadas, lo cual aumenta la dificultad a la que nos referimos [5].

Las innovaciones tecnológicas están integrándose en el mundo de la medicina, permitiendo procesos más integrados y de mayor eficiencia a largo plazo. En concreto, la neurorrehabilitación mediada por robots es un campo que avanza rápidamente y, aunque presenta retos para la bioingeniería y la práctica clínica, está demostrando resultados prometedores. Según principios neurocientíficos, este planteamiento es capaz de definir nuevos métodos para el tratamiento de este tipo de pacientes.

Si bien ya se ha intentado incorporar al proceso de rehabilitación dispositivos comerciales tales como *Nintendo Wii*, *Microsoft Xbox Kinect*, *Sony Play Station EyeToy*, *HTC vive*, etc. (encontramos algunos ejemplos en [1], [6], [7], [8], [9]), éstos no dejan de ser dispositivos comerciales que no tienen en cuenta las necesidades neurofisiopatológicas del perfil de paciente de ACV. Se busca entonces dispositivos que sean igual de rentables económicamente, pero con un objetivo más especializado ya que los juegos lúdicos (como, por ejemplo, *Wii Sports*) abarcan un movimiento natural amplio y fisiológico. Sin embargo, se necesita diseñar juegos que satisfagan el entrenamiento repetitivo, semiautónomo y funcional de solo ciertos movimientos de forma adaptada a cada paciente en específico.

Recientemente, se ha estado investigando sobre el enfoque de estos juegos serios o “*serious game*” en sistemas robóticos de rehabilitación, conformando lo que se conoce como *Serious Games for Health Rehabilitation* (SGHR), ya que además de incorporar la práctica repetitiva orientada a objetivos, son seguros e individualizados [10]. Éstos se usan como incentivo para recuperar de forma eficaz la función motora de las extremidades superiores con tareas como alcanzar, agarrar, manipular, etc.

¹ Enfermedad de larga duración y progresión lenta, curable o no. En el caso de ACV se considera el término a partir del año desde el evento.

² Capacidad del sistema nervioso humano de modificarse para formar conexiones nerviosas en respuesta a la información nueva, la estimulación sensorial, el desarrollo, la disfunción y el daño.

Los sistemas robóticos de rehabilitación específicos, como los exoesqueletos, tienen la capacidad de registrar datos durante la partida del paciente y proporcionar retroalimentación sobre los errores y el desempeño, conformando así un factor motivador y guía para adquirir movimientos progresivamente más naturales para promover una práctica duradera [11].

Es importante destacar que la intervención de la gamificación con realidad virtual (RV) puede abordar muchas de las consecuencias motoras, emocionales y neurológicas post-ictus, tales como la función motora reducida, la movilidad, el control postural, así como aumento de la motivación, adherencia y dosis de entrenamiento. De forma paralela, la explotación de los mecanismos de recompensa neurofisiológicos que puede aportar esta combinación hace partícipe al sistema dopaminérgico³, lo que da como resultado mayor plasticidad neuronal, cosa que se busca en los usuarios que han padecido un ACV [5], [6].

1.2 Proyecto M3Rob

El *Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción* (ITAP) es un Instituto Universitario de Investigación de la Universidad de Valladolid, ubicado en la Escuela de Ingenierías Industriales, que desarrolla su actividad investigadora en el ámbito de la cirugía asistida por robots, y el desarrollo de robots para neurorrehabilitación de miembro superior (plataformas robotizadas *RobHand* – robot de mano y *M3Rob* – robot de muñeca).

En concreto, el proyecto M3Rob, cuyo significado es “Mente-Mano-Muñeca-Robot” tiene como propósito el diseño, desarrollo y validación de una plataforma de neurorrehabilitación de mano – muñeca y rehabilitación cognitiva para personas que han sufrido un ACV. Este proyecto de I+D dispone de financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades [12]. El proyecto contempla el desarrollo de tres módulos:

1. Rehabilitación física
2. Rehabilitación neurológica
3. Realidad aumentada (RA)

Estos módulos, en su conjunto, constituyen la esencia del proyecto, integrando un sistema robótico de asistencia terapéutica dinámica, como lo es el exoesqueleto, junto con la monitorización del paciente y un entorno virtual. Esta integración proporciona una solución completa y efectiva para abordar las necesidades de rehabilitación motora, neuropsicológica y cognitiva de las personas que han sufrido un ACV [13].

³ Conjunto de estructuras neuronales que usan la dopamina como neurotransmisor principal, la cual tiene el control sobre el movimiento, recompensa, motivación y regulación del humor.

1.3 Motivación y Objetivo del Trabajo de Fin de Grado

La estancia de prácticas durante un total de 450 horas en Instituto ITAP de la Universidad de Valladolid durante el periodo de febrero a junio de 2024, ha motivado el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) en el que se pueden apreciar muchas de las facetas que convergen en los ámbitos fundamentales del Grado de Ingeniería Biomédica: anatomía fisiológica y patológica, biomecánica, programación de software y comunicaciones entre dispositivos y plataformas, análisis de datos y robótica médica.

Revisando la literatura disponible, se hace evidente la necesidad de nuevos enfoques de tratamiento y nuevas aportaciones a los ya emergentes que combinen tanto la recuperación funcional como la motivación mediante juegos atractivos para continuar alcanzando resultados funcionales, ya que estudios como [14] comprueban que para los usuarios siguen siendo más atractivos los juegos comerciales que los actualmente disponibles en la rehabilitación.

De esta forma, el objetivo de este TFG es contribuir al proyecto M3Rob concebido para la rehabilitación funcional del complejo articular de la muñeca en pacientes con Daño Cerebral Adquirido (DCA) mediante el desarrollo de un SGHR con adaptaciones y características de personalización específica para este tipo de pacientes y con la obtención de métricas que sean útiles para la evaluación y estado del progreso de las secuelas de un ACV.

También se pretende proporcionar una descripción y estudio detallados de los conocimientos previos e investigación necesarios de cada ámbito mencionado y cómo establecen una simbiosis coherente en este TFG.

2 Accidente Cerebrovascular

En realidad, el ictus o ACV se recoge en lo que se concibe como DCA. La diferencia resulta esencial: mientras que el DCA es la patología que se sufre, el ictus es uno de sus desencadenantes repentino y más frecuente.

El ACV se puede definir como una alteración isquémica o hemorrágica cuyo resultado es una destrucción parcial del tejido cortical que conduce a comandos neuronales alterados de las áreas sensoriomotoras de la corteza, lo que deriva en hemiparesia o hemiplejía. Según el estudio [15], los grados de recuperación dependen sobre todo de dos factores: ubicación de la lesión y su gravedad (esto es, extensión) entre otros.

Las ubicaciones cerebrales donde más suele afectar son las estructuras parietales, frontales, del mesencéfalo o del tronco encefálico [16]. Según el periodo de tiempo que haya pasado entre el evento y el momento actual, diferenciamos entre pacientes agudos, subagudos y crónicos:

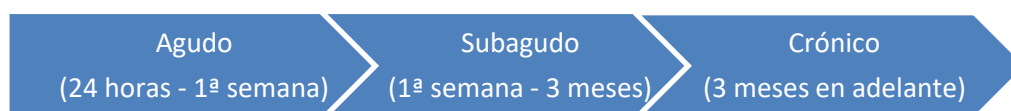


Figura 1. Clasificación del paciente de ACV según el tiempo transcurrido desde el evento.

2.1 Accidente Isquémico y Hemorrágico

Estos son los dos tipos principales en los que se clasifica el ACV. Es interesante diferenciarlos por contextualizar la patología:

Los ictus isquémicos son los más comunes, representando aproximadamente el 85% de los casos. Ocurren cuando un vaso sanguíneo se bloquea, lo que reduce el flujo de sangre hacia el cerebro. Dependiendo de la gravedad y duración del bloqueo, puede ser un evento transitorio, conocido como accidente isquémico transitorio (AIT), con daños temporales y reversibles, o puede evolucionar hacia un infarto cerebral con secuelas permanentes.

Por otro lado, los ictus hemorrágicos representan alrededor del 15% restante de los casos y se producen cuando un vaso arterial se rompe, normalmente por una lesión causada por alteraciones hemodinámicas, provocando que la sangre se escape fuera del sistema vascular. La hipertensión es la causa principal, aunque también pueden contribuir la angiopatía amiloide cerebral⁴ (AAC), diabetes, malformaciones vasculares y el uso de anticoagulantes o sustancias tóxicas [17], [18], [19].

2.2 Epidemiología

Actualmente, la *Federación Española de Daño Cerebral* (FEDACE) documenta que de los más de 435.000 pacientes con DCA a nivel nacional, el 84% fue provocado por un ictus [20]. Esto supone que hay unos 361.500 casos.

La edad es un fuerte factor condicionante, dado que estadísticamente se observa un pico de casos entre los 45 y 59 años y una prevalencia dominante entre los 75 y 89 años. Por otro lado, se observa que el género no es tan determinante, con un 44% de mujeres y un 56% de varones registrados como pacientes por ictus en el año 2021.

Según las cifras publicadas por el IMSERSO de la *Base de Datos Estatal de Discapacidad*, hay un total de 194.054 personas que sufren DCA con un grado de discapacidad reconocido y de ellas, un 43% han sido reconocidas con un grado de discapacidad del 75% o superior [21].

⁴ Patología en la que existen depósitos anormales de proteínas amiloides acumulados en las paredes de los vasos sanguíneos del cerebro debilitándolas.

La prospectiva proporcionada por [22] estima que a nivel europeo la cifra de pacientes aumente en un 3% respecto 2017 y un 27% en cuanto casos prevalentes para 2047, principalmente debido al envejecimiento de la población y a la mejora de las tasas de supervivencia.

De hecho, el estudio [2] realizado en 2016 consistió en el seguimiento durante 15 años de pacientes de ACV. Tras este periodo de tiempo se comprobó que al menos dos tercios del grupo de pacientes informaron una discapacidad significativa que interfería con el desempeño independiente de las ACV.

Las cifras nos indican la severidad de la patología actualmente, y explican la necesidad de contar con más apoyo y recursos especializados para mejorar la gestión de los casos.

2.3 Secuelas Motoras

La hemiparesia es la principal secuela post-ictus. Más que a una enfermedad, se refiere a la condición neurológica que dificulta el movimiento de una mitad del cuerpo. Concretamente, a la disminución de la fuerza motora o parálisis parcial que afecta a un brazo y pierna del mismo lado del cuerpo, siendo éste el contralateral al hemisferio afectado, según el eje biomecánico anteroposterior/dorsoventral (plano anatómico sagital) [23].

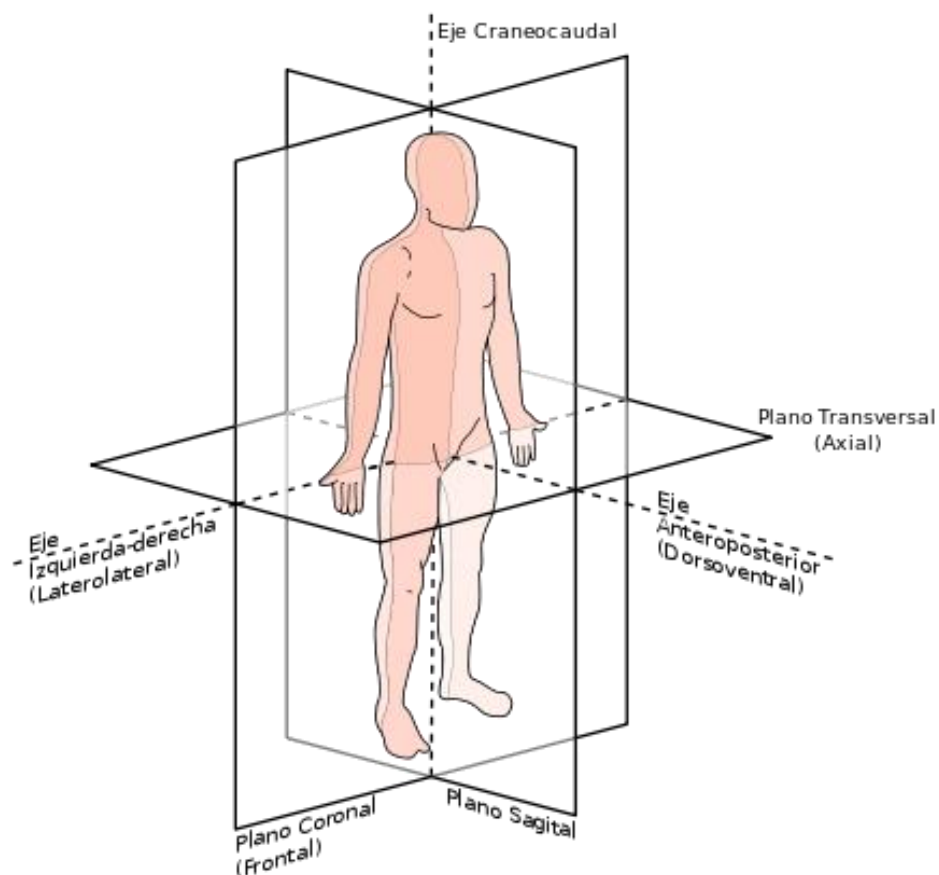


Figura 2. Ejes y planos anatómicos [24].

En cambio, cuando mencionamos la hemiplejía nos referimos a un trastorno en el que la mitad contralateral del cuerpo del paciente está completamente paralizada. Normalmente esta patología viene como resultado de un ACV, aunque también puede aparecer por enfermedades que afecten a la espina dorsal o hemisferios cerebrales.

Estas secuelas suelen venir acompañadas con más sintomatología como la falta de coordinación, apraxia⁵ (muy prevalente cuando el ACV se da en el hemisferio izquierdo), déficit del control postural y trastornos del equilibrio dinámico y estático. Éstas se relacionan con daños en la región subcortical cerebral (ACV motor puro o sensoriomotor) causados por infarto capsular de vasos pequeños (esto es, de tipo lacunar) [25].

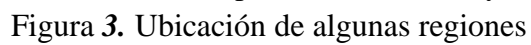
Otra de las más comunes es la sincinesia, que se define como un fenómeno neurológico en el que un movimiento involuntario en una parte del cuerpo ocurre simultáneamente con un movimiento voluntario en otra parte del cuerpo. Este tipo de movimiento sinérgico no deseado suele ocurrir en el proceso de rehabilitación sobre todo a nivel faciobranquial⁶ [19].

2.4 Secuelas Psicológicas, Emocionales y Cognitivas

El conjunto sintomatológico que se describe en el apartado anterior suele provocar que más del 50% de los pacientes de ACV pierdan independencia sobre las AVD y padezcan agnosia⁷. Como consecuencia, tienden a sufrir una depresión caracterizada por el aislamiento social, la incertidumbre y la dependencia física.

La angustia psicológica después de un ACV es otro síntoma muy común. De hecho, la aparición repentina y la posible pérdida del funcionamiento físico implica una transición psicológica en la que se requiere la difícil tarea de un ajuste de la propiocepción del paciente. Estos pacientes también suelen sufrir otros trastornos del estado de ánimo y cognición asociados con malos resultados de rehabilitación y una participación reducida [26].

La neuropsicología indica que estas secuelas se relacionan con una afección en la arteria cerebral media [25] o bien a la neuroinflamación que persiste en las fases subaguda y aguda por la citotoxicidad que se genera tras el ictus en las regiones corticales y subcorticales [27]. Generan un perfil de pacientes que, aun preservando las vías del habla, tienden a mostrar una personalidad escandalosa y negación sobre su condición de déficit motor, resistiéndose a cualquier intento de facilitar el retorno funcional. A este trastorno se le conoce como anosognosia.

También ocurre cuando el daño se encuentra en las áreas expresiva (de Broca) y/o receptiva (de Wernicke) (ver ) [28].), siendo el síntoma psiconeurológico principal la afasia⁸. Estos usuarios

⁵ Deterioro de la capacidad de poner el pensamiento en acción, es decir, movilidad.

⁶ A nivel de cara y brazo.

⁷ Trastorno neurológico que afecta la capacidad de reconocer y entender estímulos sensoriales específicos.

⁸ Trastorno del lenguaje que produce dificultades para hablar, entender, leer y escribir.

presentan además frustración adicional, síntomas de ansiedad y aislamiento depresivo por la dificultad o incapacidad de comunicación que les supone [25].

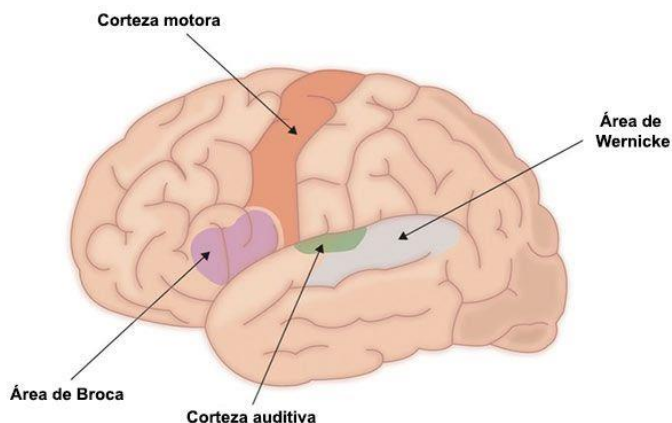


Figura 3. Ubicación de algunas regiones cerebrales [28].

Recogemos en la Tabla 1. Principales secuelas características de pacientes de ACV., a modo de resumen y conclusión las diferentes secuelas que caracterizan a los pacientes que han sufrido un ACV:

Neuromotoras	Neuropsicológicas, emocionales y cognitivas
Hemiparesia	Agnosia
Hemiplejia	Anosognosia
Apraxia	Afasia
Déficit del control postural	Aislamiento depresivo
Trastornos del equilibrio	Neuroinflamación de vías cognitivas
Sincinesia	Negligencia hemispacial

Tabla 1. Principales secuelas características de pacientes de ACV.

2.5 Situación Clínica

De forma tradicional, la rehabilitación de un ictus tiene un enfoque multidisciplinario que integra fisioterapia, terapia ocupacional y logopedia, y se basa en escalas de evaluación funcional, cognitiva, emocional y factores médicos comórbidos (estado de ánimo, apoyo familiar y cuestiones socioeconómicas).

Los métodos de análisis de datos biomecánicos y neuromusculares de las extremidades superiores demuestran correlacionarse con los resultados de las pruebas clínicas [29].

La mayoría de estas escalas se recogen en el modelo *ICF-OMS* [30], [31], [32]. Nos basamos en diversos estudios analizados para este TFG y en el “*Plan de acción general para los servicios del ictus*” de la *WSO*⁹ para recoger algunas de las escalas más utilizadas junto con una descripción sintética en la Tabla 2. Escalas de evaluación de funciones motoras más utilizadas.:

Nombre de la escala	Evaluación
<i>Fugl – Meyer Motor Assessment Upper Extremity (FMA-UE)</i>	Dominio de la función motora y sensorial corporal
<i>Chedoke – McMaster Stroke Assessment (CMSA)</i>	Control muscular, la coordinación, la fuerza y la destreza en las AVD.
<i>Wolf Motor Function Test (WMFT)</i>	Dominio de actividades motoras específicas, como alcanzar, agarrar, manipular objetos y mover el brazo y la mano en diferentes direcciones y movimientos en AVD.
<i>Modified Ashworth Scale (MAS)</i>	Tono muscular en pacientes con trastornos neurológicos (resistencia al estiramiento pasivo).
<i>Cuestionario ABILHAND</i>	Efecto de la discapacidad en la movilidad de la mano en las AVD.
<i>Tonic Stretch Reflex Threshold (TSRT)</i>	Evaluación objetiva de la espasticidad.
<i>Action Ressearch Arm Test (ARAT)</i>	Dominio de actividad: destreza y la capacidad de control motor de la mano y el brazo afectados.
<i>Stroke Impact Scale (SIS)</i>	Evalúa la discapacidad y la calidad de vida de forma multifactorial.
<i>QMSMAL</i>	Evaluación del grado de uso del miembro parético en las AVD.
<i>Functional Independence Measure (FIM)</i>	Nivel de independencia funcional motora y cognitiva en las AVD.

Tabla 2. Escalas de evaluación de funciones motoras más utilizadas.

El entrenamiento convencional de las extremidades superiores en estos pacientes consiste en ejercicios de estiramiento muscular, ejercicios articulares, de fortalecimiento muscular y práctica de las AVD [33]. La mayoría de estas terapias se basan en interacciones manuales entre los pacientes y los terapeutas, que pueden ser exhaustivas para el profesional y desmotivadoras o engorrosas para el paciente [9].

⁹ *World Stroke Organization*. Cada uno de los planes que publica desde el año 2014 se adapta a cada región y/o país de forma específica.

En [4] se menciona una conclusión a la que llevan muchos de los estudios revisados en este TFG y situación que intenta mejorar la incorporación de robótica y gamificación en el proceso de rehabilitación, y es que debido a la monotonía de los métodos tradicionales y la lentitud de mejora en las condiciones de los pacientes, algunos de los individuos terminan por dejar de asistir por completo o bien son dados de alta en hospitales y unidades de rehabilitación clínica cuando se agotan las capacidades terapéuticas y las posibilidades de recuperación funcional se ven disminuidas.

El objetivo terapéutico sin duda es lograr el mayor nivel de independencia del usuario, ayudándolo a adaptarse a su nuevo estilo de vida. Aunque si bien es verdad que el paciente ha de estar motivado, también ha de ser realista. De lo contrario la negación excesiva o los objetivos poco realistas pueden ser trágicos tanto en términos funcionales como psicológicos.

La terapia comienza durante el ingreso hospitalario (fase subaguda), ya que ha de darse de la forma más precoz posible [30]. El grado de recuperación se ve afectado por la edad, magnitud de déficit inicial, condición médica del paciente, su motivación y en la de sus familiares [25]. En [30] se especifica “*Es esencial incluir en el grupo¹⁰ a supervivientes de un ictus, familiares y cuidadores informales*”.

Como ya se ha mencionado anteriormente, son varios los estudios que han comprobado el resultado y efecto de la incorporación de sistemas robóticos en la rehabilitación de los pacientes de ACV. Encontramos en [30] que uno de los puntos que se valoran como esenciales para la efectividad del tratamiento es el uso de dispositivos especializados. La tendencia es combinar estos sistemas con la RV, RA y juegos personalizables [34].

En lo que la terapia robotizada implica, ha conseguido demostrar que, aunque no haya diferencias significativas en la ampliación de rango de movimiento (ROM¹¹) según se use terapia convencional o combinada con robótica médica [7], [33], sí que desencadena satisfactoriamente mejoras funcionales motoras y es un potente catalizador de la transición de la clínica al domicilio. La diferencia radica en que, además, aumenta el interés la satisfacción y adherencia del usuario al proceso de rehabilitación [18], [34].

De hecho, recientemente el estudio [35] diseñó un novedoso proyecto que consistió en la monitorización y análisis de las expresiones faciales a lo largo de cada sesión de rehabilitación gamificada con RV mediante sensores basados en cámaras infrarrojas. Los hallazgos de este estudio corroboraron la eficacia de la RV como herramienta para fomentar la motivación y mejorar tanto el compromiso como el estado emocional entre los pacientes que habían sufrido un ACV involucrándolos activamente.

También cabe destacar que el objetivo de una terapia robotizada, contrariamente a lo que se suele pensar, no pretende la sustitución de los terapeutas sino más bien aliviar la carga

¹⁰ Grupo de rehabilitación.

¹¹ Del inglés *Range Of Movement*, cantidad de movimiento que una articulación puede realizar en diferentes direcciones.

clínica, mejorar la precisión de la monitorización de los parámetros cinemáticos y el análisis del progreso del usuario. En [4] se explica la importancia de una terapia con enfoque humanizado (la figura del terapeuta no es solo adyuvante¹² durante la sesión de terapia, sino que crea apoyo social y ambiente hospitalario acogedor y motivador tanto para el paciente como para la familia) y en [36] se señala que la tecnología robótica puede ayudar a los terapeutas aliviando tareas repetitivas, monótonas y demandantes físicamente, permitiéndoles centrarse en aspectos más cualitativos y personalizados del tratamiento.

Como afirma [37], el uso intensivo y exclusivo de herramientas tecnológicas en la atención sanitaria puede hacer que la relación entre los profesionales de la salud y los pacientes sea más impersonal (menos humanizada y particularizada a las capacidades neuropsicológicas del paciente), influyendo negativamente en la respuesta a la terapia.

Estos estudios concluyen con que la relación entre el paciente y el terapeuta, es decir, la hospitalidad, participación e implicación del profesional durante la terapia también es un factor crítico para que la terapia robotizada y gamificada a la vez resulte atractiva y motivadora para una práctica duradera, alcanzando así mejores resultados y de forma más rápida.

Al menos, según la literatura disponible, está comprobado de forma certera que la terapia con robots es capaz de, como mínimo, producir los mismos beneficios motores y funcionales que la convencional cuando se usa sólo de este tipo, y mayores cuando ambas son combinadas [38]. Para una mejor comprensión, comparamos en la Figura 4 ambos tipos de terapia a nivel de fases:

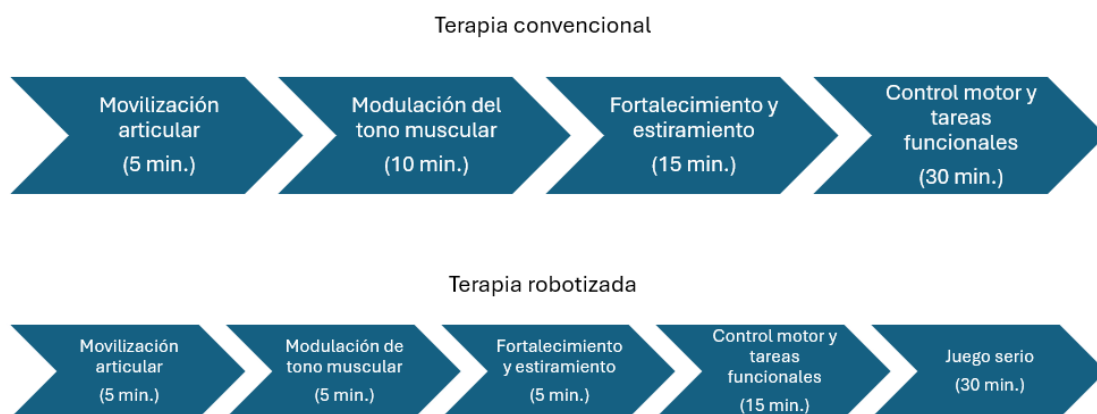


Figura 4. Comparación de las fases de protocolos según la modalidad de la terapia [14].

El hecho de que la neurorrehabilitación se basa en gran medida en la experiencia del terapeuta genera incertidumbre sobre la metodología, e incluso sobre qué papel se le debe otorgar al sistema robótico, y esto puede influenciar en la valoración objetiva del beneficio de la integración de la terapia robotizada y gamificada [29]. En cambio, la robótica de

¹² En terapia, aquella persona que ayuda, asiste o colabora.

neurorrehabilitación tiene el potencial de realizar una evaluación más precisa y sensible de la función motora para evaluar el estado del paciente, medir el progreso de la terapia o brindar al paciente y al terapeuta retroalimentación en tiempo real sobre el desempeño del movimiento [36], [39].

Como último apunte, las secuelas anteriormente mencionadas y el creciente número de supervivientes de ACV añaden costes y presión sobre los servicios de salud para brindar asistencia a estos pacientes [9]. Concretamente, se estima en escala global que la cifra de pacientes aumente un 35% en los próximos años [32], lo cual contribuiría adicionalmente al cese de la actividad terapéutica por parte del paciente por un alta precoz debido a la limitación de espacio físico [4].

Por estas razones se debería incluir el apoyo tecnológico que supone el uso de terapias basadas en la cooperación entre la robótica, la gamificación y el análisis computacional de datos.

3 Neurorrehabilitación y Neuroplasticidad

La recuperación posterior a un ictus es compleja y depende de diversos factores neurobiológicos, tales como el tamaño de la lesión, su ubicación específica, la edad, las condiciones comórbidas, la gravedad general de los síntomas, los medicamentos activos y los componentes genéticos [40].

Dada la localización de las lesiones causadas por el ACV, resulta imperativo considerar la base neurobiológica de la rehabilitación, la cual encuentra sustento en el funcionamiento de las neuronas espejo. Estas neuronas posibilitan a los humanos y primates comprender las acciones que observan en otros y, posteriormente, imitarlas. Este concepto ha tenido un impacto significativo en el ámbito de la rehabilitación del ACV, al ofrecer un medio para reeducar el funcionamiento de las extremidades afectadas [15]. Recientemente se ha descubierto que la mejora funcional resultante no radica tanto del surgimiento de nuevas conexiones sinápticas, sino más bien del destape de redes motoras redundantes y la reorganización de áreas cerebrales circundantes a la zona lesionada [41], [42].

El estudio [43] observó mediante resonancia magnética el procesamiento visiomotor que incluye observación de la acción, planificación de la acción orientada a objetos y retroalimentación de la acción exitosa, y se comprobó que el lóbulo parietal inferior y la circunvolución frontal inferior son más activos durante los periodos de ejecución, observación e imaginación de las acciones dirigidas a un objetivo. De esta forma se cree que la activación de neuronas espejo en estas secciones del cerebro (coincidentes con las que suelen estar más dañadas en estos pacientes [16]) pueden ayudar en la rehabilitación del ACV.

Con el fin de determinar las técnicas más efectivas y eficientes, una rama de estudio se ha centrado en probar diferentes metodologías relacionadas con el *biofeedback*¹³ y neuronas espejo, en el que la retroalimentación ha resultado ser un componente esencial. En todas ellas se incluye la optimización de la contracción muscular y la eliminación de movimientos pasivos y sincinesia [19].

Actualmente existen tres escuelas de pensamiento teórico-prácticas que subyacen a la rehabilitación de los déficits neurológicos:

1. Rehabilitación de los procesos cognitivos mediante estimulación no específica.
2. Rehabilitación mediante la estimulación específico del trastorno, ya sea con un enfoque restaurativo (recuperación) o sustitutivo (compensación).
3. Estimulación de las capacidades residuales y no del trastorno en concreto, superando así las dificultades y efectos inhibidores, garantizando la mayor autonomía posible.

Nosotros nos basamos en la tercera tal como se hizo en [44], creando un SGHR y usando M3Rob de forma que se le permita al paciente recuperar la funcionalidad y encontrar vías neurológicas alternativas a las tradicionales dañadas por el trauma sufrido, enriquecido con estímulos visuales y contenido evocador que despierte el interés del paciente.

Basándonos en [40], diferenciamos entre tres modalidades de neurorrehabilitación para aclarar conceptos:

1. Neurorrehabilitación gamificada no robótica (NGnR): las acciones del juego son controladas por dispositivos electrónicos de consumo.
2. Neurorrehabilitación gamificada robótica (NGR): habilitada por robots donde las acciones dentro del videojuego están controladas por los movimientos de las extremidades, que son habilitados o resistidos por un el efector de un dispositivo robótico.
3. Neurorrehabilitación gamificada por realidad virtual inmersiva (NGRVI): el usuario experimenta un entorno totalmente inmersivo y artificial.

¹³ Técnica basada en un sistema de sensores somáticos gracias a los cuales el paciente es consciente en tiempo real de varios parámetros fisiológicos que describen el funcionamiento del cuerpo.

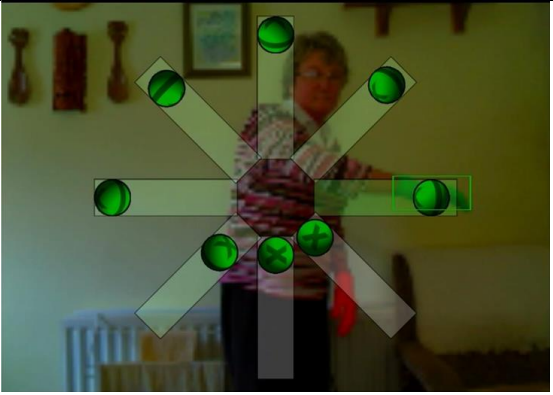


Modalidad de neurorrehabilitación	Ejemplo
NGnR	 <p data-bbox="1078 692 1134 723">[45]</p>
NGR	 <p data-bbox="1078 1178 1134 1209">[46]</p>
NGVRI	 <p data-bbox="1086 1572 1126 1603">[8]</p>

Tabla 3. Ejemplos prácticos de cada modalidad de neurorrehabilitación gamificada.

En este punto cabe mencionar que cuando hagamos referencia a cada una de ellas se hará explícita la clasificación, dado que el resultado del presente TFG se centra y clasifica en lo que sería la NGR.

La NGnR es adecuada en aquellos casos donde las limitaciones físicas experimentadas por el paciente no existan o sean mucho menores, ya que el hecho de no contar con un apoyo mecánico, como un exoesqueleto, algunos usuarios finales se pueden frustrar al no poder realizar con fluidez los movimientos que se piden. Además, las métricas

de rendimiento informadas por las plataformas puede que no sean lo suficientemente detalladas para informar el progreso y proporcionar retroalimentación adecuada tanto a los terapeutas como a los pacientes que padecen secuelas motoras y/o cognitivas más severas.

Por su parte, la neuroimagen funcional y modelos han podido reafirmar la efectividad y los resultados positivos de la robótica combinada con la RV [42]. Se constituye así una base consistente y necesaria para ayudar a la neurociencia a comprender los mecanismos subyacentes que hay detrás de la mejora y cuantificar la contribución de la incorporación de estas nuevas tecnologías y las diversas modalidades de terapia.

Sobre 2016, todavía era firme la convicción de que se podían obtener mejores resultados y más duraderos al volver a enseñar a las extremidades paréticas¹⁴ en la fase aguda o subaguda (ver Figura 1), que ciertamente, es neurológicamente más plástica [11], [38], [47]. Sin embargo, ya se sabe hoy en día que lo mejor es empezar en esta fase y continuar el entrenamiento de forma más intensa y consciente en la fase crónica. Así se consigue dar continuidad al habituamiento a las AVD y evitar la pérdida de esta ganancia funcional y motora [40], siendo en sí igual de importante contra la anterior convicción de no obtener resultados más allá de los 3 meses¹⁵. En el estudio [48] se comprobó que alrededor del 90% de los pacientes con ictus recuperan las funciones motoras de forma proporcional con respecto al nivel inicial de deterioro, alcanzando aproximadamente el 70% de su recuperación potencial máxima en un plazo de 3 a 6 meses desde que sufrieron el ictus. Es decir, si bien es crucial la incorporación de la terapia en las primeras semanas tras el evento de forma intensiva, ya que cataliza la recuperación de las capacidades motoras, se ha de hacer hincapié también en el mantenimiento de la práctica de actividades rehabilitadoras en la fase crónica.

La NGR es capaz de aumentar el tiempo de terapia por el aumento de probabilidad de diversos factores de los que depende la adherencia del paciente:

- Iniciar una sesión de terapia: compromiso.
- Permanecer en la terapia: mayor compromiso y retraso de la desconexión.
- Regresar para otra sesión: reinvolucrarse.

Se considera que la motivación, también puede venir influenciada por la motivación intrínseca, conocimientos tecnológicos y deterioros cognitivos o mentales subyacentes. Al plantear un videojuego competitivo, pero no resultar perjudicado ningún adversario ni haber consecuencias físicas ante el error en el entorno virtual son factores que pueden conducir a promover esta motivación (entre otros que se explican en 215), y los tendremos en cuenta en el desarrollo del SGHR que abarca el presente Trabajo.

¹⁴ Referente a aquellas que presentan paresia.

¹⁵ Momento a partir del cual se considera crónico.

4 Biomecánica del Complejo Articular de la Muñeca

4.1 Anatomía

El complejo articular de la muñeca, más conocido como “muñeca”. Consta de (ver Figura 5):

1. *Articulación radiocarpiana* (1) entre la porción inferior del radio y los huesos de la hilera superior del carpo.
2. *Articulación mediocarpiana* (2) entre la hilera superior e inferior del carpo.

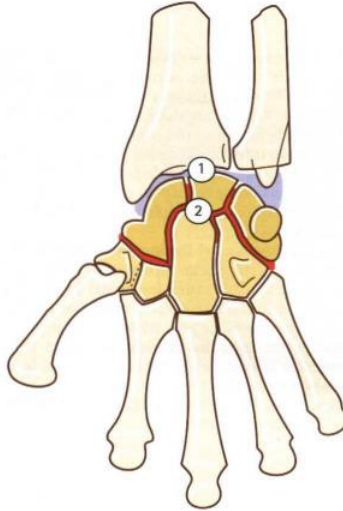


Figura 5. Ubicación de las partes del complejo articular de la muñeca [49].

Autores como Drake et al. [50] plantean que la articulación de la muñeca se establece entre el radio, el disco articular del extremo distal del cúbito y los huesos escafoides semilunar y piramidal, esto es, la articulación radiocarpiana. Sin embargo, en lo que a este TFG respecta, cuando se haga uso del término “muñeca” nos referiremos al complejo articular que se ha explicado anteriormente.

Todas las articulaciones del complejo de la muñeca son de tipo sinovial y, en conjunto, se comportan como una sinovial de tipo elipsoide, como podemos observar también en la Figura 6 . Curvas convexas del complejo [49].:

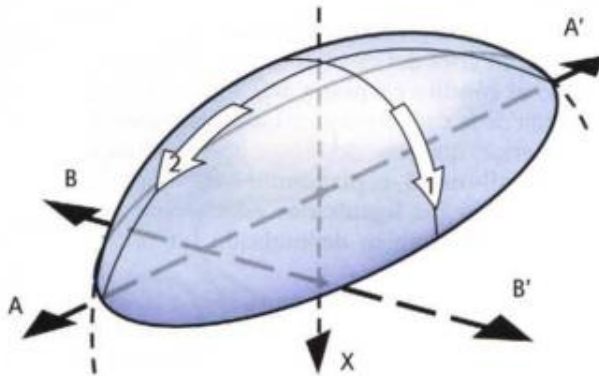


Figura 6 . Curvas convexas del complejo [49].

La primera (A – A', flecha 1) se llama *curva anteroposterior* o *sagital* y es la responsable de los movimientos de flexo-extensión, mientras que la segunda (B – B', flecha 2) es la *curva transversal* y corresponde a los movimientos de aducción – abducción.

4.2 Rangos de Movimiento Fisiológicos

Consta de dos grados de libertad (GdL) y por consiguiente los movimientos propios de la articulación radiocarpiana son la flexión, extensión, abducción y aducción, es decir, abarcan dos planos (. Movimientos propios de la muñeca [51]). Estos dos últimos movimientos también se pueden llamar desviación radial o ulnar/cubital respectivamente, dependiendo de la literatura.

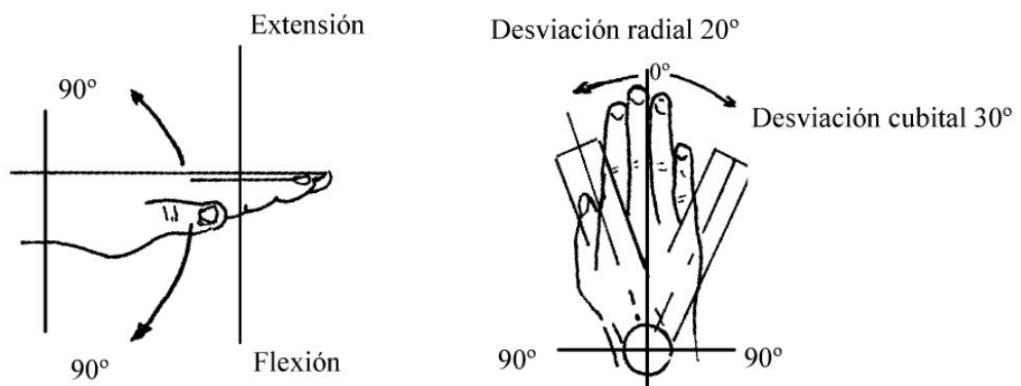


Figura 7. Movimientos propios de la muñeca [51].

Encontramos en libros de anatomía como “*Anatomía general y aparato locomotor*” por Schünke et al. [51] valores de referencia en el ROM de la articulación (Tabla 4. ROM de articulación radiocarpiana.):

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

Tabla 4. ROM de articulación radiocarpiana.

Cuando combinamos estos dos grados de libertad junto con la pronación-supinación (movimiento propiamente del complejo articular del codo) conseguimos desencadenar en la muñeca un movimiento complejo reflejado en la muñeca conocido como *cono de circunducción* (Figura 8) cuando alcanza su máxima amplitud [49]. Como curiosidad, este

como no es regular debido a la diferente amplitud de rango en la combinación de movimientos anteriormente descritos.

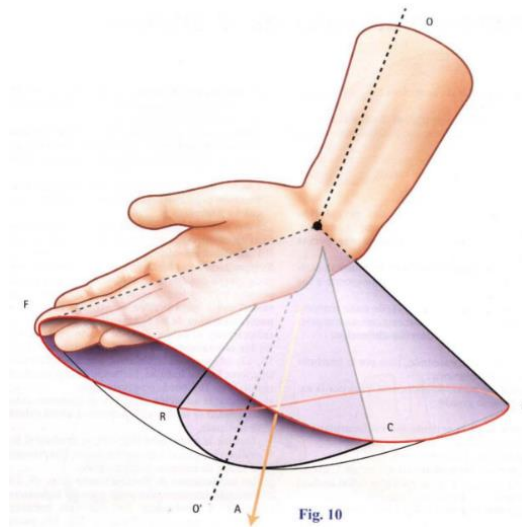


Figura 8. Circunducción de la muñeca [49].

5 RV, RA y gamificación

El uso de la RV y la RA parece tener una profunda influencia positiva en la activación de áreas específicas del cerebro; de esto surgió la idea de estimular centros nerviosos específicos para recuperar la funcionalidad que se había perdido paulatinamente debido a enfermedades o eventos traumáticos [44].

La RV puede considerarse una versión mejorada de la interacción persona – computadora (HCI¹⁶) en la que el ser humano interactúa con una interfaz tridimensional (3D) y se sumerge en un entorno sintético compuesto por objetos digitales usando apoyos audiovisuales como pantallas, auriculares, etc.

Según los estudios, podemos abarcar dentro del concepto de RV para neurorrehabilitación gamificada diferentes formas de implementación, como la no inmersiva (monitor de ordenador, una única modalidad sensorial [38]), semiinmersiva (efector y/o sensor y monitor [14]) o bien inmersiva (efector y/o sensores, juntamente con cascos o gafas¹⁷ [8]) de forma que implica señales visuales, auditivas y vibrotáctiles [40].

Estas tecnologías se implementan también en los sistemas de apoyo robóticos para la rehabilitación para gamificar la terapia aprovechando su versatilidad, creando así entornos de rehabilitación modificables y personalizables [38]. Según muchos artículos como [52], la gamificación asistida por robot de forma combinada con estrategias de tratamiento adicionales y soluciones basadas en la neurotecnología podría mejorar aún más notablemente

¹⁶ Del inglés *Human – Machine Interface*.

¹⁷ Los sistemas más populares son *Oculus Rift* y *Sony Morpheus* [38].

el resultado de pacientes cuyo objetivo clínico es mejorar la actividad de las extremidades superiores.

Los pacientes que sufren síntomas como resultado de un ACV son capaces de usar las neuronas espejo para aprender los movimientos como se ha mencionado anteriormente, y además distinguir detalles cinemáticos en los movimientos observados.

Su capacidad para distinguir la fluidez del movimiento, sin embargo, puede ser más variable que la de los individuos sanos, lo cual se asocia a una menor tolerancia a las distracciones como consecuencia del funcionamiento cerebral alterado. En este sentido, hay evidencia de que el entorno de un videojuego adaptado a través de una pantalla, al mostrar solo la información cinemática más importante (representación básica del movimiento, trayectoria de la extremidad) involucrada da como resultado una comprensión más precisa del movimiento por parte de los participantes [38].

Hay estudios como [16] que han indicado que la rehabilitación mediante RV no solo obtiene resultados iguales que una terapia convencional, sino que además la supera en varios sentidos:

1. Entorno controlado de trabajo del paciente y terapeuta
2. Retroalimentación dinámica inmediata
3. Aprendizaje progresivo
4. No hay consecuencias físicas por errores, lo cual estimula a los pacientes a la adherencia sin temor a las consecuencias del fracaso
5. Estimulación multimodal
6. Repetibilidad
7. Personalización de la configuración y tareas según las necesidades de los usuarios.

El motivo del diseño de tareas repetitivas proviene de las investigaciones neurológicas, que señalan que la plasticidad neuronal necesita de repeticiones considerables durante un periodo prolongado de tiempo para mejorar la función en una extremidad parética [38].

Cabe mencionar que la diversidad de tecnologías que cumplen con la definición de RV, como videojuegos (por ejemplo, *Nintendo Wii* y *Microsoft Xbox Kinect*) y sistemas de neurorrehabilitación específicos, hace que las revisiones sistemáticas y los metaanálisis lleven a conclusiones inexactas sobre la eficacia relativa de diferentes enfoques para la neurorrehabilitación gamificada.

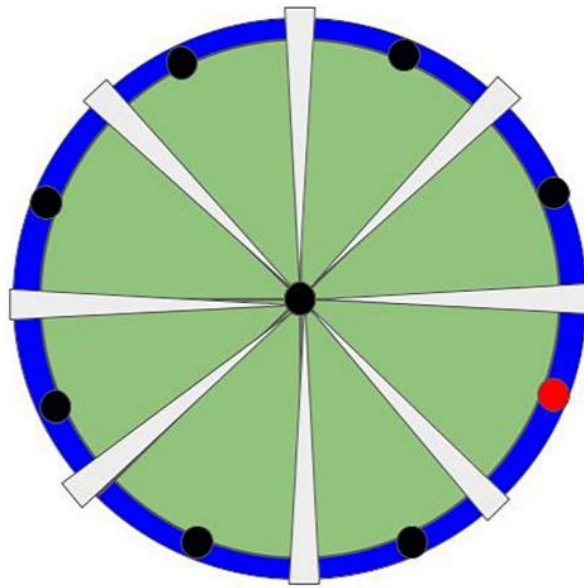
Como apunte, en este TFG se diferencia entre los videojuegos comerciales como los mencionados y no se tendrán en cuenta cuando se haga referencia a RV, en relación con los SGHR, ajustándonos al fin terapéutico para pacientes de ACV con materiales y métodos propios de la neurorrehabilitación [8], [14], [38], [40].

Cuando se agrega más realismo (por ejemplo, con la inclusión de objetos tangibles o físicos en el mundo virtual) la tecnología pasa a ser denominada RA. Respecto la NGVRI

encontramos en el estudio [53] un análisis exhaustivo del estado del arte sobre esta metodología de neurorrehabilitación.

Si bien es verdad que es mucho más inmersiva, se ha observado que puede inducir mareo, dolores de cabeza transitorios o desorientación en los pacientes durante y después de la terapia, los cuales la definen como “abrumante” e “intimidante” [[8]. De hecho, en [38] se señala “*los investigadores que utilicen esta tecnología deberían tener un mínimo de precaución*”.

El grado de gamificación que encontramos en los estudios es muy variable. Van desde los juegos más simplistas hasta diseños más sofisticados:



(a) Juego simple comúnmente usado en terapias robóticas en el que el objetivo es alcanzar el punto rojo [40].



(b) Juego de exprimir naranjas para la plataforma robótica RobHand [18].

Figura 9. Juegos de diferentes estudios con metodologías más sencillas.



(a) Harpy Game usado en el estudio [4].



(b) Juego de persecución de objetivos por medio de un avión usado en [40].

Figura 10. Ejemplos de juegos más elaborados en cuanto a objetivos y diseño.

La gamificación asistida por robots combinados con estrategias de tratamiento adicionales y soluciones basadas en la neurotecnología podría mejorar aún más el resultado de los pacientes cuyo objetivo clínico es mejorar la actividad de las extremidades superiores tras un ACV [52]. Por lo comprobado en los resultados comparativos entre una formación gamificada y no gamificada en este estudio, la primera destaca por:

- Mayor control del rendimiento motor durante el entrenamiento.
- Mayor precisión, menor desviación.
- Mayor suavidad, esto es, menor sacudida.

Se han estudiado también los efectos conductuales y neurofisiológicos (cognitivos, motores y afectivos) que inducen los videojuegos. Una de las conclusiones, es que es probable que estos efectos estén relacionados con alteraciones del procesamiento neuronal en el cuerpo estriado ventral (VS), que es el área involucrada con las vías dopaminérgicas y asociada con el procesamiento de la recompensa y la motivación [54].

Los estudios PET¹⁸ han conseguido demostrar por su parte que jugar a videojuegos conducía a un aumento sustancial en la liberación endógena de dopamina estriatal¹⁹ (un estímulo que produce un patrón de actividad cerebral comparable a las inyecciones de amfetamina y metanfetamina). Otros concluyen que se percibe en los jugadores una mejora en la atención visiomotora y cognitivomotora, con mejoras potencialmente duraderas que pueden trasladarse del juego a las AVD. En general, se resalta una mejor integración entre las áreas atencionales y sensoriomotoras, así como mejora de la atención visual periférica.

Los aumentos volumétricos en el hipocampo y lóbulo temporal sugieren mejoras en las actividades visioespaciales y de navegación, así como los cambios en el área prefrontal están relacionados con mejoras en el control cognitivo y memoria de trabajo [54].

Por último, las terapias gamificadas pueden conducir a un mayor reclutamiento cortical²⁰ para optimizar la neuroplasticidad, especialmente cuando se combina con la práctica de habilidades motoras [55].

Todos estos efectos que han sido estudiados de la gamificación pueden integrarse en los paradigmas existentes de la neurorrehabilitación de ACV siempre y cuando tengamos en cuenta que este juego se ha de enmarcar en lo que ya hemos denominado anteriormente SGHR. Haciendo esta simbiosis se consigue generar una herramienta potencialmente productiva desde una perspectiva clínica.

6 Materiales y Metodología

6.1 Sistema M3Rob

La rehabilitación robótica después de un ACV ofrece la posibilidad de aumentar y controlar cuidadosamente la dosis de la terapia [11]. Concretamente, el beneficio de los robots de rehabilitación del control motor en pacientes de ACV es doble [56]. Por un lado, pueden proporcionar mediciones objetivas del curso temporal de los cambios en el control motor de la extremidad afectada. Por otro lado, los robots con motores activos pueden programarse para implementar variedad de movimientos y protocolos de entrenamiento altamente reproducibles y repetitivos, lo que permite a los pacientes practicar de forma

¹⁸ Del inglés *Positron Emission Tomography*, Tomografía por Emisión de Positrones: técnica de imagen médica que permite visualizar procesos metabólicos en el cuerpo mediante la detección de positrones emitidos por un radiofármaco administrado al paciente.

¹⁹ Aquella que actúa en el cuerpo estriado del cerebro.

²⁰ Proceso mediante el cual el cerebro activa áreas adicionales de la corteza cerebral para compensar la disfunción en otras áreas, limitando el impacto del daño estructural durante la progresión de la enfermedad.

semiautónoma su entrenamiento [36], [57]. Ejemplos de estas mediciones, entre muchas otras son:

1. Duración, linealidad y simetría del movimiento.
2. Tiempo necesario para alcanzar un objetivo.
3. Número de picos de velocidad.
4. Fuerza asistencial necesaria para completar un objetivo.

El módulo de rehabilitación física del proyecto M3Rob es un sistema robótico háptico con un exoesqueleto de mano y un módulo activo de muñeca (en el que nos centraremos) que es capaz de brindar asistencia dinámica para realizar movimientos mano-muñeca en las actividades terapéuticas (activas y pasivas) e intentar mejorar la espasticidad²¹ de los pacientes tras un ACV [12].



Figura 11. Estructura M3Rob.

A diferencia de la mayoría de los antecedentes de robots de rehabilitación (basándonos en los recogidos por [58], [59] y otros estudios que se mencionan durante este TFG), M3Rob asiste y monitoriza los movimientos de pronación/supinación (PS), flexión/extensión (FE) y desviación ulnar/radial (UR) de forma conjunta (3 GdL) y además incorpora un sensor de fuerza en el mango [60].

²¹ Trastorno motor caracterizado por un aumento anormal del tono muscular y una hiperexcitabilidad del reflejo de estiramiento muscular.

TABLE I
SUMMARY OF WRIST REHABILITATION ROBOTS

Device Name	DOFs	Actuation Type	Control Method	Feedback Signal	Experimental Evaluation
MIT robot	Three	Servo motors	Impedance control (AAN)	Load cell, encoders	36 Stroke participants
IIT Genova Robot	Three	DC motors	Impedance control (AAN)	Load cell, encoders	9 Stroke participants
UTM Robot	Three	Not Provided	PD Trajectory Tracking	Not Provided	7 Stroke participants
Haptic Knob	Two	DC motors	Impedance control (AAN)	Load cell, encoders, BCI	15 Stroke participants
Free University Berlin Robot	One	DC motor	PD Trajectory Tracking	Load cell, encoders	12 Stroke participants
University of California Robot	One	DC motor	PD Trajectory Tracking	Load cell, encoders	3 Healthy participants
WReD	One	Servo motor	Impedance control (AAN)	Torque sensor, encoder	1 Healthy participant
UHD	Three	SEA	Impedance control (AAN)	Linear potentiometer	1 Stroke participant
RiceWrist	Three	DC motors	MPC control (AAN)	Load cell, encoders	5 Healthy participants
SNU Robot	One	DC motor	Not Provided	Torque sensor	20 Stroke participants
Kyushu University Robot	Two	Linear motors	Not Provided	Load cell, camera	1 Healthy participant
Sheffield University Robot	One	DC motor	Not Provided	Rotary potentiometer	23 Stroke participants
McGill University Robot	Two	Servo motors	PI Trajectory Tracking	Load cell, potentiometer	1 Healthy participant
Northwestern University Robot	One	DC motor	Impedance control (AAN)	Load cell, potentiometer	3 Stroke participants
Harvard University Robot	Three	PMA	Not Provided	Not Provided	1 Healthy participant
WRES	Three	SEA	Trajectory Tracking	Encoders	1 Healthy participant
ARMin	One	Servo motors	Impedance control (AAN)	Load cell, potentiometer	4 Stroke participants
Omega.7	Three	Servo motor	Virtual Reality (AAN)	Not Provided	7 Stroke and 3 TBI participants

Abbreviations: UHD: universal haptic drive; SEA: series elastic actuators; PMA: pneumatic muscle actuators; AAN: assist-as-needed; MPC: model predictive control; PD: proportional derivative; PI: proportional integral; TBI: traumatic brain injury; BCI: brain computer interface; WReD: wrist rehabilitation device.

Figura 12. Tabla de antecedentes robóticos para la muñeca analizada por [59].

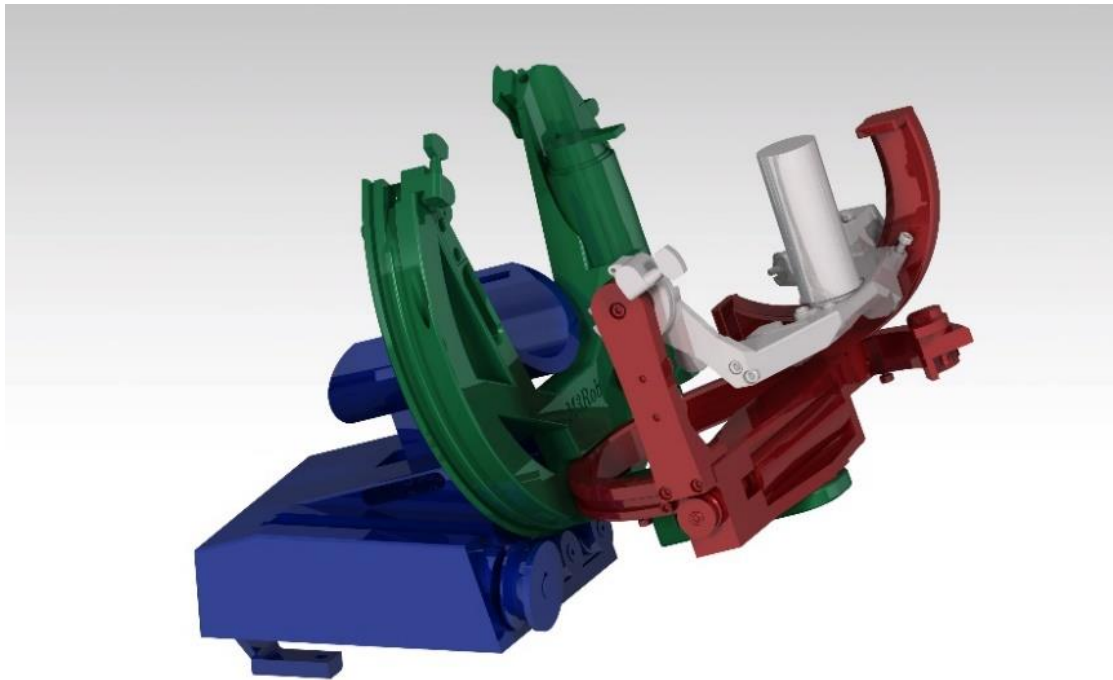


Figura 13. Modelo CAD del módulo del dispositivo robotizado M3Rob.

En él establecemos los siguientes sistemas de coordenadas de acuerdo con la metodología de *Denavit-Hatenberg* (DH):

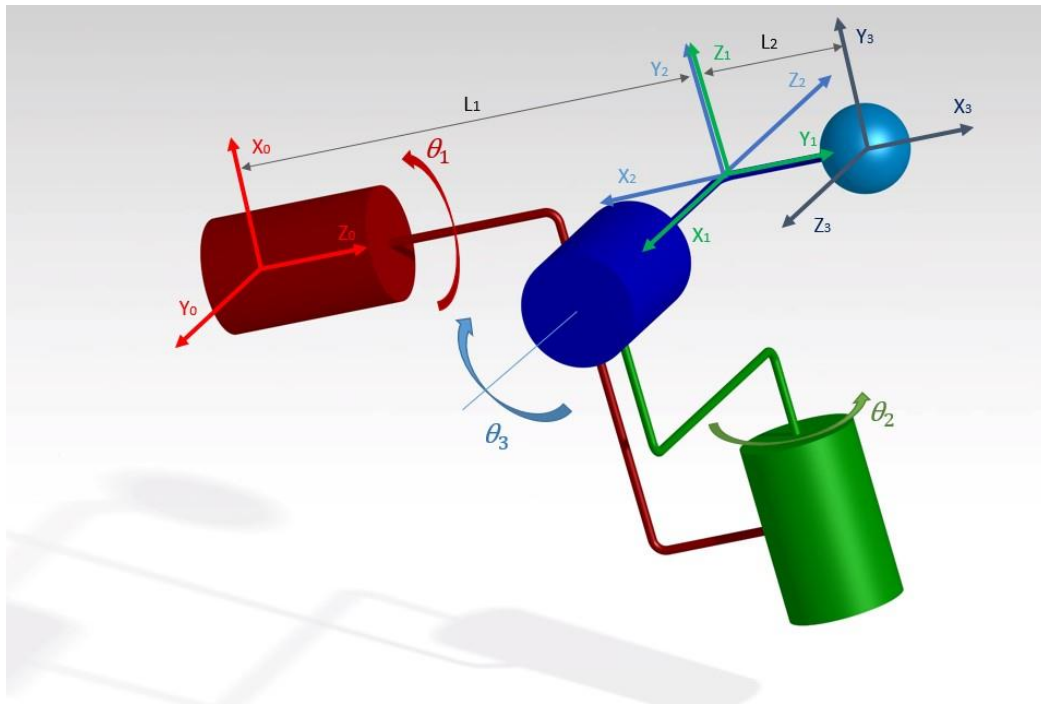


Figura 14. Sistema de coordenadas de M3Rob de acuerdo con el método de DH.

Y su modelo cinemático ha sido determinado mediante el método DH de acuerdo con los sistemas de coordenadas indicados en la

Figura 14, obteniéndose la siguiente Tabla 5 de parámetros correspondientes:

Articulación	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	L1	$90^\circ + \theta_1$	0	90°
2	0°	$270^\circ + \theta_2$	0	90°
3	90°	$180^\circ + \theta_3$	L2	180°

Tabla 5. Parámetros DH del dispositivo M3Rob.

Siendo L1 la distancia entre el codo y la muñeca del paciente (220 ± 14 mm) y L2 la distancia entre el centro de la muñeca y el agarre, es decir, efector de M3Rob (65 mm).

6.2 Unity

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. Es usado por gran cantidad de estudios como [14], [19], [44], [61] por ser una herramienta gratuita, compatible con diversas plataformas y ofrecer cursos de aprendizaje propios que permiten adquirir conocimientos para desarrollar varias facetas del entorno.

Concretamente, la versión utilizada de su editor fue la 2023.2.11f1. Algunos de los cursos formativos realizados previamente al juego que conciertan este TFG fueron “*Create with code*” (35 horas, 10 minutos) y “*Programador junior: ¿Cómo crear con código?*” (12 horas, 25 minutos). Éstos permiten en su conjunto familiarizarse con los siguientes aspectos propios de cualquier videojuego [62]:

1. Control del jugador
2. Jugabilidad básica
3. Sonido y efectos
4. Mecánicas de jugabilidad
5. Interfaz de usuario (IU)

6.3 Desarrollo Software

El motor de juego *Unity* usa programación *C#*. Éste es un lenguaje relativamente fácil de entender teniendo la base de programación de *Python*, *Java* orientado a objetos y *C*. Sin embargo, es necesario practicarlo para el objetivo concreto del diseño de juegos, que requiere programación procedural²² combinada con programación orientada a objetos (POO).

La programación procedural en *Unity* se refiere a la secuencia de instrucciones que manipulan los datos y controlan el flujo del juego, mientras que la programación orientada a objetos se enfoca en la creación y manipulación de objetos que representan entidades en el juego. Esta combinación permite a los desarrolladores crear estructuras de código más flexibles, reutilizables y fáciles de mantener, lo cual es esencial para el diseño eficiente de videojuegos.

Para ello además de revisar la documentación de *Unity* y realizar los cursos propios de la plataforma anteriormente mencionados, también fue necesario realizar el curso “*Experto en Programación Avanzada con Unity y C#*” de la plataforma *Udemy*.

Para dominar *C#* en el contexto del desarrollo de juegos con *Unity*, es crucial no solo revisar la documentación oficial de *Unity*, sino también seguir cursos especializados que aborden los desafíos y técnicas específicas del desarrollo de juegos. La documentación de *Unity* es una fuente inestimable de información que abarca desde los conceptos básicos hasta las técnicas avanzadas, proporcionando ejemplos prácticos y guías detalladas sobre cómo utilizar las diferentes características del motor. Por último, todos los scripts se han diseñado con *Microsoft Visual Studio 2022*.

²² Paradigma de programación que se basa en la ejecución de procedimientos o rutinas con estructura jerárquica.

6.4 Principios de Diseño de un Juego Serio para Neurorehabilitación

Hay diversos artículos, como [9], [11], [16], [32], [45], centrados en buscar las características que debería tener un SGHR de forma que sea adecuado para usuarios con los deterioros motores y cognitivos que caracterizan a los pacientes de ACV. Cada uno de ellos se explicará y cobrará sentido en la explicación del videojuego desarrollado con el TFG. Se han recogido y sintetizado en la siguiente lista:

- Uso del miembro parético.
- Género del juego dentro de la clasificación de casual y “*exergaming*”.
- Perspectiva en primera persona.
- Resaltar las características de la tarea con objetivos llamativos y de tamaño notable.
- Juego significativo con retroalimentación dinámica.
- Estimulación multisensorial con más de un tipo de biorretroalimentación.
- Manejo de fallos, es decir, penalizaciones existentes, pero no excesivas.
- Nivel de dificultad y desafío de manera que, cuando el paciente es capaz de completar un nivel, la posibilidad de practicar uno superior lo alienta a terminar el nuevo nivel también.
- Dificultad creciente.
- Existencia de obstáculos.
- Práctica masiva, esto es, plantear tareas diseñadas para ser repetitivas.
- Dosis de entrenamiento intensivo.
- Práctica estructurada, incluyendo periodos de descanso entre partidas (no en el propio juego).
- Práctica de una tarea específica que sea relevante para mejorar las AVD.
- Práctica variable con diferentes tipos de tareas.
- Cualquier movimiento de la extremidad requerido por la tarea será de corta distancia y/o estará facilitado por fuerzas asistenciales.
- Minimizar de forma relativa la velocidad de los objetos en movimiento (en caso de haberlo) para que sea fácilmente alcanzado o evitado.
- Comentarios implícitos con información del rendimiento en tiempo real.
- Comentarios explícitos al final de la tarea para proporcionar información sobre el desempeño del paciente.

7 Análisis del resultado

Aunque nos acogemos a la confidencialidad del diseño, desarrollo e implementación del SGHR *Bubble Catch* se ha considerado explicar algunos de los aspectos a tener en cuenta que podrían ir bien a futuros desarrolladores de juegos serios en el futuro:

7.1 Detalles de Implementación

7.1.1 Concepto de Singleton

En el desarrollo de juegos con el motor Unity, hay datos y objetos que han de ser persistentes al paso de las escenas. Para ello podemos usar dos formas de implementación:

1. Clases estáticas
2. Clases heredadas de `MonoBehaviour` y utilizar `DontDestroyOnLoad` con el patrón *Singleton*.

Por una parte, las clases estáticas no son gestionadas por Unity, y por lo tanto no son susceptibles al paso de las escenas. Esto introduce la desventaja de que siempre son globales, y, por tanto, cualquier elemento público de una clase estática tiene la mayor visibilidad posible en el proyecto. Además, inicializar objetos estáticos es complicado y al no heredar de `MonoBehaviour` no tiene funciones como `Start`, `OnEnable` o `Update`, y esto limita su interacción con el mundo. Sin embargo, tienen la ventaja de que son muy sencillas de implementar y utilizar.

Por otro lado, hay que tener cuidado con su implementación puesto que es fácil exceder de su uso pudiendo crear ambigüedades entre herencias y dependencias.

La instancia del *singleton* tiene que vivir en algún sitio en el mundo de Unity, lo que no representa la realidad. De hecho, `DontDestroyOnLoad` sirve para que nuestro *singleton* no se destruya entre escenas, y por eso un *singleton* convencional no sirve.

```
Script de Unity (1 referencia de recurso) | 8 referencias
public class GameManager : MonoBehaviour
{
    // Singleton
    private static GameManager _instance;
    2 referencias
    public static GameManager Instance
    {
        get
        {
            if (_instance == null)
            {
                _instance = FindObjectOfType<GameManager>();
                if (_instance == null)
                {
                    GameObject go = new GameObject("GameManager");
                    _instance = go.AddComponent<GameManager>();
                }
            }
            return _instance;
        }
    }
    // RESTO DE CÓDIGO (VARIABLES INTERNAS, MÉTODOS, LÓGICA INTERNA)
}
```

Figura 15. Estructura del patrón *Singleton* (Ejemplo *GameManager*)

7.1.2 Unidades Espaciales de Trabajo

A diferencia de los juegos desarrollados por otros estudios en Unity y los previos para M3Rob en el laboratorio de ITAP, en *BubbleCatch* se trabaja en coordenadas polares. Trabajar en coordenadas polares en un juego de Unity mediante un exoesqueleto de muñeca puede ser mejor que usar coordenadas cartesianas por varias razones relacionadas con la naturaleza del movimiento y la ergonomía del usuario.

Aquí se explican las principales ventajas:

- *Movimiento natural y ergonomía:* El movimiento de la muñeca y otras articulaciones humanas es rotacional (tal como se ve en la Tabla 4). Las coordenadas polares se alinean mejor con la manera en que el cuerpo se mueve, facilitando la interpretación y el control del movimiento del exoesqueleto.

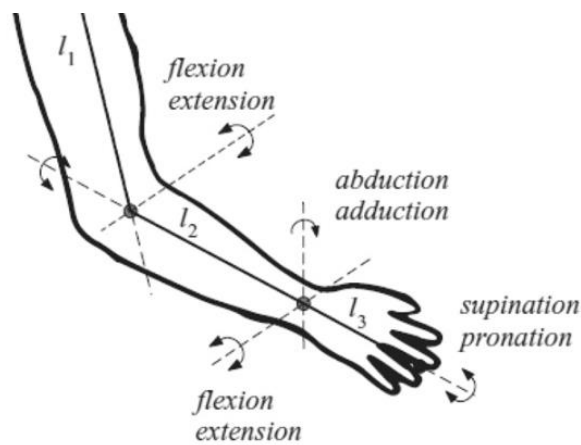


Figura 16. Rotaciones de la mano.

- *Facilita la rotación y la orientación:* En un exoesqueleto de muñeca como M3Rob, el movimiento incluye rotaciones alrededor de un punto fijo (la muñeca). Las coordenadas polares permiten describir fácilmente estos movimientos rotacionales con un ángulo, lo que simplifica la programación y el control.

Describimos por tanto a nivel de código la rotación según los ángulos de Euler (“pitch”, “yaw”, “roll”).

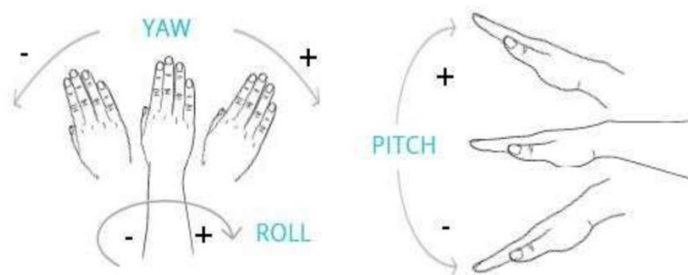


Figura 17. Rotaciones de la muñeca según los ángulos de Euler [63].

- *Simplificación de la Cinemática Inversa:* La cinemática inversa, que se utiliza para determinar las posiciones de las articulaciones a partir de la posición deseada de una extremidad, puede ser más intuitiva y directa en coordenadas polares cuando se trata de movimientos rotacionales. Esto reduce la complejidad de los cálculos necesarios para mover la muñeca a una posición específica.
- *Interfaz Usuario y mapeo directo:* En un entorno de realidad virtual o aumentada, las coordenadas polares pueden facilitar el mapeo directo de los movimientos naturales del usuario al espacio virtual. Esto puede mejorar la precisión y la sensación de inmersión en el juego.
- *Reducción de Transformaciones Complejas:* Las coordenadas cartesianas pueden requerir transformaciones complejas para manejar rotaciones, especialmente en un sistema de múltiples grados de libertad como un exoesqueleto. Las coordenadas polares simplifican estas transformaciones, ya que el ángulo puede cambiar directamente sin necesidad de calcular una nueva posición en el espacio tridimensional.

Sin embargo, trabajar en polares presenta un pequeño inconveniente, y es que *Unity* trabaja solo en coordenadas cartesianas. Sin embargo, esto es solventado trabajando con atributos rotacionales (esto es, la rotación del jugador) en lugar de con su traslación.

En resumen, trabajar en coordenadas polares es más adecuado para los movimientos rotacionales y circulares de la muñeca, simplificando la programación, mejorando la precisión y alineándose mejor con la naturaleza del movimiento humano.

7.1.3 Elementos Estéticos del Juego

La ambientación del ejercicio no requiere un alto nivel de realismo y detalle ya que el usuario debe estar concentrado en el ejercicio y no correr el riesgo de distraerse de la tarea asignada.

Por esto elegimos un fondo neutro y tenue en el que destaquen los objetivos y obstáculos por encima de él, con colores más llamativos y tamaño notable en relación con la pantalla, de forma que suponen un estímulo visual claro.

8 Discusión y Líneas Futuras

Una posible versión futura del juego podría ser su adaptación e implementación en RV mediante el uso de gafas o cascos con controles manuales hápticos, aunque estos serían monitoreados y no comerciales, como se realizó en [8]. Aunque esta tecnología ha mostrado resultados prometedores y es asequible y de fácil acceso, se ha decidido no considerarla por el momento debido a que podría causar desequilibrio y desorientación en algunos usuarios, lo cual representa un riesgo que no estamos dispuestos a asumir en esta etapa.

En el futuro, se podría intentar incorporar al mismo juego algunas tareas diseñadas para entrenar funciones cognitivas como la memoria de trabajo, la orientación visoespacial (encontrar caminos), la atención selectiva (encontrar un personaje virtual con ciertas características), la memoria de reconocimiento (identificación de anuncios exteriores) y el cálculo (retención de dígitos), tal como indica el estudio [16].

Otra posible línea de investigación sería explorar la manera de adaptar este proyecto para su uso domiciliario. Se ha demostrado que, dado el aumento de participación e independencia en las Actividades de la Vida Diaria (AVD), la posibilidad de continuar esta rehabilitación en el entorno doméstico refuerza el sentido de propiedad y control sobre el proceso de mejora [40].

En este TFG se ha desarrollado una forma completa pero sencilla de almacenamiento y visualización de las métricas de rendimiento a nivel clínico del paciente y de desempeño dentro de nuestro SGHR. Esto representa un avance significativo respecto a otros juegos de la misma categoría y permite realizar una evaluación conjunta del periodo de terapia, respaldando así las decisiones del terapeuta a lo largo del tratamiento. Siguiendo el enfoque de [44], al objetivo principal de almacenar, agregar, integrar y modelar los datos recibidos, coincido con [19] en que se podría añadir valor a este TFG mejorando la interfaz de estas métricas mediante técnicas de diseño y *front-end*, para lograr una experiencia más atractiva y visualización intuitiva y accesible para el terapeuta.

La modulación de la dificultad propuesta con el desarrollo de *Bubble Catch* pretende ser una aportación enriquecedora al diseño de los SGHR. Este método no solo permite una refinación dinámica durante la partida, sino que también se ha formalizado de manera continua y no discreta, a diferencia de la mayoría de los estudios y ensayos analizados en este TFG.

Además, a partir de ahora nos planteamos hacer continuos muchos de los parámetros de configuración continuos en vez de discretos, por un tema de modelaje de funciones y métricas. Sin embargo, como primer prototipo de SGHR para la plataforma M3Rob, tanto ITAP como yo estamos satisfechos de poder ajustar la dificultad y la experiencia al paciente de forma mucho más variada de lo que se había hecho antes con un SGHR para este exoesqueleto, y en general, para todos los juegos serios que se explican en la totalidad de artículos revisados y analizados en este TFG.

Trabajar directamente con rotaciones y coordenadas polares resulta particularmente interesante, dado que la mayoría de los juegos utilizan coordenadas cartesianas. Este enfoque

permite una expresión más precisa de los movimientos anatómicos de la extremidad superior debido a la naturaleza de sus articulaciones.

Otra consideración que desarrollar en profundidad en una línea futura de este proyecto es almacenar el perfil de giro aprovechando esta monitorización de coordenadas polares de la muñeca (nos interesarían sobre todo “*pitch*” y “*yaw*” en los ejes X e Y respectivamente). Con esto y aplicando la *Transformada de Fourier* podríamos obtener información relevante a nivel de ingeniería biomédica para:

1. Analizar las componentes de la señal de movimiento en frecuencia y evaluar la fluidez del movimiento o patrones repetitivos.
2. Comparar frecuencias de la TF entre los momentos inicial y final de la terapia para visualizar mejoras/retrocesos en las capacidades motoras del paciente.
3. Diferenciar movimientos sostenidos (sería la componente DC) respecto los transitorios.

La contribución de este TFG al proyecto M3Rob, por tanto, constituye un diseño eficiente, creativo e integrado que mejora la situación epidemiológica actual.

9 Conclusiones

En el contexto epidemiológico actual, tal como se ha expuesto en este TFG, concluimos que el uso de robots de terapia asistida para pacientes crónicos de ACV que padecen hemiparesia o hemiplejia es un campo en pleno desarrollo que enfrenta numerosos retos. Existe una escasez de investigaciones estadísticamente significativas que demuestren la eficacia de la rehabilitación con realidad virtual (RV) para mejorar la función de la mano y la muñeca. Esta carencia se debe, en parte, a la limitada cantidad de pacientes en los estudios y a la falta de estandarización en la aplicación de la terapia y la evaluación de su efectividad, como se puede inferir de la variedad de evaluaciones utilizadas en la Tabla 2 [38]. Este aspecto debería ser una prioridad para la comunidad investigadora, junto con la realización de pruebas de seguimiento que respalden las afirmaciones sobre los efectos terapéuticos a largo plazo.

No obstante, todos los estudios analizados en conjunto demuestran que la combinación de terapia cognitiva, motora y neurológica con gamificación mediante RV no inmersiva tiene un gran potencial para mejorar la independencia de los pacientes en sus actividades cotidianas, así como su estado de ánimo, adherencia al tratamiento y prolongación de las mejoras motoras.

Por ello, las aportaciones diseñadas meticulosamente para el desarrollo de Juegos Serios de Rehabilitación (SGHR) para personas que sufren secuelas de un ACV, desde una perspectiva motora, neurológica, biomecánica y psicológica, son de gran importancia para mejorar la situación epidemiológica actual. Los ingenieros biomédicos, con nuestras

habilidades multidisciplinares en todos los ámbitos mencionados, somos un punto de apoyo crucial para alcanzar estos objetivos y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Referencias

- [1] D. M. Casserly and G. D. Baer, “Effectiveness of commercially available gaming devices in upper limb stroke rehabilitation,” *Physical Therapy Reviews*, vol. 19, no. 1, pp. 15–23, Feb. 2014, doi: 10.1179/1743288X13Y.0000000098.
- [2] S. L. Crichton, B. D. Bray, C. McKevitt, A. G. Rudd, and C. D. A. Wolfe, “Patient outcomes up to 15 years after stroke: survival, disability, quality of life, cognition and mental health,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 87, no. 10, pp. 1091–1098, Oct. 2016, doi: 10.1136/jnnp-2016-313361.
- [3] I. A. Marques *et al.*, “Virtual reality and serious game therapy for post-stroke individuals: A preliminary study with humanized rehabilitation approach protocol,” *Complement Ther Clin Pract*, vol. 49, p. 101681, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ctcp.2022.101681.
- [4] I. A. Marques *et al.*, “Virtual reality and serious game therapy for post-stroke individuals: A preliminary study with humanized rehabilitation approach protocol,” *Complement Ther Clin Pract*, vol. 49, p. 101681, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ctcp.2022.101681.
- [5] G. G. Fluet *et al.*, “Motor skill changes and neurophysiologic adaptation to recovery-oriented virtual rehabilitation of hand function in a person with subacute stroke: a case study,” *Disabil Rehabil*, vol. 39, no. 15, pp. 1524–1531, Jul. 2017, doi: 10.1080/09638288.2016.1226421.
- [6] M. Gustavsson, E. K. Kjörk, M. Erhardsson, and M. Alt Murphy, “Virtual reality gaming in rehabilitation after stroke – user experiences and perceptions,” *Disabil Rehabil*, vol. 44, no. 22, pp. 6759–6765, Oct. 2022, doi: 10.1080/09638288.2021.1972351.
- [7] H. Cinakli, A. Yetisgin, D. Sen Dokumaci, and A. Boyaci, “Effects of adding interactive videogames to conventional rehabilitation program on radiological progression and upper extremity motor function in patients with hemiplegic stroke: a preliminary study,” *Somatosens Mot Res*, pp. 1–9, Apr. 2023, doi: 10.1080/08990220.2023.2194401.
- [8] M. Erhardsson, M. Alt Murphy, and K. S. Sunnerhagen, “Commercial head-mounted display virtual reality for upper extremity rehabilitation in chronic stroke: a single-case design study,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 17, no. 1, p. 154, Dec. 2020, doi: 10.1186/s12984-020-00788-x.
- [9] O. Mubin, F. Alnajjar, A. Al Mahmud, N. Jishtu, and B. Alsinglawi, “Exploring serious games for stroke rehabilitation: a scoping review,” *Disabil Rehabil Assist Technol*, vol. 17, no. 2, pp. 159–165, Feb. 2022, doi: 10.1080/17483107.2020.1768309.

- [10] P. A. Rego, P. M. Moreira, and L. P. Reis, “Proposal of an Extended Taxonomy of Serious Games for Health Rehabilitation,” *Games Health J*, vol. 7, no. 5, pp. 302–309, Oct. 2018, doi: 10.1089/g4h.2017.0138.
- [11] A. B. Keeling, M. Piitz, J. A. Semrau, M. D. Hill, S. H. Scott, and S. P. Dukelow, “Robot enhanced stroke therapy optimizes rehabilitation (RESTORE): a pilot study,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 18, no. 1, p. 10, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12984-021-00804-8.
- [12] “Proyecto M3Rob,” <https://gib.tel.uva.es/m3rob/>. Accessed: Jun. 29, 2024. [Online]. Available: <https://gib.tel.uva.es/m3rob/>
- [13] A. Cisnal, V. Martínez-Cacígal, and G. Alonso-Linaje, “An Overview of M3Rob, a Robotic Platform for Neuromotor and Cognitive Rehabilitation Using Augmented Reality,” XL congreso Annual de la Sociedad Española de Ingeniería biomédica. P. 180-183, 23-25 nov., 2022
- [14] Á. Aguilera-Rubio, I. M. Alguacil-Diego, A. Mallo-López, A. Jardón Huete, E. D. Oña, and A. Cuesta-Gómez, “Use of low-cost virtual reality in the treatment of the upper extremity in chronic stroke: a randomized clinical trial,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 21, no. 1, p. 12, Jan. 2024, doi: 10.1186/s12984-024-01303-2.
- [15] M. Babaiasl, S. H. Mahdioun, P. Jaryani, and M. Yazdani, “A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke,” *Disabil Rehabil Assist Technol*, pp. 1–18, Jan. 2015, doi: 10.3109/17483107.2014.1002539.
- [16] P. Gamito *et al.*, “Cognitive training on stroke patients via virtual reality-based serious games,” *Disabil Rehabil*, vol. 39, no. 4, pp. 385–388, Feb. 2017, doi: 10.3109/09638288.2014.934925.
- [17] C. Martínez, “Íctus, conociendo sus realidades: estudio comparativo de la calidad de vida en personas que sufrieron un ictus isquémico o hemorrágico” Universitat Rovira i Virgili (URV), Tarragona, 2018.
- [18] P. Barria *et al.*, “Hand rehabilitation based on the RobHand exoskeleton in stroke patients: A case series study,” *Front Robot AI*, vol. 10, Mar. 2023, doi: 10.3389/frobt.2023.1146018.
- [19] D. J. Cargnin, M. Cordeiro d’Ornellas, and A. L. Cervi Prado, “A Serious Game for Upper Limb Stroke Rehabilitation Using Biofeedback and Mirror-Neurons Based Training,” *Stud Health Technol Inform*, vol. 216, pp. 348–52, 2015.
- [20] FEDACE, “Estudio: La situación de las Personas con DCA en España.”
- [21] IMSERSO (Instituto de Mayores y Servicios Sociales) and Gobierno de España, “Base Estatal de datos de personas con discapacidad.”

- [22] H. A. Wafa, C. D. A. Wolfe, E. Emmett, G. A. Roth, C. O. Johnson, and Y. Wang, “Burden of Stroke in Europe,” *Stroke*, vol. 51, no. 8, pp. 2418–2427, Aug. 2020, doi: 10.1161/STROKEAHA.120.029606.
- [23] I. Rovira, “Hemiparesia” Rovira, “Hemiparesia” *Psicología y Mente*. <https://psicologiaymente.com/clinica/hemiparesia>
- [24] Wikipedia, “Plano anatómico” https://es.wikipedia.org/wiki/Plano_anat%C3%B3mico.
- [25] R. E. Kelley and A. P. Borazanci, “Stroke rehabilitation,” *Neurol Res*, vol. 31, no. 8, pp. 832–840, Oct. 2009, doi: 10.1179/016164109X12445505689689.
- [26] M. Harrison, T. Ryan, C. Gardiner, and A. Jones, “Psychological and emotional needs, assessment, and support post-stroke: a multi-perspective qualitative study,” *Top Stroke Rehabil*, vol. 24, no. 2, pp. 119–125, Feb. 2017, doi: 10.1080/10749357.2016.1196908.
- [27] T. Wijeratne and C. Sales, “Understanding Why Post-Stroke Depression May Be the Norm Rather Than the Exception: The Anatomical and Neuroinflammatory Correlates of Post-Stroke Depression,” *J Clin Med*, vol. 10, no. 8, p. 1674, Apr. 2021, doi: 10.3390/jcm10081674.
- [28] M. Guerri, “El área de Broca: localización y función” <https://www.psycoactiva.com/blog/area-broca-localizacion-funcion/>.
- [29] R. M. Maura, S. Rueda Parra, R. E. Stevens, D. L. Weeks, E. T. Wolbrecht, and J. C. Perry, “Literature review of stroke assessment for upper-extremity physical function via EEG, EMG, kinematic, and kinetic measurements and their reliability,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 20, no. 1, p. 21, Feb. 2023, doi: 10.1186/s12984-023-01142-7.
- [30] M. Grupper and Organización Mundial del Ictus, “Plan de actuación y directrices generales para el ictus: Plan de acción para una atención de calidad dirigida a los pacientes con ictus.,” Ginebra, Suiza, 2022.
- [31] Organización Mundial de la Salud, *Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud*, Abreviada. 2001.
- [32] I. Doumas, G. Everard, S. Dehem, and T. Lejeune, “Serious games for upper limb rehabilitation after stroke: a meta-analysis,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 18, no. 1, p. 100, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12984-021-00889-1.
- [33] K. W. Lee, S. B. Kim, J. H. Lee, S. J. Lee, and J. W. Kim, “Effect of Robot-Assisted Game Training on Upper Extremity Function in Stroke Patients,” *Ann Rehabil Med*, vol. 41, no. 4, p. 539, 2017, doi: 10.5535/arm.2017.41.4.539.

- [34] O. Mubin, F. Alnajjar, N. Jishtu, B. Alsinglawi, and A. Al Mahmud, “Exoskeletons With Virtual Reality, Augmented Reality, and Gamification for Stroke Patients’ Rehabilitation: Systematic Review,” *JMIR Rehabil Assist Technol*, vol. 6, no. 2, p. e12010, Sep. 2019, doi: 10.2196/12010.
- [35] M. Masmoudi *et al.*, “Assessing the effectiveness of virtual reality serious games in post-stroke rehabilitation: a novel evaluation method,” *Multimed Tools Appl*, vol. 83, no. 12, pp. 36175–36202, Feb. 2024, doi: 10.1007/s11042-023-17980-5.
- [36] M. Iosa, G. Morone, A. Cherubini, and S. Paolucci, “The Three Laws of Neurorobotics: A Review on What Neurorehabilitation Robots Should Do for Patients and Clinicians,” *J Med Biol Eng*, vol. 36, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2016, doi: 10.1007/s40846-016-0115-2.
- [37] E. Lovato *et al.*, “Humanisation in the emergency department of an Italian hospital: new features and patient satisfaction,” *Emergency Medicine Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 487–491, Jun. 2013, doi: 10.1136/emered-2012-201341.
- [38] M. Yates, A. Kelemen, and C. Sik Lanyi, “Virtual reality gaming in the rehabilitation of the upper extremities post-stroke,” *Brain Inj*, vol. 30, no. 7, pp. 855–863, Jun. 2016, doi: 10.3109/02699052.2016.1144146.
- [39] R. Secoli, M.-H. Milot, G. Rosati, and D. J. Reinkensmeyer, “Effect of visual distraction and auditory feedback on patient effort during robot-assisted movement training after stroke,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 8, no. 1, p. 21, 2011, doi: 10.1186/1743-0003-8-21.
- [40] J. Tosto-Mancuso *et al.*, “Gamified Neurorehabilitation Strategies for Post-stroke Motor Recovery: Challenges and Advantages,” *Curr Neurol Neurosci Rep*, vol. 22, no. 3, pp. 183–195, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11910-022-01181-y.
- [41] M. J. Johnson, “Recent trends in robot-assisted therapy environments to improve real-life functional performance after stroke,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 3, no. 1, p. 29, Dec. 2006, doi: 10.1186/1743-0003-3-29.
- [42] P. Marque, D. Gasq, E. Castel-Lacanal, X. De Boissezon, and I. Loubinoux, “Post-stroke hemiplegia rehabilitation: evolution of the concepts.,” *Ann Phys Rehabil Med*, vol. 57, no. 8, pp. 520–529, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.rehab.2014.08.004.
- [43] D. Prochnow *et al.*, “A functional magnetic resonance imaging study of visuomotor processing in a virtual reality-based paradigm: Rehabilitation Gaming System,” *European Journal of Neuroscience*, vol. 37, no. 9, pp. 1441–1447, May 2013, doi: 10.1111/ejn.12157.
- [44] D. Perri, M. Simonetti, and O. Gervasi, “Deploying Serious Games for Cognitive Rehabilitation,” *Computers*, vol. 11, no. 7, p. 103, Jun. 2022, doi: 10.3390/computers11070103.

- [45] J. W. Burke, M. D. J. McNeill, D. K. Charles, P. J. Morrow, J. H. Crosbie, and S. M. McDonough, “Optimising engagement for stroke rehabilitation using serious games,” *Vis Comput*, vol. 25, no. 12, pp. 1085–1099, Dec. 2009, doi: 10.1007/s00371-009-0387-4.
- [46] L. Zimmerli, C. Krewer, R. Gassert, F. Müller, R. Riener, and L. Lünenburger, “Validation of a mechanism to balance exercise difficulty in robot-assisted upper-extremity rehabilitation after stroke,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 9, no. 1, p. 6, 2012, doi: 10.1186/1743-0003-9-6.
- [47] S. R. Zeiler, “Should We Care About Early Post-Stroke Rehabilitation? Not Yet, but Soon,” *Curr Neurol Neurosci Rep*, vol. 19, no. 3, p. 13, Mar. 2019, doi: 10.1007/s11910-019-0927-x.
- [48] S. Prabhakaran *et al.*, “Inter-individual Variability in the Capacity for Motor Recovery After Ischemic Stroke,” *Neurorehabil Neural Repair*, vol. 22, no. 1, pp. 64–71, Jan. 2008, doi: 10.1177/1545968307305302.
- [49] A. Kapajandi, *Fisiología articular*, 6^{a.}, , 6^{a.}, vol. I: Miembro superior. 2006.
- [50] R. L. Drake, A. Wayne Vogl, and A. M. W. Mitchell, *Gray. Anatomía para estudiantes*, 3^a Edición,. 2015.
- [51] 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.
- [52] A. G. Ozgur *et al.*, “The effect of gamified robot-enhanced training on motor performance in chronic stroke survivors,” *Heliyon*, vol. 8, no. 11, p. e11764, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11764.
- [53] P. Kiper *et al.*, “Effects of Immersive Virtual Reality on Upper-Extremity Stroke Rehabilitation: A Systematic Review with Meta-Analysis,” *J Clin Med*, vol. 13, no. 1, p. 146, Dec. 2023, doi: 10.3390/jcm13010146.
- [54] M. Palaus, E. M. Marron, R. Viejo-Sobera, and D. Redolar-Ripoll, “Neural Basis of Video Gaming: A Systematic Review,” *Front Hum Neurosci*, vol. 11, May 2017, doi: 10.3389/fnhum.2017.00248.
- [55] Y. Zhang, G. Du, Y. Yang, W. Qin, X. Li, and Q. Zhang, “Higher integrity of the motor and visual pathways in long-term video game players,” *Front Hum Neurosci*, vol. 9, Mar. 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00098.
- [56] D. Novak, A. Nagle, U. Keller, and R. Riener, “Increasing motivation in robot-aided arm rehabilitation with competitive and cooperative gameplay,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 11, no. 1, p. 64, 2014, doi: 10.1186/1743-0003-11-64.

- [57] J. Zihlerl, D. Novak, A. Olenšek, M. Mihelj, and M. Munih, “Evaluation of upper extremity robot-assistances in subacute and chronic stroke subjects,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 7, no. 1, p. 52, 2010, doi: 10.1186/1743-0003-7-52.
- [58] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, A. Jansen-Troy, and S. Leonhardt, “A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 11, no. 1, p. 3, Dec. 2014, doi: 10.1186/1743-0003-11-3.
- [59] S. Hussain, P. K. Jamwal, P. Van Vliet, and M. H. Ghayesh, “State-of-the-Art Robotic Devices for Wrist Rehabilitation: Design and Control Aspects,” *IEEE Trans Hum Mach Syst*, vol. 50, no. 5, pp. 361–372, Oct. 2020, doi: 10.1109/THMS.2020.2976905.
- [60] A. Cisnal, G. Alonso-Linaje, J. Granja, M. Veganzones, J. Pérez Turiel, and J. C. Fraile, “M3Rob: Plataforma robotizada para la rehabilitación de muñeca. Aspectos de diseño y arquitectura de control,” in *XLIV Jornadas de Automática: libro de actas: Universidad de Zaragoza, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, 6, 7 y 8 de septiembre de 2023, Zaragoza.*, Servizo de Publicacións. Universidade da Coruña, 2023, pp. 29–34. doi: 10.17979/spudc.9788497498609.029.
- [61] J. F. Villada Castillo *et al.*, “Design of Virtual Reality Exergames for Upper Limb Stroke Rehabilitation Following Iterative Design Methods: Usability Study.,” *JMIR Serious Games*, vol. 12, p. e48900, Jan. 2024, doi: 10.2196/48900.
- [62] Unity Technologies, “Unity Learn Paths ,” <https://learn.unity.com/pathways>.
- [63] A. M. Syah and M. Yaser, “Rancang Bangun Sistem Laju Gerak Motor Pada Robot Cleaner Berdasarkan Gesture,” *Jetri: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, pp. 17–32, Aug. 2021, doi: 10.25105/jetri.v19i1.9544.