UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA
ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA

MÁSTER UNIVERSITARIO
EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

RehabHand: Juegos serios basados en el controlador *Leap Motion* para la rehabilitación del miembro superior en pacientes con lesión medular cervical

María Álvarez Rodríguez

Octubre, 2018

REHABHAND: JUEGOS SERIOS BASADOS EN EL CONTROLADOR *Leap Motion* PARA LA REHABILITACIÓN DEL MIEMBRO SUPERIOR EN PACIENTES CON LESIÓN MEDULAR CERVICAL

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

RehabHand: Juegos serios basados en el controlador *Leap Motion* para la rehabilitación del miembro superior en pacientes con lesión medular cervical

Autor: María Álvarez Rodríguez

Tutor: Carlos González Morcillo

Tutor: Ana de los Reyes Guzmán

Tutor: Javier Alonso Albusac Jiménez

Octubre, 2018

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

RehabHand: Juegos serios basados en el controlador *Leap Motion* para la rehabilitación del miembro superior en pacientes con lesión medular cervical

Fdo.: María Álvarez Rodríguez Fdo.: Carlos González Morcillo

Octubre, 2018

María Álvarez Rodríguez

Ciudad Real – Spain

E-mail: Maria.alvarez.rodriguez93@gmail.com

© 2018 María Álvarez Rodríguez

TRIBUNAL:

Presidente:

Vocal:

Secretario:

FECHA DE DEFENSA:

CALIFICACIÓN:

PRESIDENTE	VOCAL	SECRETARIO
Fdo.:	Fdo.:	Fdo.:

Resumen

La alteración de los miembros superiores es una de las secuelas más comunes en pacientes que han sufrido una lesión medular cervical y sus consecuencias son la pérdida total o parcial de la función del brazo y de la mano.

La función de los miembros superiores es de vital importancia en la realización de actividades de la vida diaria, por lo que se establece un tratamiento de terapia tradicional, en el que el paciente se centra en la manipulación de dispositivos físicos basados en la repetición de determinados movimientos funcionales. Durante la terapia, estas tareas acaban volviéndose monótonas y repetitivas, disminuyendo la motivación del paciente.

Este trabajo tiene por objetivos desarrollar un conjunto de aplicaciones virtuales no inmersivas para rehabilitación del miembro superior, basado en la captura del movimiento de la mano, en pacientes con lesión medular que padezcan trastornos motores de los miembros superiores. El paradigma de rehabilitación se basa en lograr una rehabilitación de bajo coste, involucrando tecnología comercial y económicamente accesible, como *Leap Motion Controller*, para manipular aplicaciones virtuales con fines terapéuticos y adaptadas a las necesidades de los pacientes.

Se trata de conseguir una nueva modalidad terapéutica, complementaria a la terapia convencional, más lúdica y motivadora para el paciente, con las fuentes de *feedback* necesario para que éste sea consciente de su propia mejora en sesiones consecutivas.

En este trabajo se incluye la validación funcional como prueba de concepto de las aplicaciones virtuales desarrolladas, siguiendo un desarrollo iterativo basado en pruebas de ensayo y error.

Abstract

The alteration of the upper limbs is one of the most common sequels in patients who have suffered a cervical spinal cord injury and its consequences are the total or partial loss of function of the arm and hand.

The function of the upper limbs is extremely important in the performance of activities of daily living, so a traditional therapy treatment is established, in which the patient focuses on the manipulation of physical devices based on the repetition of certain functional movements. During therapy, these tasks become monotonous and repetitive decreasing the patient's motivation.

This project aims to develop a set of non-immersive virtual applications for rehabilitation of the upper limb, based on capturing hand movements, in patients with spinal cord injury suffering from motor disorders of the upper limbs. The rehabilitation paradigm is based on achieving a low-cost rehabilitation, involving commercial and affordable technology, such as Leap Motion Controller, to manipulate virtual applications for therapeutic purposes and adapted to the needs of patients.

The aim is to achieve a new therapeutic modality, complementary to conventional therapy, more playful and motivating for the patient, with the necessary sources of feedback so that the patient is aware of his or her own improvement in consecutive sessions.

This work includes the functional validation as proof of concept of the virtual applications developed, following an iterative development based on trial and error tests.

Agradecimientos

No deberíamos ni haber llegado hasta aquí, Pero henos aquí, igual que en las grandes historias, las que realmente importan, llenas de oscuridad y de constantes peligros. Ésas de las que no quieres saber el final, porque ¿cómo van a acabar bien? ¿Cómo volverá el mundo a ser lo que era después de tanta maldad como ha sufrido? Pero al final, todo es pasajero. Como esta sombra, incluso la oscuridad se acaba, para dar paso a un nuevo día. Y cuando el sol brilla, brilla más radiante aún. Esas son las historias que llenan el corazón, porque tienen mucho sentido, aun cuando eres demasiado pequeño para entenderlas. Pero creo, que ya lo entiendo. Ahora lo entiendo. Los protagonistas de esas historias se rendirían si quisieran. Pero no lo hacen: siguen adelante, porque todos luchan por algo.

Gracias, si has estado en este camino conmigo.

Valaritas.

Índice general

Resumen V

Abstract VII

Agradecimientos IX

Índice general XIII

Índice de tablas XVII

Índice de figuras XIX

1. Introducción **1**

1.1. Planteamiento general 1

1.1.1. Impacto socioeconómico 3

1.1.2. Rehabilitación tras la lesión medular 4

1.1.3. Aplicabilidad de la Realidad Virtual en el contexto de la rehabilitación de los miembros superiores 6

1.1.4. Importancia de esta investigación 7

1.1.5. Introducir el concepto de Juego Serio y su aplicación en rehabilitación 8

1.2. Marco de trabajo 10

1.3. Competencias adquiridas 11

1.4. Estructura del documento 12

2. Objetivos **13**

2.1. Objetivo general 13

2.2. Objetivos específicos 13

3. Antecedentes **15**

3.1. Revisión del estado del arte en plataformas de desarrollo de videojuegos . . 15

3.1.1. Comparativa 18

3.2. Revisión del estado del arte en dispositivos tecnológicos de bajo coste . . . 19
3.2.1. Microsoft Kinect . . . 19
3.2.2. Leap Motion Controller . . . 20
3.2.3. Myo Gesture ArmBand . . . 21
3.3. Revisión del estado del arte en Juegos Serios para la rehabilitación . . . 22

4. Método de Trabajo **29**
4.1. Materiales y equipamiento . . . 29
4.1.1. Leap Motion Controller . . . 29
4.1.2. Características del PC utilizado . . . 31
4.1.3. Plataforma de desarrollo Software elegida . . . 31
4.2. Diseño conceptual de la plataforma *RehabHand* . . . 31
4.2.1. Plataforma principal información clínica . . . 31
4.2.2. *Juego Serio 1: Box and Block* . . . 32
4.2.3. *Juego Serio 2:* Laboratorio . . . 32
4.2.4. *Juego Serio 3:* The Explorer . . . 33
4.3. Desarrollo e implementación de la plataforma *RehabHand* . . . 33
4.3.1. Plataforma principal información clínica . . . 33
4.3.2. *Juego Serio 1: Box and Block* . . . 33
4.3.3. *Juego Serio 2:* Laboratorio . . . 37
4.3.4. *Juego Serio 3:* The Explorer . . . 39
4.4. Prueba de concepto y medidas de viabilidad de la plataforma *RehabHand* . 40
4.4.1. Participantes . . . 41
4.4.2. Procedimiento experimental . . . 41
4.4.3. Variables analizadas . . . 42
4.4.4. Escala clínica *Box and Block* . . . 42

5. Desarrollo **43**
5.1. Plataforma principal: *RehabHand* . . . 43
5.2. Box and Block . . . 44
5.3. Laboratorio . . . 47
5.4. Explorador . . . 49

6. Resultados **51**
6.1. Resultados técnicos de la plataforma . . . 51
6.1.1. Repositorio *Box and Block* . . . 52

6.1.2. Repositorio Laboratorio 53
6.1.3. Repositorio Explorador 54
6.2. Resultados del desempeño motor de los usuarios 55
6.2.1. *Juego Serio 1: Box and Block* 55
6.2.2. *Juego Serio 2:* Laboratorio 57
6.2.3. *Juego Serio 3:* Explorador 57
6.2.4. Cuestionarios de satisfacción 58

7. Conclusiones **61**
7.1. Objetivos alcanzados 61
7.2. Propuestas de trabajos futuros 62
7.3. Conclusión personal 63

Escala clínica *Box and Block* **71**

Contenido DVD **73**

Índice de tablas

3.1. Comparativa *CryEngine*, *Unity3D*, *Unreal Engine 4* 18

4.1. Especificaciones técnicas 31
4.2. Matriz de adyacencia 40
4.3. Características de la muestra que participa en el desarrollo del juego virtual 41

6.1. Actividad en el repositorio *Box and Block* según los *commits* realizados . . 52
6.2. Actividad en el repositorio del Laboratorio según los *commits* realizados . . 53
6.3. Actividad en el repositorio del Explorador 55
6.4. Desempeño de los participantes (sanos y pacientes) en la simulación virtual de la escala Box and Block 56
6.5. Generalización de los resultados obtenidos en la escala virtual *Box and Block* 56
6.6. Desempeño de los participantes (sanos y pacientes) en el juego del laboratorio 57
6.7. Desempeño de los participantes (sanos y pacientes) en el juego del explorador 58
6.8. Generalización de los resultados obtenidos en el juego del Explorador . . . 58

Índice de figuras

1.1. Visión lateral de la columna vertebral [39] 2
1.2. Número de juegos aplicados a la salud según el año de publicación. Fuente [37] 9
1.3. Clasificación según la enfermedad.Fuente [37] 10

3.1. Arquitectura orientada a capas. Fuente: [34] 16
3.2. Microsoft Kinect Xbox One 19
3.3. Leap Motion 20
3.4. Myo Gesture ArmBand 21
3.5. Calibración de *The Rutgers arm* 23
3.6. *The Pick-and-Place game* 23
3.7. *Breakout3D game* 24
3.8. *Aplicaciones virtuales* del estudio [3] 25
3.9. *Spheroids* 26
3.10. Aplicaciones virtuales investigación [6] 26
3.11. Entorno virtual de neurrehabilitación 27

4.1. Composición hardware. Fuente: [2] 29
4.2. Zona de cobertura. Fuente: [2] 30
4.3. Coordenadas cartesianas. Fuente: [2] 30
4.4. Menu Principal 34
4.5. Seleccionar nivel 35
4.6. *SourceCubes* 36
4.7. Escena *Game* de Laboratorio 38
4.8. Representación del grafo 39
4.9. Figura seguimiento 40

5.1. Diagrama de clases de la plataforma principal 43
5.2. Diagrama de clases simplificado de *Box and Block* 45
5.3. *Prefab* de *Cube* 46

0.

5.4. *Prefab* de *Flask* 47
5.5. Diagrama de clases simplificado del Laboratorio 48
5.6. Diagrama de clases simplificado del Explorador 50

6.1. Calendario con la planificación inicial de los juegos 51
6.2. Actividad en el repositorio *Box and Block* por horas del día 52
6.3. Comparación entre versiones *Box and Block* 53
6.4. Actividad en el repositorio Laboratorio por meses del año 54
6.5. Comparación entre versiones del Laboratorio 54
6.6. Comparación entre versiones del Explorador 55
6.7. Diagrama de dispersión entre el resultado en la aplicación virtual *Box and Block* y el resultado en la escala real 56
6.8. Encuesta de valoración del *Box and Block* 59
6.9. Encuesta de valoración del Laboratorio 59
6.10. Encuesta de valoración del Explorador 60

1. Caja de la escala *Box and Block* 71

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se pretende dar una visión general acerca de la lesión medular y sus consecuencias, incluyendo su impacto social y económico. Se introducen los objetivos funcionales de la rehabilitación según el nivel de lesión en el paciente tetrapléjico y los conceptos de Realidad Virtual y Juegos Serios en la rehabilitación.

1.1 Planteamiento general

La médula espinal forma parte del sistema nervioso central, que es la vía de comunicación principal del cerebro con el resto del organismo. Es un cordón nervioso protegido por la columna vertebral, y es el encargado de llevar impulsos nerviosos a los nervios raquídeos. De ellos, 8 son cervicales (C1-C8), 12 dorsales o torácicos (T1-T12), 5 lumbares (L1-L5), 5 sacros (S1-S5) y 1 coccix. [19]

La interrupción de esta conexión nerviosa produce la parálisis de la movilidad voluntaria y ausencia de toda sensibilidad por debajo de la zona afectada, falta de control de esfínteres, alteraciones en la sexualidad y el sistema nervioso vegetativo. Además se derivan otros problemas: problemas en la piel (como úlceras por presión), trastornos en la regulación de la temperatura corporal, problemas respiratorios o espasticidad entre otros. Por lo tanto, se entiende como *Lesión Medular* cualquier alteración sobre la médula espinal, que puede producir alteraciones en el movimiento, la sensibilidad o la función autónoma por debajo del nivel de lesión.

La lesión medular puede tener un origen traumático o no traumático (enfermedad tumoral, infecciosa, vascular...) o congénito, y puede clasificarse en tres tipos: **tetraplejia**, cuando la lesión se produce a nivel cervical, que provoca alteración en las extremidades superiores, tronco, extremidades inferiores y órganos pélvicos, también puede depender de ventilación mecánica si se ve implicado el diafragma); **paraplejia**, si se produce a nivel torácico o lumbar, dependiendo del nivel de lesión se ven afectados tronco, extremidades inferiores y órganos pélvicos y por último, cuanto tiene lugar a nivel del **cono medular** y de la cola de caballo, pero en este caso suele preservarse la capacidad de marcha.

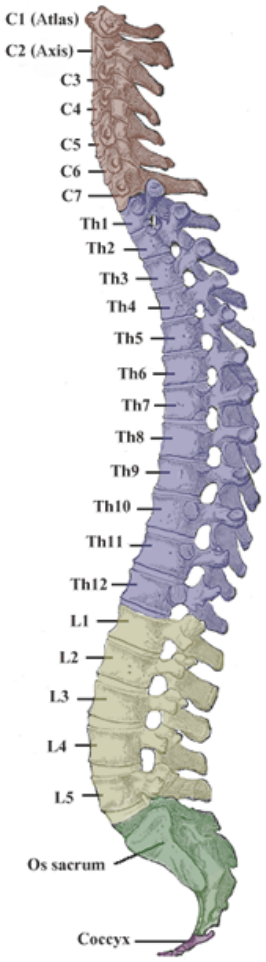


Figura 1.1: Visión lateral de la columna vertebral [39]

En los casos de tetraplejia y paraplejia, se produce una pérdida total o una disminución de la sensibilidad y/o de la movilidad voluntaria de las extremidades y el tronco por debajo del nivel de lesión, por lo tanto, en tetraplejia, tanto las inferiores como las superiores, y en paraplejia las inferiores.

El nivel de lesión lo constituye el segmento localizado por encima del segmento más alto afectado. Una misma lesión puede tener distintos niveles motores y sensitivo. La clasificación estándar de la lesión medular es la escala *American Spinal Injury Association* (ASIA)[15], a continuación se muestra la escala de afectación neurológica de la *ASIA*:

- **A**: Lesión completa sensitivomotora.
- **B**: Lesión incompleta sensitiva completa motora.
- **C**: Lesión incompleta sensitivomotora no funcional.
- **D**: Lesión incompleta sensitivomotora funcional.
- **E**: Función motora y sensitiva normal.

Una lesión se considera completa cuando por debajo del nivel de lesión no existe función motora ni sensitiva, incluyendo los niveles sacros. Y se considera incompleta si persiste sensación perineal y anal y función voluntaria del esfínter anal, aunque no sean normales.

1.1.1 Impacto socioeconómico

Actualmente no existe un tratamiento curativo para la lesión medular, además supone una pérdida funcional y de independencia del individuo, por lo que es una de las situaciones clínicas más devastadoras.

Aunque se ha evolucionado considerablemente en la asistencia al lesionado medular, sigue siendo un grave problema, tanto desde el punto de vista social, como económico y físico. Las lesiones medulares conllevan asociadas diversas complicaciones secundarias que puede resultar debilitantes e incluso potencialmente mortales, como por ejemplo, infecciones urinarias, espasmos musculares, osteoporosis, úlceras por presión, dolores crónicos y complicaciones respiratorias.[23]

Con respecto al impacto económico de la lesión medular se ha estimado que es coste oscila entre 92 y 212 millones de euros, dependiendo de las lesiones.[12] El coste medio del cuidado médico y la adaptación, debida a la lesión medular, depende del tiempo desde la lesión y el nivel de la lesión. Se estima que el coste asociado a la LM en Estados Unidos es de 9,7 millones por año. En España el coste de hospitalización medio de entre 60.000 y 100.000 euros durante el primer año de la lesión, asumiendo que tras el alta médica, los pacientes necesitarían 4 horas diarias de cuidados especializados (terapia ocupacional, fisioterapia, enfermería, logopedia).

Según la OMS no existen estimaciones fiables de la prevalencia mundial de la lesión medular, pero se calcula que su incidencia mundial anual oscila entre 40 y 80 casos por millón de habitantes. Se estima que hasta un 90 % de esos casos se deben a causas traumáticas, aunque la proporción de lesiones medulares de origen no traumático debidas a enfermedades o degeneración, parece ir en aumento.[23] La incidencia de lesión medular de origen traumático varía de 3,6 a 195,4 casos por millón a partir de los datos epidemiológicos en 41 países del mundo. Otro estudio realizado en una muestra de la población española en el período entre 1972 y 2008, muestra la incidencia de lesión medular de origen no traumático.[14] Los resultados son de aproximadamente 11,4 por millón de habitantes. Se encontraron 541 casos (de los cuales el 53 % eran hombres) durante 37 años revisados. La tasa de incidencia se incrementa con la edad, con un pico en el grupo de 60 a 69 años, siendo la tumoral la causa más frecuente de LM. La mayor parte de las lesiones eran a nivel torácico, y C y D fueron las clasificaciones más frecuentes en la escala ASIA.[35]

1.1.2 Rehabilitación tras la lesión medular

La rehabilitación de los pacientes con lesión medular depende de varios factores, como el neurológico, que determinará su grado de afección; la movilidad de las articulaciones, la edad y el estado cardiorrespiratorio, son solo algunos ejemplos, que nos indican que cada paciente requiere una rehabilitación personalizada y orientada a diversos aspectos, como son la rehabilitación respiratoria, la sexual o la de los miembros superiores.[10]

La capacidad funcional de los miembros superiores depende generalmente del nivel neurológico de la lesión y de la severidad de la misma. De esta forma, cuanto más alta sea una lesión, más dependiente es una persona en la realización de actividades de la vida diaria.

En este apartado se muestran los objetivos funcionales por niveles de lesión medular cervical, atendiendo tanto al grado de independencia en las Actividades de la Vida Diaria (AVDs) como a las habilidades del miembro superior.[16]

Nivel C1- C3 ASIA A-B

Se requiere un equipo especializado de tratamiento para evitar complicaciones médicas y musculoesqueléticas a corto y largo plazo. El tratamiento será progresivo y es fundamental la educación de la familia de los cuidados que requerirá en domicilio. Tienen parálisis total del Diafragma y del resto de la musculatura respiratoria, por lo tanto, dependen de la ventilación asistida. Tienen parálisis de los Miembros superiores, inferiores y músculos del tronco, pero pueden mover la cabeza. Son totalmente dependientes. No son subsidiarios de utilización del Leap Motion.

Nivel C4 ASIA A-B

Existe parálisis parcial del diafragma y parálisis de las cuatro extremidades y tronco. Conservan pequeño control motor en zona de hombros y tiene fuerza en el músculo romboides. Pueden respirar de manera independiente y manejar una silla de ruedas eléctrica con mando mentoniano. Son totalmente dependiente.

No son subsidiarios de utilización del Leap Motion.

Nivel C5 ASIA A-B

Añade los músculos flexores del codo (bíceps), deltoides y romboides y parcialmente el braquial, el braquiorradial, el supraespinoso, el infraespinoso y los serratos anteriores. Es de vital importancia evitar durante el periodo agudo la contractura en flexión y supinación del codo. No tienen función en el músculo tríceps ni en ningún músculo de la muñeca o de la mano. Pueden manejar silla de ruedas con mando manual. Puede llevarse las manos a la boca, cabeza y cara. Con ayuda de una férula estabilizadora de muñeca y adaptaciones, pueden realizar tareas sencillas que no requieran control fino de la mano. Requieren ayuda para la mayoría de las actividades de autocuidados.

Serían subsidiarios de utilizar el Leap Motion. Se puede potenciar la movilidad y control de MMSS pero sin agarres.

Nivel C6 ASIA A-B

Se encuentran preservados los músculos pectorales, serrato anterior, dorsal ancho y se añade la extensión de muñeca (extensores carpo radialis) y parcialmente el supinador, el pronador redondo y el dorsal ancho. La extensión activa de la muñeca permite un agarre grosero a través del efecto tenodesis. El músculo dorsal ancho, combinado con los músculos pectorales y serrato anterior, permiten soportar el peso a través de los MMSS y realizar transferencias. Pueden manejar una silla de ruedas manual, pero la mayoría utiliza eléctricas. Algunos pacientes pueden hacer transferencias, girar, cambiar de posición, pasar de decúbito a sedestación, vestirse, bañarse y realizar higiene personal, aunque estas tareas son complejas y difíciles de dominar.

Serían subsidiarios de utilizar el Leap Motion, utilizando agarre grosero gracias al efecto tenodesis. Se puede potenciar la extensión activa de muñeca y agarre grosero.

Nivel C7 ASIA A-B

Se añade la extensión de codo (tríceps), flexores de muñeca y extensores de los dedos. Pueden levantar objetos por encima de su cabeza. Al no tener flexores de dedos y del pulgar, dependen del agarre de tenodesis. El nivel C7 se considera la clave para su independencia en la mayoría de las actividades en la silla de ruedas, incluidas las pulsiones y las transferencias.

Serían subsidiarios de utilizar el Leap Motion y dependiendo del nivel residual del paciente, se podría trabajar alcances, diferentes pinzas y agarres.

Nivel C8 ASIA A-B

Estos pacientes tienen actividad en los flexores de los dedos y del pulgar, por tanto pueden coger y soltar objetos. Logran una mayor independencia que las lesiones anteriores. Serían subsidiarios de utilizar Leap Motion, trabajando alcances y todo tipo de prensas y pinzas.

***NOTA**: Los resultados para el caso de pacientes con zonas de preservación parcial (ZPP) o con lesiones incompletas ASIA C o D, son menos predecibles. Como referencia inicial se utiliza el nivel de independencia que se puede alcanzar con pacientes con lesión completa y luego se modifica en función de las circunstancias individuales y del estado neurológico de cada paciente.*

1.1.3 Aplicabilidad de la Realidad Virtual en el contexto de la rehabilitación de los miembros superiores

Actualmente, una de las definiciones más aceptadas para el término *Realidad Virtual* y más específicamente en el área de la neurorehabilitación es la presentada en *Virtual reality in neurorehabilitation*:

> "Simulación de un entorno real generado por un ordenador, en la que a través de una interfaz hombre-máquina se va a permitir al usuario interactuar con ciertos elementos dentro del escenario simulado."
>
> (**P.L. Weiss**, **R. Kizony**, **U. Feintuch**, **N. Katz**)[38]

El uso de la Realidad Virtual como complemento a la terapia convencional en la rehabilitación ofrece ventajas como la posibilidad de controlar de forma precisa las sesiones y evaluar la mejora de las mismas. Permite también recrear entornos virtuales seguros para practicar actividades que pueden presentar cierto riesgo en el mundo real, así como crear plataformas de telerrehabilitación, para que el personal sanitario pueda realizar un seguimiento de la evolución del paciente de forma remota.[13] Saber si los movimientos realizados en entornos virtuales y reales son equivalentes o si se mejora la capacidad motora con la realidad virtual son algunas de las dudas que se plantean.[24]

Cuando se habla de Realidad Virtual hay que destacar dos aspectos importantes, por un lado la **interacción**: el sistema captura la voluntad del usuario implícita en sus propios movimientos, dejando de percibir los dispositivos para interactuar con los objetos de la escena directamente; y por otro lado la **inmersión**, según la cual, los sistemas de Realidad Virtual se pueden clasificar, en sistemas inmersivos de realidad virtual, con los cuales se consigue una inmersión total, hasta el punto de sentir que se accede a un mundo diferente, por medio de guantes, cascos de visualización estereoscópica, cabinas... Y los sistemas no inmersivos, cuya interacción se realiza con un dispositivo periférico conectado al ordenador.

A continuación se mencionan algunos estudios que aplican la Realidad Virtual en la rehabilitación de los miembros superiores.

En la Universidad de Chicago [11] se realizó un estudio con pacientes que habían sufrido un accidente cerebrovascular, realizando rehabilitación de la mano con entornos virtuales o reales. Cuando finalizó el estudio, los pacientes mostraron una disminución del tiempo al realizar tareas funcionales, aunque de manera leve. También se destaca la aceptación general con las técnicas de realidad virtual.

Un estudio de la Universidad de California del Sur[30] hacia uso de gafas de Realidad Virtual y sensores electromagnéticos con cuatro tareas de Realidad Virtual que se desarrollaron con el objetivo de mejorar las habilidades de movimiento del brazo y la mano en pacientes con hemiparesia. Se probó con dos pacientes, que mostraron mejoras en la terapia tras la realización de 12 sesiones de 1-2 horas durante tres semanas.

La Universidad de Zurich[9] desarrolló un sistema de neurorrehabilitación basado en Realidad Virtual para pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular. Las tareas consistían en golpear o agarrar y mover objetos virtuales. En general, los pacientes aceptaban el sistema y estaban motivados para usarlo.

Una investigación llevada a cabo en la Universidad de Ankara[40] evaluó los efectos de *Playstation EyeToy Games* en la rehabilitación del miembro superior en pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular. Se concluyó con una mejora significativamente en el grupo *EyeToy* en comparación con el grupo control.

En conclusión, al tratarse de una tecnología reciente aún se están realizando investigaciones para demostrar la eficacia de la Realidad Virtual en la rehabilitación.

Además, el potencial que muestra es indudable, unido a la aceptación general que muestran los pacientes, lo convierte en una herramienta fundamental para el progreso de la rehabilitación.

1.1.4 Importancia de esta investigación

En personas que padecen lesión medular cervical, la alteración de la función de los miembros superiores es una de las secuelas más comunes.[22]

Esto supone la reducción o la pérdida de la función del brazo y de la mano, dependiendo del nivel de lesión de las personas que padecen tetraplejia.

El paciente recibe terapia convencional centrada en la manipulación de dispositivos físicos, repitiendo determinados movimientos funcionales, orientados a cumplir una función, relacionados con movimientos de alcance y agarre, y ejecución de actividades de la vida diaria.

Pero con el paso del tiempo, estas actividades se vuelven repetitivas y monótonas, y el paciente se aburre o deja de realizar dichas tareas. Se suma, además el hecho de que no hay una manera objetiva de valorar los progresos del paciente.

Por otro lado, con el objetivo de asistir a la terapia y ayudar al personal clínico en la administración de tareas repetitivas, se han incorporado dentro del entorno clínico soluciones tecnológicas basadas en exoesqueletos o dispositivos robóticos de miembro superior, permitiendo aumentar la cantidad de terapia que reciben los pacientes.[42][41] [28] [18] [25] Las soluciones terapeúticas basadas en este tipo de dispositivos suelen tener un coste de adquisición muy elevado que hace que la solución sea adecuada para su uso dentro del entorno

hospitalario, pero impide que el proceso rehabilitador se puede deslocalizar del hospital, allá donde se entre el paciente.

Por este motivo, es necesario pensar en el uso de otro tipo de tecnologías de bajo coste y de interacción libre, que se puedan aproximar en el futuro al domicilio del paciente.

De esta necesidad surge *RehabHand*, que se caracteriza por:

- Captación de movimiento de la mano con tecnología de bajo coste basada en sensores ópticos.
- Desarrollo de juegos con fines terapéuticos adaptados a las necesidades de pacientes con lesión medular.
- Eliminación de restricciones impuestas por la edad del paciente, al tratarse de tecnología de interacción libre, pudiendo aplicarse a población pediátrica y adulta.
- Evaluación objetiva del desempeño motor del paciente, mediante índices cinemáticos que informan acerca de la destreza y función del miembro superior.

1.1.5 Introducir el concepto de Juego Serio y su aplicación en rehabilitación

Actualmente no existe una única definición para el concepto de Juego Serio, pero la mayoría de definiciones coinciden en que son juegos diseñados con propósitos adicionales al mero entretenimiento. Promueven el desarrollo de capacidades por medio de las exposición a diferentes situaciones. En los últimos años han adquirido una importante popularidad.[29]

Los Juegos Serios se desarrollan en multitud de áreas de conocimiento, incluyendo la educación, la salud, la industria o el ejército entre otros.

Centrándonos en el ámbito de la salud, los Juegos Serios ofrecen multitud de ventajas, como motivar a los pacientes durante los tratamientos médicos, evaluar el rendimiento o incluso para formar a profesionales.[26]

La clave está en que los pacientes deben enfrentarse a un problema suficientemente difícil para estimularles pero no tanto como para que se desanimen. También en proporcionar un *feedback* positivo, para que el paciente no tenga sensaciones negativas.

Observando las tendencias en el mercado de Juegos Serios en el área de la salud, en la gráfica de la figura 1.2 se muestra que es crecimiento ha sido cada vez más pronunciado. Hasta el año 2000 puede verse un mercado creciendo moderadamente pero desde el 2004 la curva crece significativamente.

Desde entonces, se presentan distintas taxonomías para la clasificación de dichos juegos, en concreto, la presentada en [37] los clasifica basándose en tres temas relacionados: jugador, salud y Juegos Serios (entendida como la aplicación en sí). Basándose en el tema de Juegos Serios, clasifican los juegos por propósito o funcionalidad.

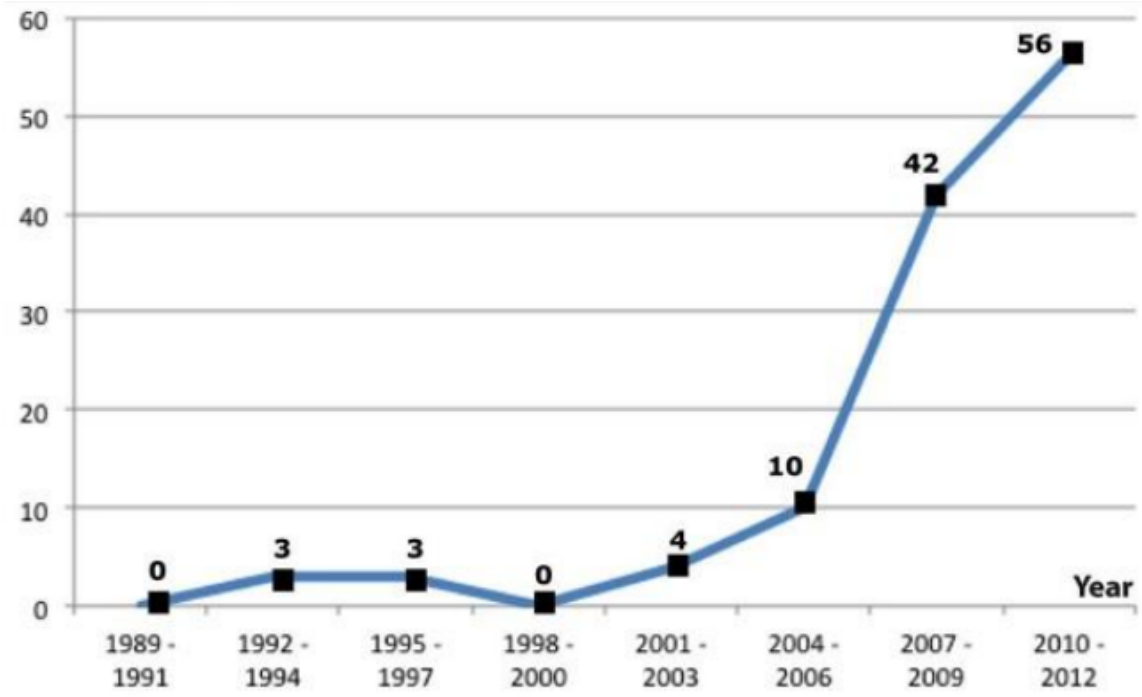


Figura 1.2: Número de juegos aplicados a la salud según el año de publicación. Fuente [37]

Según el propósito, pueden encontrarse juegos *centrados en el entretenimiento*, en los que además de entretenerse el usuario ejercita partes de su cuerpo, como son los juegos de *Dance Dance Revolution*; juegos *enfocados en la salud*, cuyo objetivo principal es la salud pero se usan como herramienta para transmitir conocimiento, como consejos para tener hábitos de vida saludables; y juegos *enfocados en la adquisición de habilidades médicas*, siendo la mayoría de estos, juegos de simulación para el entrenamiento.

La clasificación según funcionalidad se basa en los criterios de [27]. En primer lugar, según el área de aplicación, ya sean habilidades cognitivas o motoras; el dispositivo de interacción, ya sean sensores, dispositivos robóticos como exoesqueletos, inerciales, manipulación libre (como *Leap Motion*); juego en 2D o 3D; juegos individuales o multijugador; género, en concreto para el caso de rehabilitación suelen desarrollarse juegos que evalúen la coordinación y el movimiento; la adaptabilidad del juego de acuerdo con la habilidad del jugador; monitorización del progreso; portabilidad del juego, distinguiendo entre los juegos ubicados en el hospital y los que pueden usarse en casa; o la conectividad del juego.

Según el tema de *salud*, los juegos pueden clasificarse por el estado de la enfermedad: En primer lugar está la etapa de *susceptibilidad*, cuando la persona está sana y puede familiarizarse con enfermedades que podría desarrollar; etapa *presintomática*, aunque la enfermedad ya está presente las personas se sienten sanas, en este caso los juegos se orientan en presentar al paciente los aspectos más relevantes de la enfermedad y su tratamiento, como es el caso de *PrayWithEyes* usado por oculistas para tratar con niños [4]; etapa de *enfermedad clínica*,

en esta etapa los síntomas ya se manifiestan, aquí se incluyen también los juegos destinados al personal sanitario, y algunos ejemplos serían juegos para trabajar los trastornos del habla o la coordinación bimanual en niños con parálisis cerebral espástica; finalmente, la etapa de *recuperación* o de *discapacidad*, en esta etapa los juegos se ocupan de la rehabilitación o de ayudar al paciente a sobrellevar su discapacidad, como es el caso de rehabilitación del miembro superior después de una lesión medular.

En el estudio de [37] se clasificaron 97 Juegos Serios publicados en el periodo desde 2004 hasta 2012, tanto de entorno académico como comercial. En la gráfica de la figura 1.3 se observan según la enfermedad para la cual fueron diseñados.

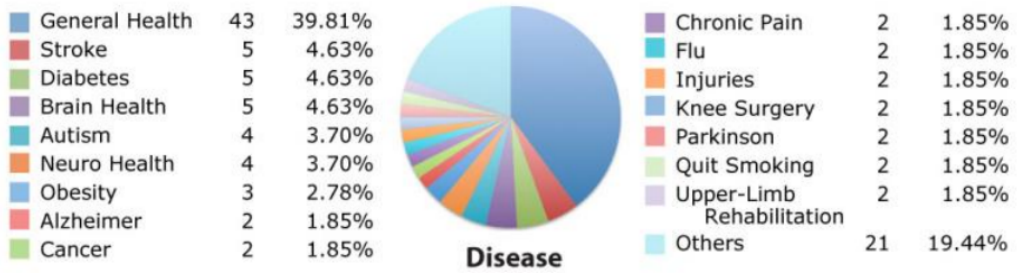


Figura 1.3: Clasificación según la enfermedad.Fuente [37]

Cerca del 40 % de los juegos están dirigidos a la salud general, y a continuación, el accidente cerebro vascular, la diabetes y la salud cerebral son las enfermedades específicas con más presencia.

En la gráfica puede verse como la rehabilitación de los miembros superiores supone solo un 1.85 %, y la lesión medular ni siquiera está presente.

Los Juegos Serios aplicados a la salud, y más concretamente a la rehabilitación son una nueva oportunidad en lo relativo a motivación y evaluación del progreso del paciente, y aunque actualmente son escasas las publicaciones al respecto, la aplicación de las nuevas tecnologías a las terapias convencionales suponen un nuevo paradigma que podría beneficiar tanto a personal clínico como a pacientes.

1.2 Marco de trabajo

Esta investigación se realiza en el contexto del proyecto *RehabHand*: “Plataforma de Bajo Coste para Rehabilitación del Miembro Superior basado en Aplicaciones Virtuales”, del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad 2016 del Ministerio de Economía y Competitividad con referencia DPI2016-77167-R, con el que se pretende desarrollar un prototipo basado en la captura del movimiento de la mano, haciendo uso de tecnologías de bajo coste en pacientes con lesión medular que padezcan trastornos motores en los miembros superiores, desarrollado en la Unidad de I+D+I en Biomecánica y Ayudas Técnicas del Hospital Nacional de Parapléjicos de Toledo (HNP).

1.3 Competencias adquiridas

A continuación se detalla cuáles y en qué forma se han alcanzado las competencias específicas del proyecto.

- **[CE 1]:** *Capacidad para la integración de tecnologías, aplicaciones, servicios y sistemas propios de la ingeniería informática, con caracter generalista, y en contextos más amplios y multidisciplinares.*

  En el proyecto se ha integrado un hardware de captación de movimiento con un motor de videojuegos, trabajando en un equipo multidisciplinar con personal clínico y tecnológico.

- **[CE 4]:** *Capacidad para modelar, diseñar y definir la arquitectura, implementar, gestionar, operar, administrar y mantener aplicaciones, redes, sistemas, servicios y contenidos informáticos.*

  Las distintas aplicaciones que componen el proyecto han sido diseñadas partiendo desde un punto de vista clínico, y en comunicación constante con el personal especializado durante la definición de la arquitectura y la implementación de las mismas, y posteriormente el mantenimiento de las aplicaciones tras las pruebas realizadas con pacientes, realizando de todas el proceso completo.

- **[CE 8]:** *Capacidad para analizar las necesidades de información que se plantean en un entorno y llevar a cabo en todas sus etapas el proceso de construcción de un sistema de información.*

  Esta competencia se ha alcanzado integrando las diferentes disciplinas que participan en el proyecto, y prestando atención especialmente a las necesidades de los pacientes con lesión medular.

- **[CE 13]:** *Capacidad para utilizar y desarrollar metodologías, métodos, técnicas, programas de uso específico, normas y estándares de computación gráfica.*

  La computación gráfica tiene una especial importancia en el proyecto, desde el modelado 3D, aplicación de materiales y texturas, diseño de animaciones, implementaciones de las escenas que constituyen las pantallas de los juegos, y las interfaces gráficas.

- **[CE 15]:** *Capacidad para la creación y explotación de entornos virtuales, y para la creación, gestión y distribución de contenidos multimedia.*

  El objetivo final es la obtención de un sistema que sea accesible al mayor número de pacientes, por lo que se pretende construir un entorno completo que sea distribuido a entornos hospitalarios y hogares de lesionados medulares.

1.4 Estructura del documento

La estructura del proyecto del Trabajo de Fin de Máster propuesta por la Escuela Superior de Informática, y adaptándola al contenido del proyecto quedaría de la siguiente manera:

Capítulo 2: Objetivos

Descripción del objetivo general y de los objetivos específicos o subobjetivos del trabajo de investigación.

Capítulo 3: Antecedentes

En este capítulo se realiza un análisis del estado del arte de los campos de investigación relacionados con la investigación.

Capítulo 4: Método de Trabajo

Capítulo en el que se describe la metodología de trabajo que se seguirá , detallando las fases de trabajo, así como los medios empleados, tanto software como hardware, y las limitaciones que presenta el proyecto.

Capítulo 6: Resultados

Se describen los resultados del desempeño motor e interacción del usuario con los juegos desarrollados.

Capítulo 7: Conclusiones

Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones que se han alcanzado tras la realización del proyecto, las posibles mejoras y futuras líneas de aplicación.

Capítulo 2

Objetivos

En este capítulo se describe el objetivo general y los diferentes objetivos específicos que se han planteado en el proyecto.

2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar e implementar juegos serios basados en el uso de tecnologías de bajo coste para la rehabilitación de pacientes con tetraplejia.

2.2 Objetivos específicos

A partir del objetivo general que ha sido descrito en la sección anterior, se definen los siguientes objetivos específicos, que permitirán alcanzar el mismo:

- Captación de movimiento de la mano con tecnología de bajo coste basada en sensores ópticos.
- Determinar los requisitos clínicos y de contenido de cada juego serio en función de los objetivos rehabilitadores.
- Desarollar los juegos con fines terapeúticos adaptados a las necesidades de pacientes con lesión medular.
- Diseñar el contenido gráfico y lógica del juego para optimizar la utilización de recursos disponibles.
- Evaluación objetiva el desempeño motor del paciente, mediante índices cinemáticos que informen acerca de la destreza y función del miembro superior.
- Realizar pruebas iterativas con pacientes para adecuar el contenido de los juegos.
- Desarrollar el sistema haciendo uso de un motor de juego multiplataforma, para que los juegos pueden ejecutarse en GNU/Linux, Microsoft Windows y MacOS.

Capítulo 3

Antecedentes

En el capítulo de introducción se han propuesto una serie de objetivos que requieren la adquisición de conocimientos sobre áreas muy diversas, en este capítulo se realizará una revisión del estado del arte en plataformas de desarrollo de videojuegos y se describirán los dispositivos hardware que se analizaron, y continuación la revisión de juegos serios en el contexto de la rehabilitación de pacientes con afectación del miembro superior tras enfermedades neurológicas.

3.1 Revisión del estado del arte en plataformas de desarrollo de videojuegos

Actualmente la industria del videojuego rivaliza en presupuesto con las industrias cinematográficas y musical juntas, con lo cual, es inevitable pensar en las inversiones y desarrollos que se hacen en un negocio que es tan rentable. De hecho España representa el cuarto país a nivel europeo en consumo de videojuegos.[36]

Desde el primer videojuego Pong, desarrollado por *Atari* en 1975, del que se vendieron unas 50.000 unidades, se ha evolucionado exponencialmente hasta la actualidad, solo hace falta pararse a pensar en las millones de experiencias que se ofrecen al usuario, desde los juegos como se han conocido habitualmente, pasando por la inmersión en realidad virtual o aumentada, nuevos métodos de captación de entrada, la calidad de los gráficos... son algunos ejemplos.

La diferencia es abismal, lo que lleva a destacar la existencia de motores de juego y *middleware* para el tratamiento de aspectos específicos de un juego (motores de físicas o motores de renderizado).

Un motor de juego es un sistema creado para el desarrollo de videojuegos para facilitar y agilizar el proceso de creación de un videojuego. Este software provee toda la funcionalidad que se necesita para renderizar gráficos, detectar colisiones, simular físicas, administrar la comunicación con periféricos, manipular sonido, crear inteligencia artificial, manejar memoria sin que el programador tenga que comenzar desde cero cada vez que empieza un desarrollo (Alebrije Estudios, 2011).

El término “motor de videojuegos” surgió con la aparición de *Doom*, un juego de acción en primera persona. Esto fue posible ya que el juego estaba diseñado con una estructura orientada a la reutilización de código mediante una separación adecuada en distintos módulos de los componentes fundamentales, como por ejemplo, el sistema de renderizado gráfico, de detección de colisiones o de audio.

Este planteamiento facilitaba la reutilización del software y así el concepto de motor de juego se hizo más popular a medida que otros desarrolladores comenzaron a utilizar diversos módulos o juegos desarrollados previamente para generar los suyos propios. Es decir, era posible diseñar un juego del mismo tipo sin apenas modificar el núcleo del juego.

Este enfoque ha ido evolucionando y se ha expandido, y a día de hoy una gran parte de las compañías de desarrollo de videojuegos utilizan motores o herramientas pertenecientes a terceras partes, ya sea porque resulta más rentable económicamente o por los resultados que se pueden obtener.[34]

Pasando a la arquitectura del motor, presenta una arquitectura orientada a capas, de este modo, las capas del nivel superior depende de las capas del nivel inferior.

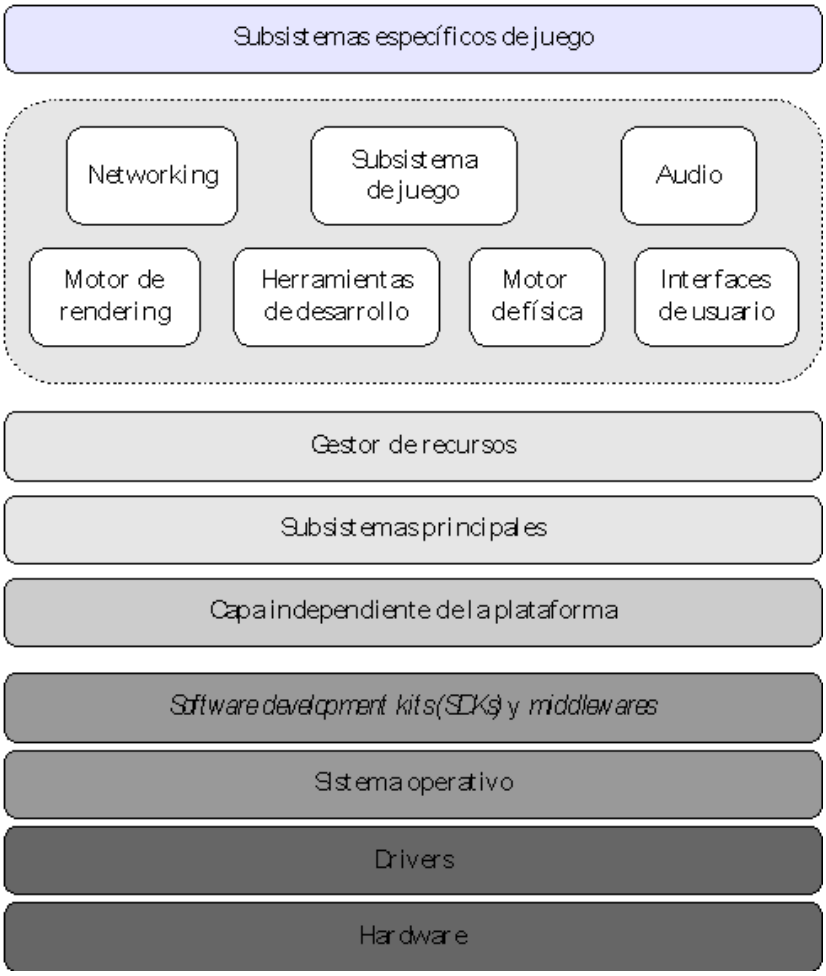


Figura 3.1: Arquitectura orientada a capas. Fuente: [34]

El hardware está vinculado a la plataforma sobre la que se ejecutará, la capa *drivers* soporta aquellos componentes software de bajo nivel que permiten la correcta gestión de dispositivos como las tarjetas de aceleración gráfica o de sonido.

El sistema operativo representa la capa de comunicación entre los procesos que se ejecutan en el mismo y los recursos hardware asociados a la plataforma en cuestión.

El motor se apoya en SDK's y *middleware* para proporcionar una determinada funcionalidad (ámbito de gráficos 3D, detección y tratamiento de colisiones).

La capa independiente de la plataforma aísla al resto de capas superiores de cualquier aspecto que sea dependiente de la plataforma, para permitir el lanzamiento del juego en distintas plataformas sin tener que implementarlo específicamente para cada una de ellas.

La capa de subsistemas principales está vinculada a las bibliotecas que dan soporte al motor, como biblioteca matemática, estructuras de datos y algoritmos, gestión de memoria, depuración...

El gestor de recursos es el responsable de proporcionar una interfaz unificada para acceder a las distintas entidades software que conforman el motor de juegos, como la escena o los propios objetos.

El motor de renderizado es el responsable de mostrar la imagen al usuario.

Las herramientas de desarrollo facilitan la implementación del juego, permiten depurar y optimizar el código para mejorar el rendimiento.

El motor de físicas es un elemento esencial, ya que sin un mecanismo de detección de colisiones los objetos se traspasarían unos a otros y no sería posible interactuar con ellos.

Con respecto a las interfaces de usuario, todo juego debe poseer un módulo responsable de procesar los eventos de entrada del usuario y del tratamiento de los eventos de salida.

Networking y multijugador, para el desarrollo de los componentes que permiten que el juego sea *online* o multijugador.

El subsistema de juego integra todos aquellos módulos relativos al funcionamiento interno del juego, por una parte permite la definición de las reglas que gobiernan el mundo virtual, por otra permite la definición de la mecánica del personaje así como sus objetivos durante el juego. Este subsistema sirve como capa de aislamiento entre las capas de más bajo nivel y el propio funcionamiento del juego. Es decir, uno de los principales objetivos del diseño que se persigue consiste en independizar la lógica del juego de la implementación. Por ello, se suelen encontrar sistemas de *scripting*. La capa de audio es especialmente importante para que el usuario se sienta inmerso en el juego. Y por último, la capa de subsistemas específicos de juego integra aquellos módulos responsables de ofrecer las características propias del juego.

3.1.1 Comparativa

Actualmente existe una amplia variedad de motores de videojuegos, y debido a la dimensión de los juegos que se han desarrollado se ha realizado una comparación los tres siguientes:

- Unity 3D.[1]
- CryEngine.[2]
- Unreal Engine.[3]

	CryEngine	**Unity 3D**	**Unreal Engine 4**
Multiplataforma	Sí	Sí	Sí
Lenguajes de programación	C++ / LUA	JS / C#	C++
Soporte	Excelente documentación	Amplia comunidad, gran soporte	Excelente documentación
Características propias	Gráficos hiperrealistas, motor más profesional	Plataforma integral juegos 2D/3D	*Blueprint*
Licencia	9.90$/mes	Privativa	5 % (superior a 3000$)

Tabla 3.1: Comparativa *CryEngine*, *Unity3D*, *Unreal Engine 4*

Los tres presentan diferentes características, que deben ser evaluadas para decidir qué motor es el más adecuado para cada proyecto.

Unity 3D ofrece a sus usuarios una amplia gama de herramientas muy accesibles, incluso para usuarios con un nivel técnico no muy alto. Una de sus mejores características es su integración multiplataforma, que admite hasta 25 diferentes (incluyendo Android, Blackberry, iOS, Windows...). Muy por delante de Unreal Engine y CryEngine que admiten 10 y 5 respectivamente.

Por otro lado, cuenta con una amplia comunidad, que proporciona ayuda en muy poco tiempo. Además, cuenta con una plataforma integral de juegos también para 2D. Otras de sus características son las bibliotecas de modelos[32] y otros recursos, además de la calidad de sus gráficos.

Unity3D permite crear prototipos muy rápidamente y darle forma a una idea para después poder testearla y comprobar el resultado.

Presenta una licencia privativa, siendo gratuita la versión básica.[31]

Unreal Engine es el motor de videojuegos de *Epic Games*, una de las mejores compañías estadounidenses de videojuegos y desarrollo software. Proviene de *Unreal Development Kit*, comúnmente conocido como UDK[33] en el mundo de los videojuegos.

[1] https://unity3d.com/es
[2] https://www.cryengine.com/
[3] https://www.unrealengine.com

Sus sistemas de partículas hacen que destaque sobre el resto en este hecho, ya que tiene la capacidad de manejar hasta un millón de partículas en una sola escena.

La licencia es gratuita, pero debe pagarse un 5 % del dinero ganado con un juego diseñado en Unreal siempre y cuando se superen los 3.000 $.

Otra de sus características es la tecnología *Blueprint Visual Scripting*, que le permite crear juegos utilizando nodos.

Por último, **CryEngine** fue desarrollado por *Crytek* en el primer *Far Cry Game*. De él destacan sus gráficos hiperrealistas, muy por delante de los de *Unity*, aunque comparables a los de *Unreal*. Por otro lado, es un motor muy potente pero también complejo, lo que hace que la curva de aprendizaje sea alta al principio.

La licencia es una tasa fija de 9.90 $ mensuales, y cuenta con el foro *CryEngine Answers*.

3.2 Revisión del estado del arte en dispositivos tecnológicos de bajo coste para captación del movimiento

Llevar la rehabilitación al domicilio del paciente es uno de los problemas actuales a los que se pretende dar solución, y el uso de tecnologías de bajo coste es fundamental para ello. A continuación se describen algunos de estos dispositivos que se analizaron para decidir con cuál se llevaría a cabo la investigación.

3.2.1 Microsoft Kinect

El estado actual de experiencias de rehabilitación basadas en Kinect es escaso en cuando a datos funcionales y de validación, debido a que la mayoría de los estudios están basados en pruebas de concepto.

Figura 3.2: Microsoft Kinect Xbox One

Este dispositivo capta movimientos amplios del cuerpo completo. Como ventajas, la principal es que se trata de un dispositivo de interacción libre, que no requiere instrumentación del paciente, a un precio asequible (100 € en Amazon). No obstante presenta limitaciones, que se han descrito para la rehabilitación de pacientes con accidentes cerebro vasculares.

- La mayoría de los estudios de evaluación se centran en la realización de movimientos groseros, que han mostrado elevada correlación con los equipos de análisis de movimiento. Sin embargo, la evaluación de movimientos más específicos es necesaria.
- Kinect no es viable para evaluar la rotación interna del hombro. Clínicamente no se ha mostrado todavía esta utilidad.
- Habilidades motoras finas no se pueden capturar solamente mediante kinect, siendo necesaria la fusión con otros sistemas de sensores como los inerciales.
- No es viable para su uso por pacientes con afectación severa de la función motora, debido a que rangos de movimiento habitualmente amplios en la condición sano, que se encuentran muy reducidos, son difíciles de capturar con precisión.

En la aplicación de Kinect en Lesión Medular se ha detectado una limitación adicional en pacientes con tetraplejia con afectación de la función del miembro superior: interferencias con las partes metálicas de la silla de ruedas que producen un movimiento del avatar dentro de la aplicación virtual, en ausencia de movimiento voluntario del paciente.

3.2.2 Leap Motion Controller

Se trata de un dispositivo pequeño, *low cost* (65 € en Amazon) que ofrece enormes posibilidades por ser de interacción libre, sin necesidad de sensores sobre el cuerpo. Permite extender la mano y golpear, agarrar y pellizcar a través del mundo digital.

Figura 3.3: Leap Motion

La tecnología de Leap Motion consiste en dos cámaras y tres LEDs infrarrojos. La intensidad de la luz de los LEDs se ve limitada por la energía que ofrece la conexión USB. El controlador USB del dispositivo lee la información que recibe del sensor y la envía vía USB al *tracking-software* de Leap Motion. El servicio de Leap Motion se encarga de procesar la información de la imagen. Una vez ha compensado la luz ambiental y los objetos de fondo, se analizan las imágenes para reconstruir una representación 3D de lo que captura el dispositivo. La siguiente capa se encarga de extraer la información que coincide con elementos como los dedos.

Actualmente Leap Motion tiene una amplia comunidad de desarrolladores, siesta esta muy activa. Los lenguajes más populares en los que se programan las aplicaciones para Leap Motion son JavaScript y C#.

3.2.3 Myo Gesture ArmBand

El brazalete *Myo* permite controlar de forma inalámbrica la tecnología con gestos y movimientos del brazo y de la mano.

Figura 3.4: Myo Gesture ArmBand

Consta de IMUs que capturan movimientos y rotaciones del brazo, y sensores de actividad muscular que recogen los gestos de la mano. Se puede controlar el teclado y otras aplicaciones. Dispone de SDK para desarrollar aplicaciones para control y automatización de procesos en el hogar y Realidad Virtual.

3.3 Revisión del estado del arte en Juegos Serios en el contexto de la rehabilitación de pacientes con afectación del miembro superior tras enfermedades neurológicas

En esta sección se describen juegos serios encontrados en la revisión de trabajos de investigación similares.

Aún son muy escasas las aportaciones de juegos serios en la rehabilitación de lesión medular, por lo que se amplió la búsqueda a juegos desarrollados con el objetivo de rehabilitar el miembro superior tras una afectación neurológica.

El articulo [1], realiza una revisión de los sistemas de realidad virtual utilizados en la rehabilitación de pacientes con ictus.

Es un hecho que la realización de ejercicios en entornos virtuales en pacientes en fase subaguda y crónica postictus puede mejorar la habilidad para realizar tareas motrices y actividades de la vida diaria. [5], esto es posible porque la práctica reiterada e intensiva de tareas motrices promueve la recuperación funcional y estimula la realización autónoma de las habilidades entrenadas. De este hecho surgen terapias que utilizan sistemas de realidad virtual como complemento a la terapia convencional. Permiten llevar el tratamiento al domicilio del paciente y aumentar la cantidad de terapia, además el personal clínico puede evaluar los progresos y modificar las sesiones.

Un ejemplo de sistema inmersivo empleado en la rehabilitación de pacientes que han sufrido un ictus es Sistema Interactive Rehabilitation Exercise (IREX®): el paciente ve una pantalla en la que se encuentra representado por un avatar con su imagen, captada por una cámara, e interacciona con un guante. Se comprobó que con su práctica reiterada los pacientes alcanzaban mejorías en actividades de vida diaria, transferencias, equilibrio y capacidad para saltar bordillos. Hay otros sistemas, como el CyberGlove[4] con los que se ha conseguido mejorar la capacidad de prensión y disminuir la latencia en la realización de actividades manuales.[20].

The Rutgers arm[17] es un sistema para la rehabilitación de los miembros superiores. El sistema se probó en un paciente que sufrió un accidente cerebro vascular, los resultados obtenidos muestran una mejora en el control motor del brazo y en el rango de movimiento del hombro.

El sistema consta de una base de dos juegos basados en realidad virtual no inmersiva, desarrollados en Java3D. En el equipo de desarrollo se contó con un terapeuta para la definición de los ejercicios que permitirían entrenar el movimiento del brazo y del hombro.

Cuando se inicia el sistema, aparece la imagen que se muestra en la figura 3.5, que mide el rango de movimiento del usuario, siguiendo las instrucciones que van apareciendo en pantalla.

[4] http://www.cyberglovesystems.com/

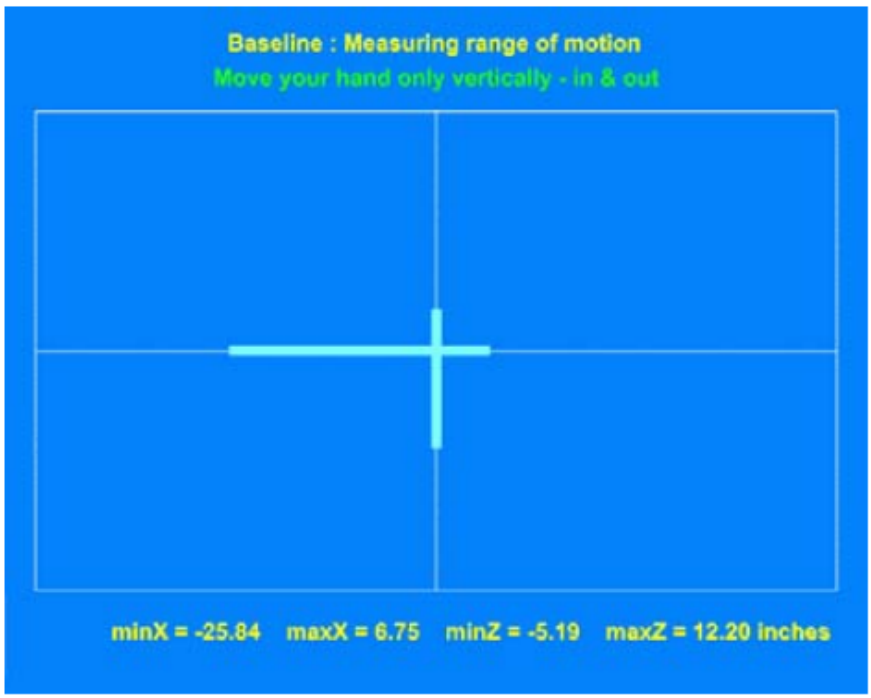


Figura 3.5: Calibración de *The Rutgers arm*

The Pick-and-Place game es el primero de los juegos del sistema. Como se ve en la imagen 3.6, el escenario lo constituye una habitación, en la que se encuentra una mesa. El objetivo es simular un ejercicio de simulación real con una pelota, utilizando un guante con sensores. El ejercicio consiste en colocar la pelota en una posición específica. La longitud de la trayectoria y la dificultad de la tarea aumentará cuando lo haga la habilidad del paciente. El modelado de los objetos se llevo a cabo usando 3DS Max y VRML.

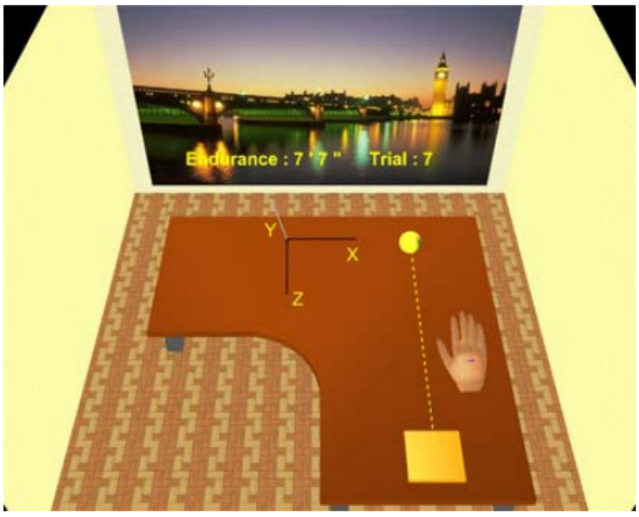


Figura 3.6: *The Pick-and-Place game*

Breakout3D game, es una versión del clásico *Breakout* de Atari. El entorno virtual esta compuesto por el bloque que representa al jugador, los bloques que deben destruirse, una bola y el tablero sobre el que se sitúa el resto de elementos. El jugador cuenta con cuatro bolas para destruir la mayor cantidad de bloques y se mueve sobre el escenario según la extensión del hombro. Los niveles de dificultad se establecen cambiando el tamaño de la bola y su velocidad, la longitud del bloque jugador o de los bloques.

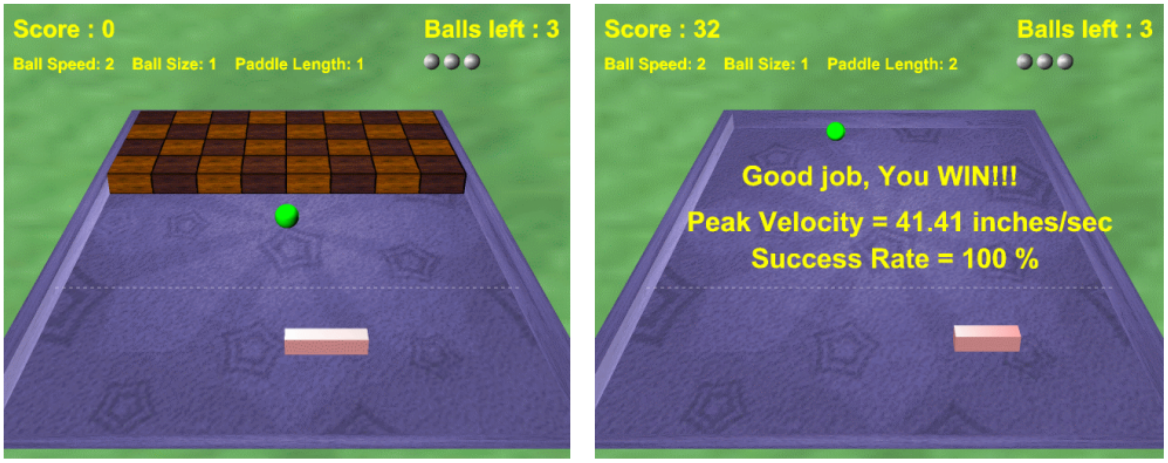


Figura 3.7: *Breakout3D game*

El estudio [3] muestra un sistema basado en realidad virtual en el que se hace uso de los dispositivos CyberGlove y Rutgers Master II-ND del que hacen uso cuatro pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular.

El primero de los ejercicios es para trabajar el rango de movimiento, y consiste en mover el dedo para limpiar el espejo que se ve en la imagen, cuanto más se mueva el dedo, mayor es el área de imagen revelada.

El segundo de los juegos se usa para trabajar la velocidad de los movimientos. Hay una mariposa que vuela en círculos sobre la mano del paciente, hay que asustarla cerrando la mano lo suficientemente rápido, si no, la mariposa continuará volando.

Con un piano virtual se pretende que el paciente flexione el dedo activo y presione la tecla correspondiente, mientras que los otros dedos deben mantenerse extendidos.

Por último, la fuerza del dedo se trabaja con el último de los juegos. Se mide el desplazamiento del pistón que el paciente puede lograr haciendo fuerza con los dedos. Es el único de los juegos de que hace uso del Rutgers Master II-ND.

Rehabilitation Gaming System (RGS)[8] es un sistema que trabaja la rehabilitación de pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular. Se hace uso de una cámara para rastrear el movimiento de las manos, y dos guantes para el movimiento de los dedos y se construyen dos brazos virtuales que imitan el movimiento del sujeto dentro del juego.

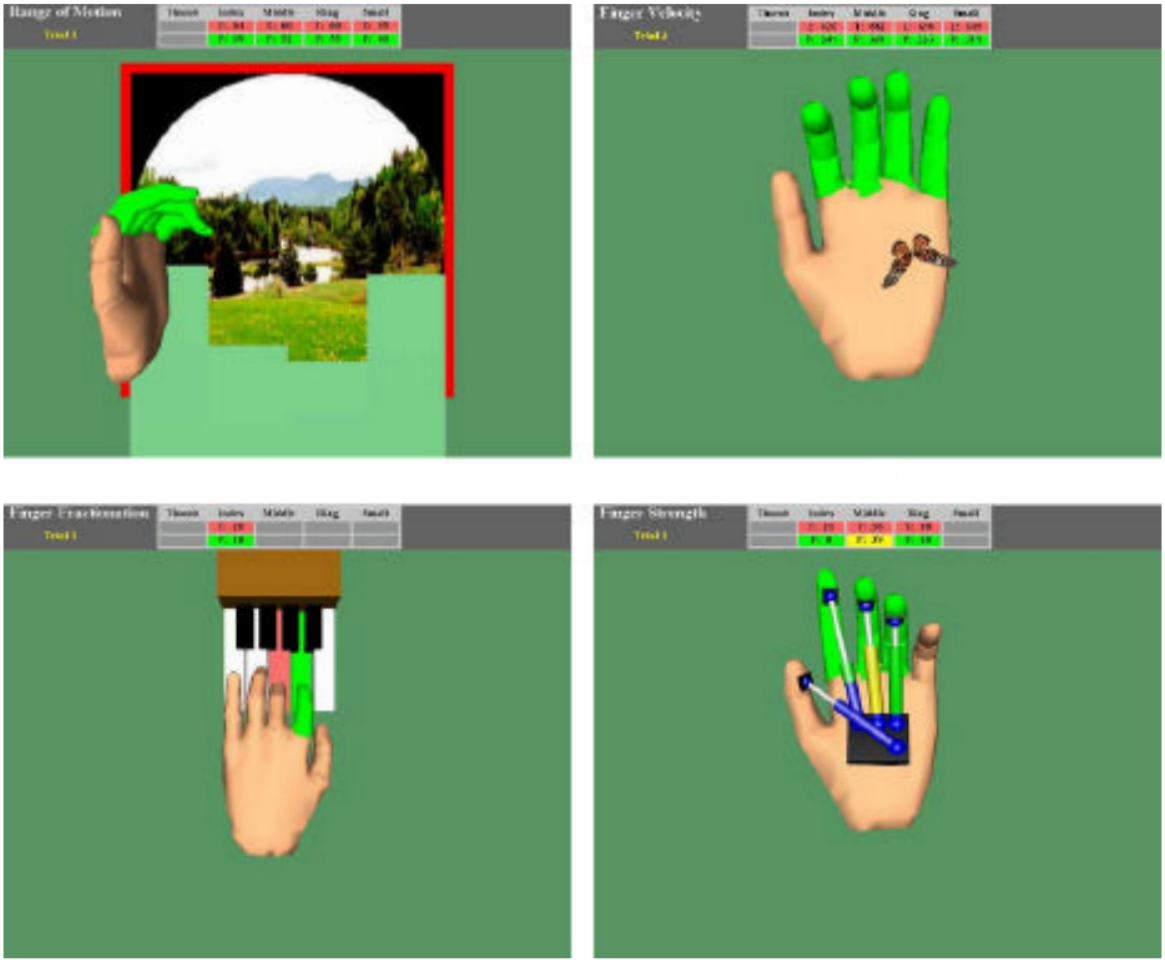


Figura 3.8: *Aplicaciones virtuales* del estudio [3]

El escenario virtual, *Spheroids* consiste en un paisaje con árboles y una vista en primera persona de unos brazos virtuales, que imitarán el movimiento del sujeto real. Unas esferas que mueven hacia el usuario y este debe interceptarlas.

En el trabajo de Burke et al.[7] publicado en el 2009 se desarrolló una serie de juegos para la rehabilitación de los miembros superiores para personas que han sufrido un accidente cerebro vascular.

Uno de los juegos es *Catch task*, centrado en la rehabilitación bilateral; *Whack a mouse* se diseñó para mejorar la precisión y la velocidad de movimiento del miembro superior; *Rabbit Chase*, está diseñado para trabajar un único brazo, el jugador debe atrapar un conejo mientras mira por los agujeros de la pantalla; *Arrow Atack* fue desarrollado para trabajar la rehabilitación bimanual, el jugador debe tocas las flechas correspondientes con ambas manos al mismo tiempo; *Virtual Vibraphone*, usa el *wii mote* y su objetivo es trabajar la rehabilitación de muñecas y brazos, creando una melodía o tocando una ya existente.

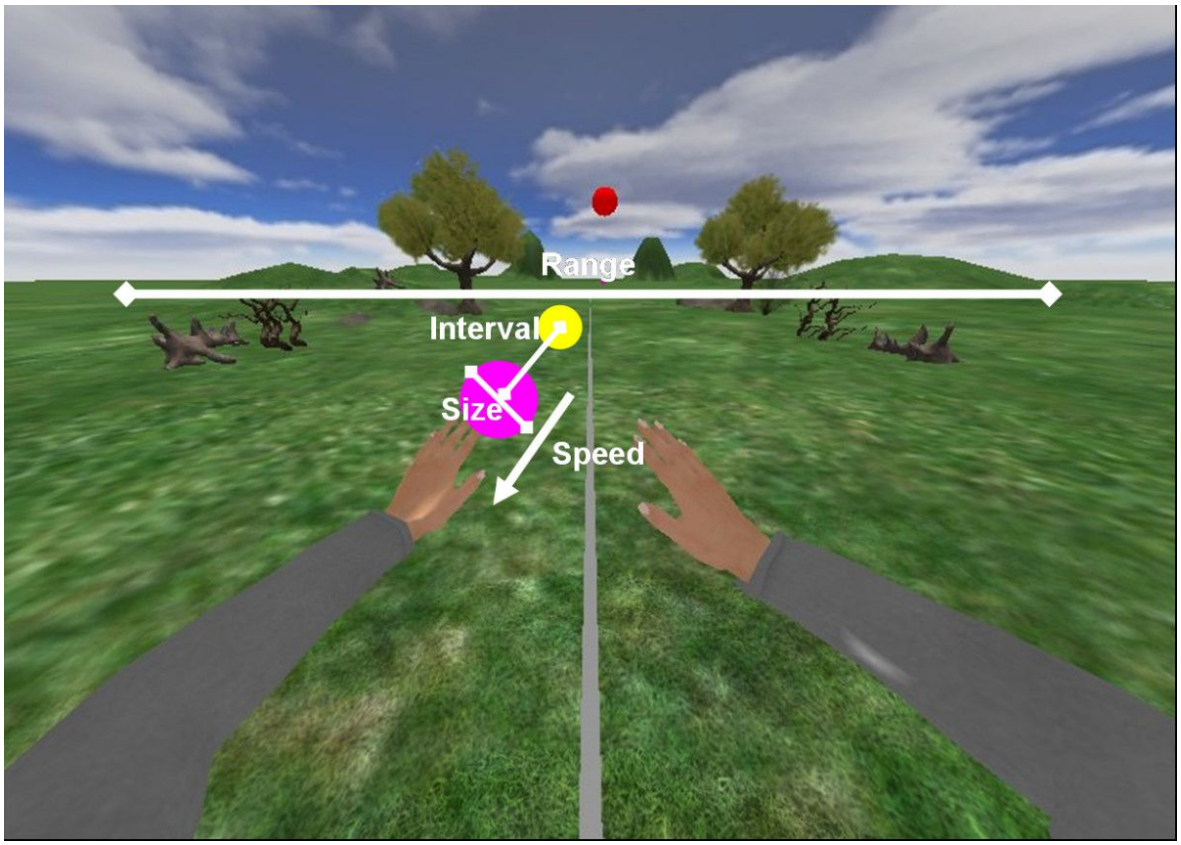
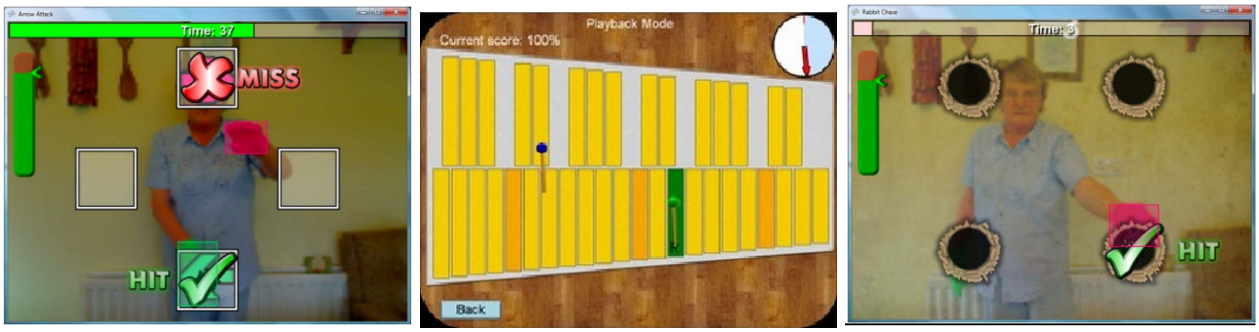


Figura 3.9: *Spheroids*



(a) *Arrow Atack* (b) *Virtual Vibraphone* (c) *Rabbit Chase*

Figura 3.10: Aplicaciones virtuales investigación [6]

En el 2011, Sergio Moya[21], desarrolló un entorno virtual para la neurorrehabilitación de los miembros superiores. La idea es que los usuarios simulen actividades de la vida diaria como coger una botella o abrir una puerta. Se hace usando sensores inerciales que proporcionan información en tiempo real sobre la orientación del hombro, el codo y la muñeca. Un ejemplo puede verse en la figura 3.11.

Figura 3.11: Entorno virtual de neurrehabilitación

Capítulo 4

Método de Trabajo

Este trabajo involucra la cooperación entre distintas disciplinas, por un lado los médicos y terapeutas ocupaciones incorporan todo aquel conocimiento referente al paciente, su cuerpo y su lesión; y por el otro, la ingeniería, encargada de desarrollar los mecanismos que facilitarán la vida de dichos pacientes. Es por lo tanto, de vital importancia, la comunicación y el entendimiento entre ambas partes.

En esta sección, se describe el equipamiento empleado en el sistema, así como las soluciones tecnológicas elegidas. Se describe el diseño conceptual de la plataforma, así como el desarrollo y la implementación brevemente, concluyendo con la prueba de concepto y medidas de viabilidad de la misma.

4.1 Materiales y equipamiento

4.1.1 Leap Motion Controller

Finalmente, el dispositivo seleccionado para la investigación fue el controlador *Leap Motion*. A continuación se describen sus características técnicas. [2]

Figura 4.1: Composición hardware. Fuente: [2]

Es un dispositivo cómodo y práctico debido a sus reducidas dimensiones: 75 mm de largo, 25 mm de ancho y 11 mm de alto. Está formado por dos cámaras, tres LED's y un microcontrolador.

Cada una de estas cámaras cuenta con un sensor monocromático, sensible a la luz infrarroja, con una longitud de onda de 850 nm (pueden trabajar a una velocidad de hasta 200 fps). Los LEDs se encargan de iluminar la zona de cobertura por inundación. Trabajan en el espectro de luz infrarroja a una longitud de onda de 850 nm. El microcontrolador contiene el programa que controla todo el dispositivo (entre otras cosas, para regular la iluminación) y se encarga de recoger la información de los sensores para luego enviarla al driver.

La zona de cobertura es una semiesfera de 61 cm de radio. Depende del ángulo de visión de las lentes de las cámaras y de la intensidad máxima que puede entregar la conexión USB a los LEDs.

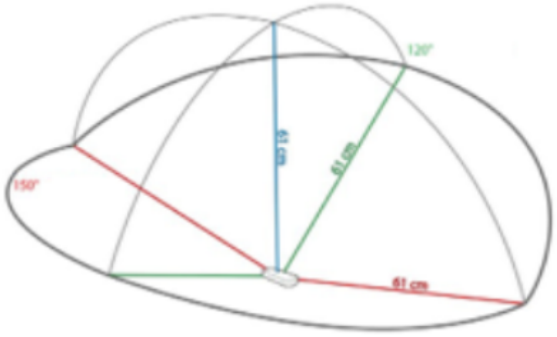


Figura 4.2: Zona de cobertura. Fuente: [2]

El funcionamiento del dispositivo es el siguiente: Cuando se sitúan las manos sobre el *Leap Motion* son iluminadas por la luz infrarroja, lo que produce una reflexión que incide en las cámaras. Los datos recogidos se almacenan en una matriz en la memoria del controlador USB, posteriormente se determina la posición de las manos en el sistema de coordenadas cartesianas de *Leap Motion* a través de técnicas de visión estereoscópica.

El sistema de coordenadas presenta la orientación que se ve en la imagen 4.3.

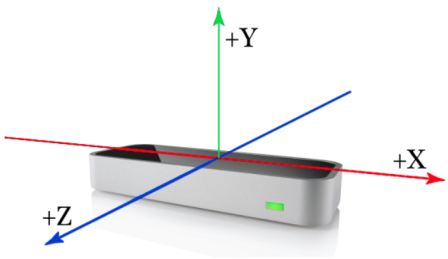


Figura 4.3: Coordenadas cartesianas. Fuente: [2]

4.1.2 Características del PC utilizado

En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas del equipo con el que se trabajó.

Procesador	Procesador 7ª generación Intel ® Core™ i7
Sistema operativo	Windows 10 Home
Tarjeta gráfica	Gráficos NVIDIA® GeForce® 920MX de 2 GB
Memoria RAM	DDR4 de 12 GB
Almacenamiento	HDD de 1 TB
Pantalla	Full HD de 39,62 cm(15,6")
Dimensiones	(mm): 379 x 260 x 22.9 (pulgadas): 14,92 x 10,24 x 0,9

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas

4.1.3 Plataforma de desarrollo Software elegida

Tras realizar la comparación de los motores de videojuegos del apartado 3.1.1. se decidió usar para la investigación *Unity 3D*. En primer lugar, *CryEngine* se descartó porque *Leap Motion* no tiene soporte oficialmente para este motor, por lo tanto, las opciones eran tanto *Unreal* como *Unity*. Finalmente se optó por Unity porque permite un flujo de trabajo más rápido, que permite obtener prototipos funcionales en menor tiempo.

4.2 Diseño conceptual de la plataforma *RehabHand*

En los siguientes apartados se hace un repaso de los requisitos clínicos y contenido gráfico de las aplicaciones virtuales; así como de los movimientos rehabilitados y variables cinemáticas de interés.

4.2.1 Plataforma principal información clínica

La plataforma principal *RehabHand* integra los distintos juegos que se van desarrollando con un registro de pacientes.

La idea es dar un toque clínico a los juegos, de forma que pueda realizarse un seguimiento personalizado por paciente.

4.2.2 *Juego Serio 1: Box and Block*

La simulación virtual de la escala Box and Block tiene dos variantes, la primera es desarrollar una versión virtual de la escala, siguiendo las directrices del artículo general. En el lado de la caja que corresponde con la mano dominante del sujeto se sitúan 100 cubos de 2.5 cm.

Se inicia un contador, y el usuario cuenta con un tiempo limitado para pasar el mayor número de cubos de un lado a otro. Hay un test inicial que dura 15 segundos y no contabiliza los puntos, y posteriormente la prueba real, que contabiliza los fallos y tiene una duración de 60 segundos.

Con este escenario, además de validar los resultados, se pretende trabajar la función de alcance, manipulación y agarre de los objetos.

La segunda variante es la escala Box and Block en formato juego, que sirve como entrenamiento para la ejecución de la escala. Se establecen distintos niveles de dificultad según el tiempo, tamaño y número de objetivos dependiendo de la pinza o prensión realizada. Dicha pinzas serían las siguientes:

- Pinza término-terminal, la que correspondería con la que se realiza al coger un alfiler.
- Pinza subtérmino-terminal, coger un bolígrafo.
- Pinza tridigital, uniendo el pulgar, el índice y el corazón.
- Pinza subtérmino-lateral, corresponde con el movimiento de coger una llave.
- Prensión con todos los dedos.

Para obtener los niveles de dificultad se ha hecho un análisis de los niveles de los juegos terapéuticos de otro sistema (*Armeo Spring*), para tomar como base, pero se definirá un patrón de normalidad mediante pruebas con el juego.

Antes de iniciar el juego se parametrizará la ejecución del agarre, para el caso en el que el paciente no tenga capacidad de agarre baste con pasar la mano por delante del objeto para que este se arrastre.

4.2.3 *Juego Serio 2:* Laboratorio

El siguiente juego a desarrollar fue el *Laboratorio*. El objetivo de este juego es trabajar la función de alcance, agarre y pronación-supinación de la muñeca mediante la ejecución de los siguientes movimientos:

- Prensión cilíndrica.
- Prensión esférica.
- Pinzas.
- Pronación-supinación de la muñeca.

La idea principal del juego consistía en un laboratorio, en el que se están realizando experimentos siguiendo unas instrucciones que se muestran en pantalla, indicando los diferentes elementos que hay que añadir al experimento.

Estos elementos serán o bien pastillas (para coger mediante diferentes pinzas), probetas o botes (esféricos, cilíndricos...) para trabajar los distintos agarres. Además se situarán en distintos lugares de la mesa para realizar alcances. En la siguiente tabla se muestran los niveles de dificultad, variando en función del tamaño de las probetas y las pastillas a manipular y las distancias de los objetos.

4.2.4 *Juego Serio 3:* The Explorer

El objetivo principal de este juego es valorar la coordinación global del miembro superior y precisión y suavidad en el extremo distal.

La idea de este juego es que el paciente sea un explorador. El juego está diseñado en baja poligonalización y el escenario inicial es una especie de desierto con ruinas, que la cámara va cruzando hasta llegar a unas puertas, que se abren y muestran una sala interior, oscura y mal iluminada por unas antorchas repartidas a lo largo de la estancia, y en medio de la misma, un cofre. Para poder abrirlo debe realizar un acertijo (trayectoria prefijada). La trayectoria se podrá realizarse con el dedo o un bolígrafo.

4.3 Desarrollo e implementación de la plataforma *RehabHand*

A continuación se hace una breve descripción de los aspectos más destacados en el desarrollo y la implementación de la plataforma y cada uno de los juegos.

4.3.1 Plataforma principal información clínica

Se ha desarrollado como un proyecto de *Unity*. Se compone de una pantalla con un formulario, en el que se añadirán los pacientes, y otra pantalla con el registro de los ya existentes, permitiendo seleccionar uno y pasar a la terapia, esto es, el conjunto de juegos, o sacar un informe de la evolución de dicho paciente.

Los pacientes se almacenan en archivos *.csv* en los que se añadirán los registros de puntuaciones de cada una de las sesiones que se realicen.

4.3.2 *Juego Serio 1: Box and Block*

El proyecto se compone de varias escenas, que se describen a continuación.

Escena *Menu*

Esta escena está orientada al menú principal de juego. La componen distintos elementos, el principal, *Canvas*. Está compuesta por un panel general, que proporciona el acceso al resto de componentes del juego.

El panel está compuesto por cinco botones:

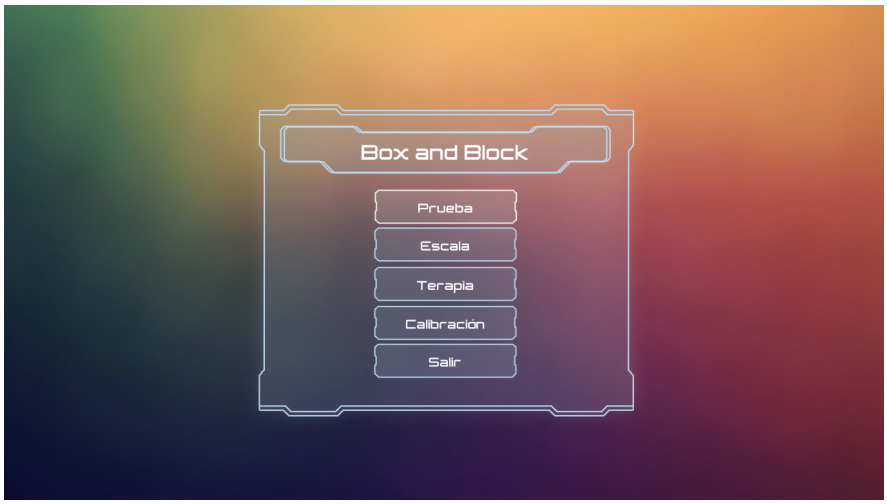


Figura 4.4: Menu Principal

Otro de los elementos de la escena es *MusicObject*, que es el encargado de proporcionar música de fondo a todo el juego.

LeapDataObject también es un elemento importante, pues su función es recoger los índices cinemáticos que podrán analizarse posteriormente.

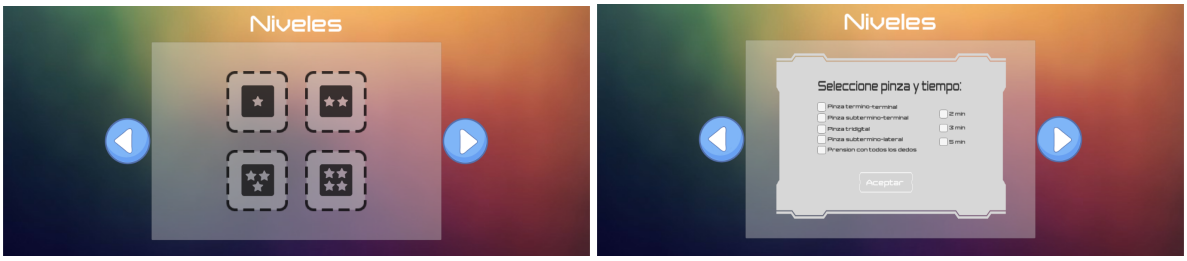
Escena *Levels*

La finalidad de esta escena es seleccionar los niveles que van a jugarse en una partida, ya que el objetivo no es simplemente ir pasando nivel a nivel, si no organizar una sesión atendiendo a las necesidades del usuario.

Hay distintos niveles dentro del juego, lo que diferencia a unos de otros es el tamaño de los cubos, cuanto mayor sea el cubo, más fácil será el nivel. A su vez, cada nivel puede configurarse con un tiempo de juego determinado, con más tiempo de juego, más cubos hay que pasar al otro lado. Por otro lado, para cada nivel y con cada tiempo de juego (independientemente) debe seleccionarse la pinza con la que se va a trabajar, ya que dependiendo de la pinza que se quiere trabajar, cambiará el número de cubos que hay que trasladar. En resumen, en cada juego, el número de cubos que hay que mover de un lado al otro de la caja, para lograr una puntuación del 100 % depende del tamaño de los cubos (nivel), del tiempo de juego y de la pinza que se realiza.

Los niveles son independientes unos de otros, por lo que se puede jugar a cualquier nivel sin haber superado los anteriores.

La escena está compuesta por un panel con cuatro botones, y dos botones a los lados del panel, para volver atrás o para empezar a jugar.



(a) Escena *Levels* (b) Seleccionar opciones

Figura 4.5: Seleccionar nivel

Los cuatro botones del panel representan cada uno a un nivel (Muy fácil, fácil, medio, difícil), al pulsar cualquiera de ellos se abre un panel de selección como el que se muestra en la imagen.

Es obligatorio seleccionar una pinza y tiempo, cuando se tenga seleccionado puede pulsarse aceptar. Para todos los niveles en los que se vaya seleccionando tiempo y pinza aparecerán marcados con un tic verde, pulsando otra vez en el nivel se quita el tic.

Cuando se pulse el botón de "*Play*" se hará una lista con los niveles que tengan tic verde, y la sesión de juego consistirá en los niveles seleccionados, con los parámetros de tiempo y pinza marcados. El orden de los niveles será por incremento de la dificultad. En esta escena se ha implementado LevelScript, cuya función es la gestión de los elementos que acaban de ser descritos.

Escena *Calibration*

Es la escena más sencilla visualmente. Compuesta por un panel de instrucciones y los elementos de *LeapMotion*.

El objetivo de esta escena es medir las variables grab y pinch de un usuario, abriendo y cerrando la mano, en la medida de lo posible, para medir el umbral en el que podrán trabajar en el juego.

En función de este umbral se modificarán algunas variables en el juego, para facilitar el agarre de los cubos si es necesario.

Escena *Game*

El componente principal es el modelo de la caja, realizado usando *Blender*, siguiendo las medidas descritas anteriormente, y añadiendo una textura imitando a la madera para mantener la semántica de la escala original. El modelo es exportado en formato FBX.

La caja, además, cuenta en su jerarquía con un *EmptyObject*, denominado *"SourceCubes"*, posicionado estratégicamente en el punto en el que se crearán los cubos. Contiene además, un script encargado de crear los cubos necesarios en cada nivel.

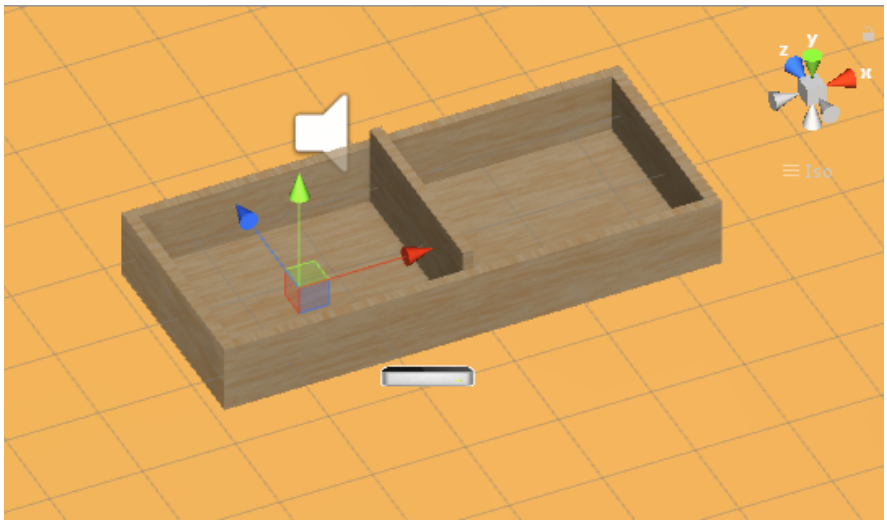


Figura 4.6: *SourceCubes*

Para los cubos se ha construido un *prefab*, es decir, una plantilla a partir de la cual se pueden crear nuevas instancias del objeto.

Este *prefab* del cubo está constituído por distintos componentes, destacando los más importantes: **transform**, con la escala indicada en el artículo o por el nivel de correspondiente; las componentes físicas **boxcollider** y **rigidbody**, el primero crea un objeto (en este caso con la forma de un cubo) para detectar las colisiones que tenga el objeto, y el segundo, que le añade físicas al objeto, como la masa o que le afecte la gravedad; y los *script* asociados, *GrabbableObject* y *CubeScript*, el primero proporcionado por la biblioteca de *Leap Motion*, asigna ciertas propiedades al GameObject para permitir un mejor agarre, y CubeScript que añade un material aleatorio dentro de un array de colores, con una posición y rotación aleatoria, para que el conjunto de los cubos dé sensación de diversidad y aleatoriedad. Dentro de este script también se gestiona lo que ocurre cuando un cubo está en un lado o al otro de la caja, y si supera la barrera que separa ambos lado, así como los efectos de sonido de los cubos al chocar con la madera o al conseguir un punto.

Limitaciones

Algunas de las limitaciones encontradas hasta el momento han sido las siguientes:

- Se estudió la posibilidad de pausar el controlador para evitar que se capten los movimientos de la mano en un momento dado, pero en la versión en la que se desarrolló el proyecto (porque la parte de los índices cinéticos estaba ya desarrollada en una versión anterior) no se contempla esta posibilidad. (Por ejemplo, pausando solo el tiempo, las manos continúan en movimiento dentro de la escena).

- Los modelos de las manos no funcionan de la forma en la que lo hacen los GameObject a los que se les ha añadido algún componente físico, y para el correcto funcionamiento de las colisiones ha sido necesario implementar un método para saber si lo que ha entrado en contacto con un objeto es el modelo de la mano. Además, se hace uso de las propiedades de los GrabbableObject para saber si un objeto está siendo arrastrado por la mano.

- Se quería aplicar a un objeto ciertas propiedades físicas de forma que supusieran un obstáculo para las manos, pero que a su vez, éstas no pudieran interactuar con él, es decir, no desplazarla, ni agarrarla... pero esta opción no es posible, uno de los desarrolladores de la SDK de LeapMotion nos notificó que no está diseñado para ello, ya que rompería la presencia de la mano.

4.3.3 *Juego Serio 2:* Laboratorio

El juego se compone por varias escenas de Unity. La implementacion de las escenas *Menu* y *Levels* es similar a las del *Box and Block*, cambiando únicamente algunos aspectos del diseño gráfico, y en las opciones de cada nivel, únicamente se selecciona la mano con la que se desee trabajar, al contrario de lo que pasaba en el juego anterior, que se seleccionaba la pinza concreta que se quería ejercitar, aquí se trabajan todas en conjunto.

Escena *Game*

La Escena *Game* es la escena principal del juego, el escenario está compuesto una habitación que simula un laboratorio, con armarios, sillas, una pizarra. El elemento principal de la sala es una mesa con diferentes probetas, matraces, vasos de precipitado y en el centro, un recipiente, donde se irán añadiendo los diferentes ingredientes de cada nivel. Simulando la posición del científico al lado de la mesa se sitúa el controlador virtual de *Leap Motion*.

Al comienzo de cada nivel se busca la lista de ingredientes que corresponde y se añaden en escena, encima de la mesa, dónde son accesibles con las manos virtuales de Leap Motion. Los ingredientes son de diferentes tipos, y con ellos se practican diferentes pinzas o agarres: Bote de pastillas, cápsulas, y probetas cónicas o redondas.

El objetivo es coger los ingredientes y añadirlos en el recipiente central de la mesa. El juego se completa cuando se han añadido todos los ingredientes, alcanzado el 100 % de completitud de la tarea, o si se acaba el tiempo. Para asegurar que no se pierden ingredientes, cuando alguno cae fuera de la mesa vuelve a situarse en su posición original. Esto se ha conseguido mediante el uso de *trigger*. Con respecto a la interfaz gráfica de la escena, hay un contador de tiempo, una barra de progreso y un desplegable, en forma de pizarra que muestra la cantidad de elementos de cada tipo que ya se han añadido al experimento.

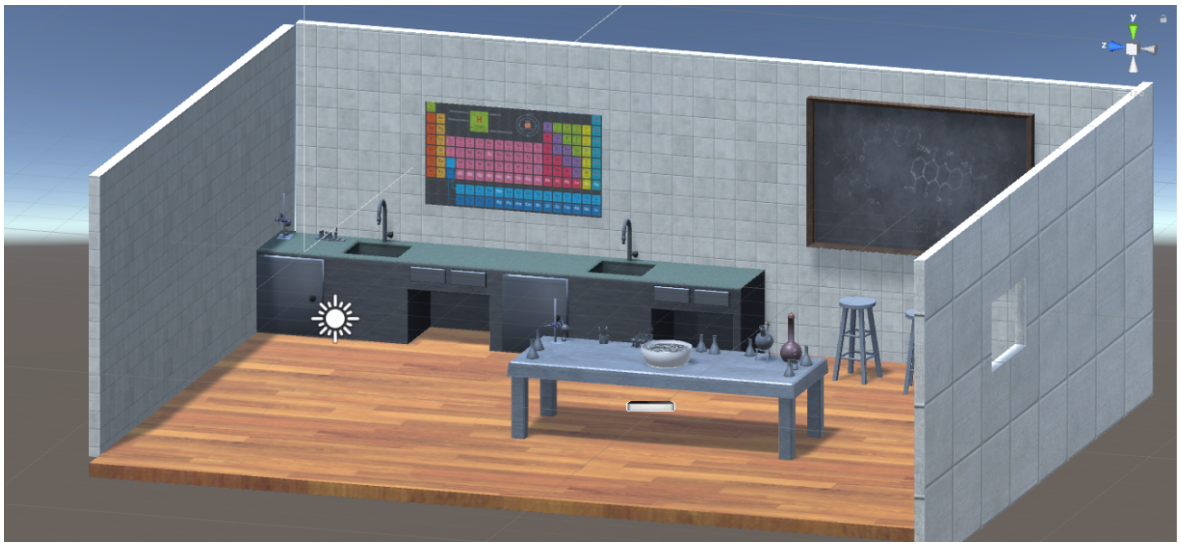


Figura 4.7: Escena *Game* de Laboratorio

Sistema de diálogos

Se ha implementado un sistema de diálogos con la finalidad de proporcionar *feedback* a lo largo del juego.

Los diálogos se han definido en un archivo *json*, y según el momento del juego, se selecciona uno de manera aleatoria, dentro del conjunto correspondiente.

Limitaciones encontradas

- En algunos casos, los pacientes no pueden abrir y cerrar la mano, por lo que se quiere implementar la función de *autogrip*, que si está activada los objetos se pegan a la mano al tocarlos. Como la API no proporciona esta funcionalidad se implementaron las funciones que permiten detectar si un objeto estaba siendo tocado, que se adhiera a la mano.

- El motor de juego Unity no proporciona simulación de fluidos, que se requería para el juego del laboratorio, ya que algunos ingredientes precisan que se vuelquen para verter el contenido. La solución que se llevó a cabo fue exportar una animación de Blender a una secuencia de objetos obj, y mediante un *script* generar la animación mediante dicha secuencia.

- Para los ingredientes del juego de laboratorio, se intentó utilizar una versión simplificada de la malla como *collider*, pero no está soportado para la versión de Unity si el objeto es *no kinematic*, y si lo es la mano del Leap Motion no entra en contacto con ellos, por lo que se optó por por combinar diferentes *collider* proporcionados por Unity.

4.3.4 *Juego Serio 3:* The Explorer

El juego se compone de una introducción inicial. Comenzando en el desierto, la cámara lo atraviesa hasta llegar a unas puertas, que se abrirán y permitirán al jugador introducirse en la cueva donde se encuentra el tesoro.

La cueva es una escena muy sencilla, en el centro se encuentra el cofre, y la única luz de la escena proviene de las antorchas. El explorador avanza hacia el centro de la escena, y las puertas se cierran a su paso. Cuando el explorador se acerca al cofre, se le advierte que para poder abrir el cofre debe realizar un acertijo, que es el objetivo principal del juego.

Escena *Game*

La idea general del juego es representar la figura con un solo trazo, el movimiento se hace en el aire, y con él pretende medirse la trayectoria y la precisión en la ejecución del ejercicio.

En la escena se muestra un dibujo compuesto por puntos y aristas, ambos colisionables en el espacio 2D gracias a collider2D. Para poder colisionar con ellos se ha añadido otro collider 2D tanto en la punta del dedo como en el final del '*tool*' (si en lugar de la mano se utiliza un bolígrafo para realizar el ejercicio, el objeto virtual que lo representa se denomina '*tool*'). El dibujo está representado por un grafo.

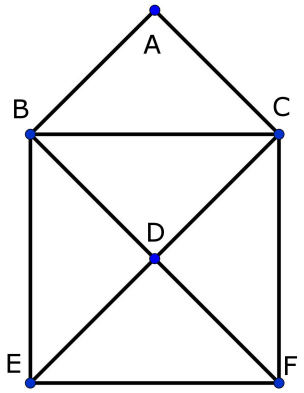


Figura 4.8: Representación del grafo

```
1 Nodos = {A, B, C, D, E, F}
2 Aristas = {(A,B), (A,C), (B,C), (B,D), (B,E), (C,D), (C,F), (D,E), (D,F), (E,F)}
```

code/nods.tex

La idea general es partir de una pila vacía de nodos. Cuando el jugador, con su mano o el bolígrafo, entra en contacto con el *collider* de un nodo se comprueba si la pila está vacía, si es así, el nodo se añade directamente a la pila, si no, se comprueba si el nodo con el que el jugador a entrado en contacto pertenece a la lista de vecinos del nodo que está en el tope de la pila, si es así es porque el movimiento es correcto, y la arista que los une pasaría a estar

Tabla 4.2: Matriz de adyacencia

	A	B	C	D	E	F
A	0	1	1	0	0	0
B	1	0	1	1	1	0
C	1	1	0	1	0	1
D	0	1	1	0	1	1
E	0	1	0	1	0	1
F	0	0	1	1	1	0

'visitada', modificando el material de la misma para que se vea gráficamente en el juego.

Cuando se han visitado todas las aristas, el juego se ha completado satisfactoriamente.

Si se llega al punto en el que hay un nodo en el tope de la pila y todas sus aristas han sido visitadas pero no se ha alcanzado el número de aristas en la escena, el juego no se puede completar de manera satisfactoria.

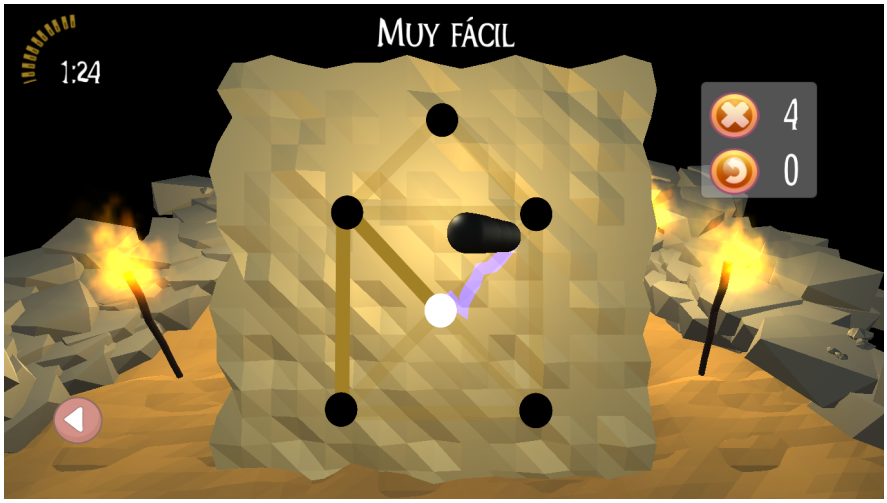


Figura 4.9: Figura seguimiento

También se ha implementado la opción de *ayuda*, de forma que al seleccionarla, el juego indica cuál es el siguiente punto a visitar.

4.4 Prueba de concepto y medidas de viabilidad de la plataforma *RehabHand*

La plataforma *RehabHand* se ha desarrollado en la Unidad de Biomecánica y Ayudas Técnicas del Hospital Nacional de Parapléjicos con colaboración de un equipo multidisciplinar. Los médicos del Servicio de Rehabilitación del Hospital Nacional de Parapléjicos y terapeutas ocupacionales detectaron las necesidades clínicas y los aspectos susceptibles de ser rehabilitados, que se tomaron como referencia y punto de partida para el desarrollo de los juegos adaptados a las necesidades de los pacientes con tetraplejia.

Antes de comenzar este desarrollo, se realizó un estudio experimental, como fase de aprendizaje validado previa, con el objetivo de analizar la capacidad de aprendizaje de los pacientes con tetraplejia para interraccionar con aplicaciones virtuales por medio de *Leap Motion*. Se utilizaron dos de las aplicaciones que trae integradas en *Application Home*, que fueron *Dancing Robot* y *Picking Petal*, y su opinión se tuvo en cuenta en el diseño de aplicaciones propias. En concreto, la mayoría de los pacientes coincidió en que a estas aplicaciones les faltaban las fuentes de *feedback* necesarias para realizar las tareas propuestas y un sistema de puntos que permitiera evaluar la mejora en el uso de las mismas.

En el desarrollo de la plataforma *RehabHand*, los pacientes están participando desde el inicio del proyecto, permitiendo que el desarrollo sea iterativo y centrado en las necesidades funcionales del paciente.

Este aspecto es de gran importancia, ya que los niveles de dificultad propuestos han de ser un compromiso entre la propia dificultad de la tarea y las capacidades funcionales de los pacientes. No pueden ser demasiado fáciles como para que resulten aburridas, ni demasiado difíciles como para que resulten una experiencia frustrante.

4.4.1 Participantes

En esta prueba de concepto han participado siete personas divididas en dos grupos. Un grupo de sujetos sanos (n=4) y un grupo de pacientes con lesión medular cervical (n=3), con afectación de la función del miembro superior. En la Tabla 4.3 se muestran las características demográficas y clínicas de los participantes que han participado en las fases de desarrollo.

Sujeto	Edad	Sexo	Lesión	ASIA	ZPP
P1	18	M	C4	A	C6
P2	40	M	C1	D	-
P3	20	M	C6	D	-
S1	39	F	-	-	-
S2	22	M	-	-	-
S3	25	F	-	-	-
S4	28	M	-	-	-

Tabla 4.3: Características de la muestra que participa en el desarrollo del juego virtual

4.4.2 Procedimiento experimental

Cada participante ha realizado una sesión experimental que consiste en la ejecución de cada aplicación propuesta en los niveles de dificultad seleccionados. Previamente se ha llegado a un consenso dentro del equipo de trabajo multidisciplinar en el que se han considerado las aplicaciones desarrolladas como versiones definitivas.

4.4.3 Variables analizadas

Para el primer juego, la escala virtual *Box and Block* se va a medir el número total de cubos que se consiguen pasar durante un minuto y el resultado del desempeño del juego relativizado con respecto al patrón de referencia.

Para el juego del Laboratorio se mide el tiempo de ejecución y el porcentaje de la tarea completado, en cada uno de los niveles propuestos.

Y para el Explorador, el tiempo de ejecución y el número de veces que la trayectoria se sale de la considerada ideal.

4.4.4 Escala clínica *Box and Block*

Con el objetivo de poder analizar la viabilidad de esta plataforma se ha utilizado una escala clínica, que es la escala *Box and Block* para validar la aplicación virtual propuesta.

Es una escala que los terapeutas ocupacionales usan para evaluar pacientes ya que está estandarizada. Mide la destreza manual mediante la manipulación de unos cubos.

Para la prueba el paciente se siente en frente de una mesa sobre la que se coloca una caja de madera dividida en dos compartimentos, en uno de ellos se colocan 100 cubos, de 2,5 cm de tamaño. La prueba consiste en pasar el mayor número de cubos posible durante un minuto, en el anexo 7.3 se describe en detalle.

Capítulo 5

Desarrollo

En este capítulo se describen las diferentes clases que componen cada juego, partiendo de una descripción general del mismo, y se continuará con descripciones más detalladas.

5.1 Plataforma principal: *RehabHand*

La plataforma principal *RehabHand* presenta una estructura muy sencilla, como puede verse en la figura 5.1. La clase *Patient*, constituida por algunos datos personales del paciente (nombre, número de historial, lesión, etiología y solicitante), y un constructor.

Por otro lado, la clase *MainManager*, es la principal ya que se encarga de gestionar el acceso a los diferentes juegos y el formulario de nuevos pacientes.

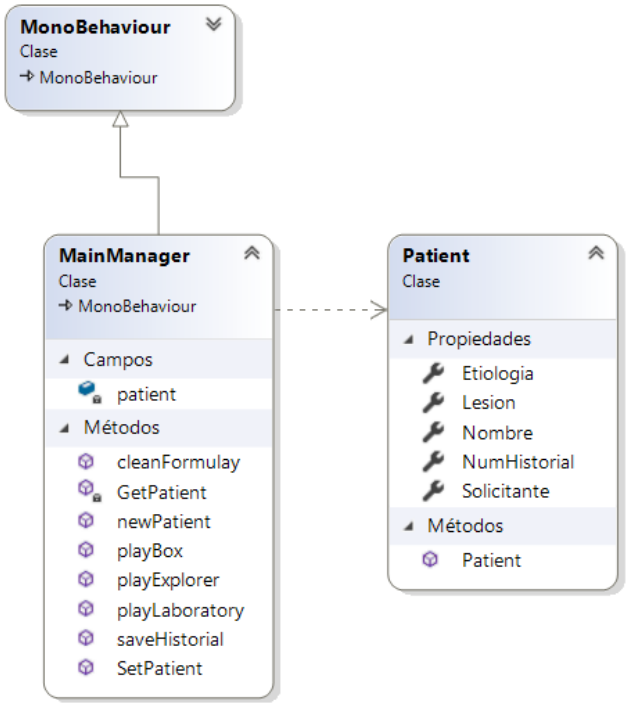


Figura 5.1: Diagrama de clases de la plataforma principal

5.2 Box and Block

En la figura 5.3 puede observarse un diagrama de clases simplificado con el que se pretende ilustrar el funcionamiento del juego. A continuación se describe brevemente.

Por un lado, la clase *PlayManager*, se encarga del control general del juego, del sistema de instrucciones de comienzo de partida, y de gestionar los cambios de nivel o de finalización del juego. Esto incluye la actualización de los nuevos datos del nivel que se va a jugar o de la interfaz gráfica. Tiene una relación de dependencia con la clase *Game*, que se compone, básicamente de los datos necesarios para desarrollar el nivel actual, una lista de todos los niveles que componen el juego, con sus características

Los niveles que definen un juego vienen definidos en un archivo *XML*. En dicho archivo vendrá indicado el nivel, con el tamaño que tendrán los cubos en ese nivel y un conjunto de subniveles. El *script ReadFileGame*, es el encargado de interpretar el archivo de juego *xml* y de construir una estructura de objetos, relacionados entre sí, que compondrán la jerarquía de niveles del juego. La estructura que presenta el archivo *game.xml* es la siguiente:

```
<game>
   <levels>
     <level>
       <Num_level>1</Num_level>
       <Size>0.5</Size>
       <sublevels>
          <sublevel>
             <Time>180</Time>
             <pinchs>
                <pinch>
                  <Name_pinch>
                      Pinza tridigital
                   </Name_pinch>
                   <Num_obj>50</Num_obj>
                </pinch>
             </pinchs>
          </sublevel>
       </sublevels>
     </level>
   </levels>
</game>
```

Figura 5.2: Diagrama de clases simplificado de *Box and Block*

LeapDataScript también es un elemento importante, pues su función es recoger los índices cinemáticos que podrán analizarse posteriormente. Tiene una relación de dependencia con la clase *LeapDataListener*, que hereda de *Listener*.

Uno de los principales componentes del juego son los cubos. Para ellos se ha construido un *prefab*, es decir, una plantilla a partir de la cual se pueden crear nuevas instancias del objeto.

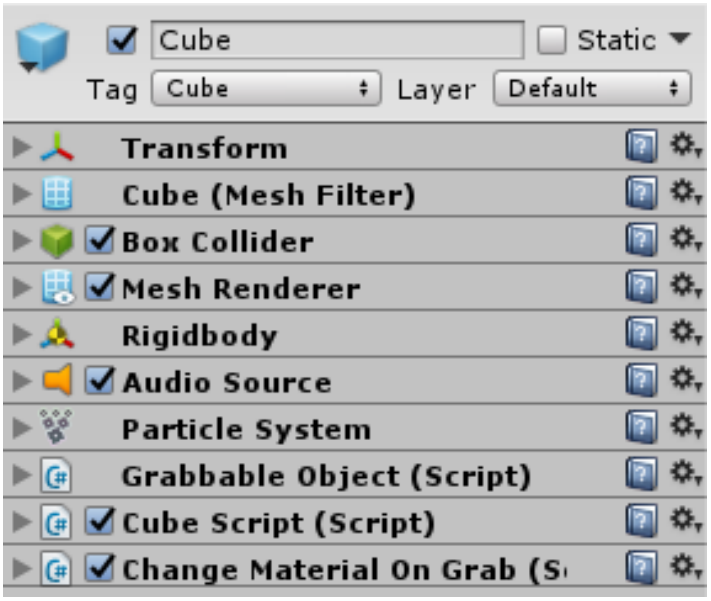


Figura 5.3: *Prefab* de *Cube*

Este *prefab* del cubo está constituído por distintos componentes, destacando los más importantes: **transform**, con la escala indicada en el artículo o por el nivel de correspondiente; las componentes físicas **boxcollider** y **rigidbody**, el primero crea un objeto para detectar las colisiones que tenga el objeto, y el segundo, le añade propiedades físicas al objeto, como la masa.

Otros de sus componentes principales son los *script* asociados, *GrabbableObject* y *CubeScript*, el primero proporcionado por la biblioteca de *Leap Motion*, asigna ciertas propiedades al GameObject, y CubeScript que añade un material aleatorio dentro de un array de colores, con una posición y rotación aleatoria, para que el conjunto de los cubos dé sensación de diversidad y aleatoriedad. Dentro de este *script* también se gestiona lo que ocurre cuando un cubo está en un lado o al otro de la caja, y si supera la barrera que separa ambos lado, así como los efectos de sonido de los cubos al chocar con la madera o al conseguir un punto.

5.3 Laboratorio

La estructura general del *Laboratorio* es similar en muchos aspectos al *Box and Block*, como se observa en la figura 5.5.

El mecanismo de juego es similar, la clase *PlayManager* se encarga del funcionamiento general del juego, pero la gestión de las instrucción es sustituida por el *DialogSystem*, que procesa un archivo *JSON* y se encarga de lanzar el diálogo con el audio que corresponde.

La clase *Blackboard* tiene como función la actualización de la pizarra en tiempo de juego de los ingredientes añadidos a la receta y de los que aún falta mediante los métodos *updateBlackboard*, *moveBlackboard* y *cleanBlackboard*.

Otro de los elementos fundamentales del juego son los ingredientes, entendidos como tales todos aquellos elementos que forman parte de la receta que hay que realizar para pasar el juego. Están gestionados por un *script* que hereda de la clase *MonoBehaviour*, *IngredientScript*. Tiene además una relación de dependecia con la clase *Ingredient*, de la cual heredan *Flask*, *Canister* y *Pill*.

El atributo *ingredient_gameObject* hace referencia al *prefab* del ingrediente que corresponde en cada caso, como el de *flask* que puede observarse en la figura 5.4

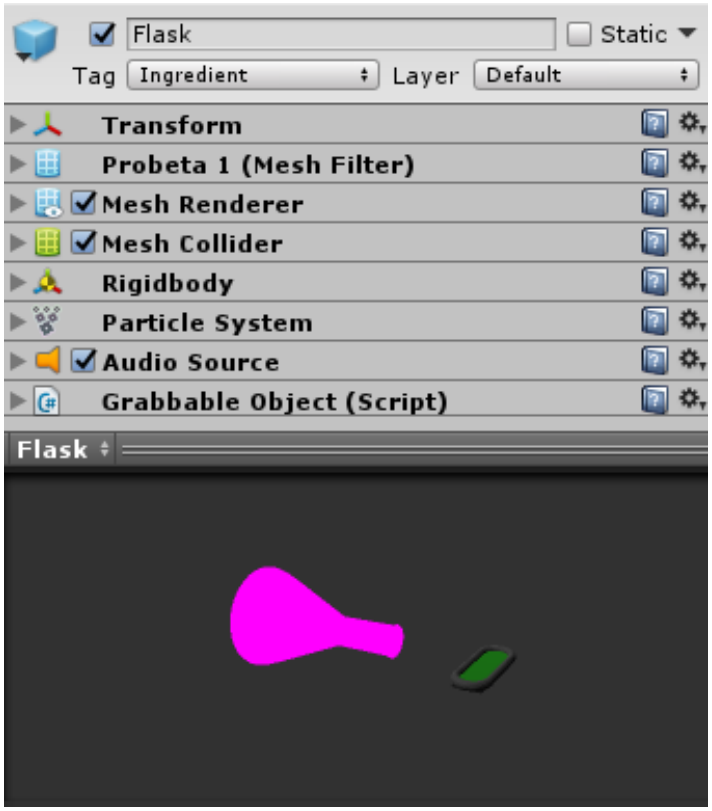


Figura 5.4: *Prefab* de *Flask*

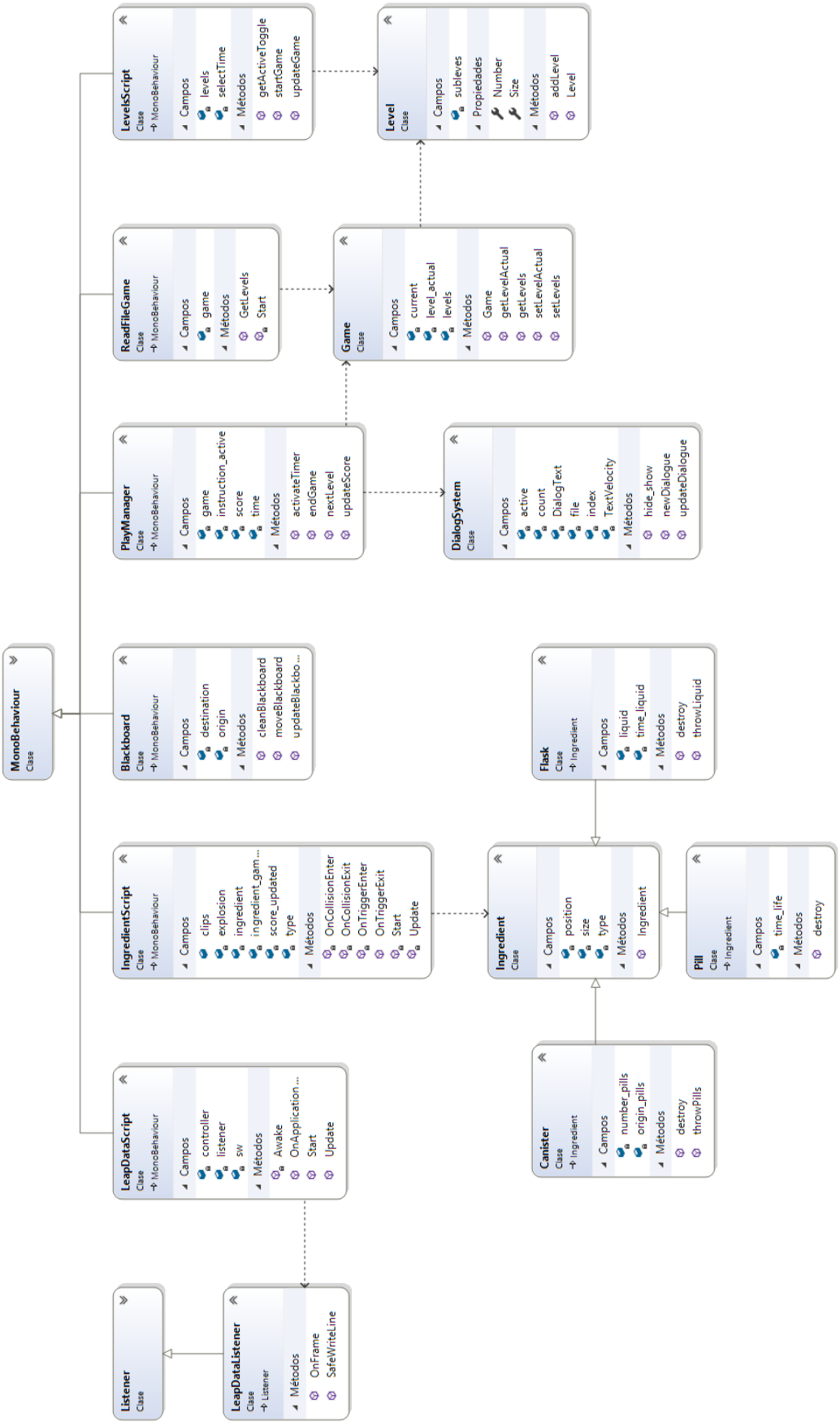


Figura 5.5: Diagrama de clases simplificado del Laboratorio

5.4 Explorador

La figura 5.6 muestra el diagrama de clases del Explorador. Al igual que en los casos anteriores, algunos *scripts* tienen la misma función, como *LevelScript* y *LeapDataScript*.

La clase *CreateGraphScript* contruye el objeto *Graph* correspondiente, que está compuesto por nodos y aristas:

- **Nodos:**
  - Nombre.
  - GameObject *(Collider)*.
  - *GraphNode*, objeto de la clase *GraphNode*, con una lista de vecinos con punteros a aristas adyacentes.
- **Aristas:**
  - Nombre.
  - GameObject *(Collider)*.
  - *EdgeNode*, con la variable booleana *visited* y los nodos que comunica.

En la escena se muestra un dibujo compuesto por puntos y aristas, ambos colisionables en el espacio 2D gracias a collider2D. Para poder colisionar con ellos se ha añadido otro collider 2D tanto en la punta del dedo como en el final del *tool*.

PathEuler contiene un algoritmo para resolver el problema de los caminos de Euler, que en este caso se traduce como una solución al al enigma.

Figura 5.6: Diagrama de clases simplificado del Explorador

Capítulo 6

Resultados

En esta sección se muestran en primer lugar los resultados técnicos de los prototipos generados y a continuación los resultados del desempeño motor e interacción del usuario con los juegos serios desarrollados en una pequeña muestra formada por población sana y pacientes con lesión medular.

6.1 Resultados técnicos de la plataforma

En el comienzo del proyecto, tras definir los objetivos y el diseño inicial de los diferentes juegos se estableció un calendario inicial, que señalaba a grandes rasgos la duración que se estimaba para cada uno de los juegos de manera general. Es el que se muestra en la figura 6.1, donde puede verse en amarillo el tiempo estimado para la escala *Box and Block*, azul para el Laboratorio, y verde para el Explorador.

Figura 6.1: Calendario con la planificación inicial de los juegos

Inicialmente se planeó el desarrollo de los juegos de forma que se comenzara un juego una vez que se hubiera finalizado el anterior, pero se acabó modificando esta planificación de forma que resultara más eficiente, ya que en algunas ocasiones no había pacientes con los que realizar pruebas, y mientras tanto se procedía al desarrollo de otro de los juegos.

Esto puede observarse en las tablas que muestran la actividad en los repositorios de los diferentes juegos, donde puede observarse que el desarrollo de estos en muchas ocasiones se solapaba.

Para el desarrollo del sistema se han utilizado repositorios *Bitbucket* independientes para cada uno de los juegos, esto ha facilitado el control de versiones y la supervisión de los mismos.

Empleando las herramientas *Gitstats* y *cloc* se ha obtenido un estudio de los distintos repositorios que se muestra a continuación.

6.1.1 Repositorio *Box and Block*

En la tabla 6.1 obtenida mediante la herramienta *Gitstats* se observa como la actividad se centro en los cuatro primeros meses del año, con excepción de septiembre, cuando se realizaron algunos cambios tras la realización de pruebas durante el verano. En la figura 6.2 se muestran las horas en las que había más actividad en el repositorio, coincidiendo con la jornada laboral.

Mes	Commits	Lineas añadidas	Lineas eliminadas
Enero 2018	9	1783008	45077
Febrero 2018	38	1540535	13963
Marzo 2018	18	761294	28043
Abril 2018	10	1013993	3953
Septiembre 2018	3	36336	365

Tabla 6.1: Actividad en el repositorio *Box and Block* según los *commits* realizados

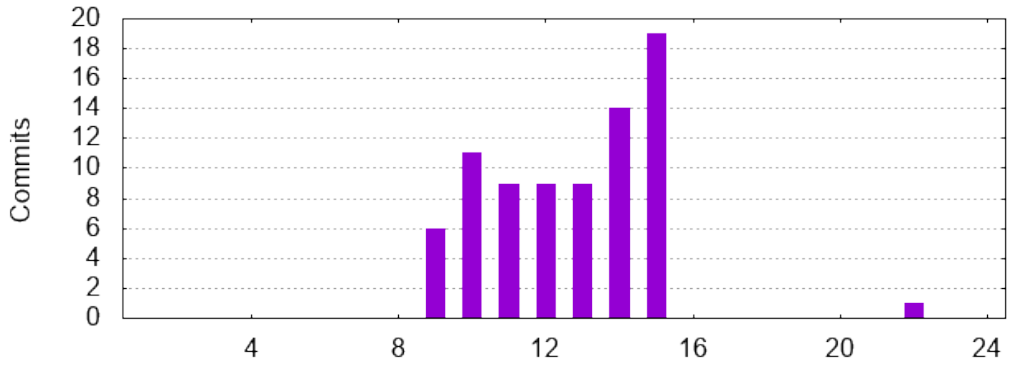
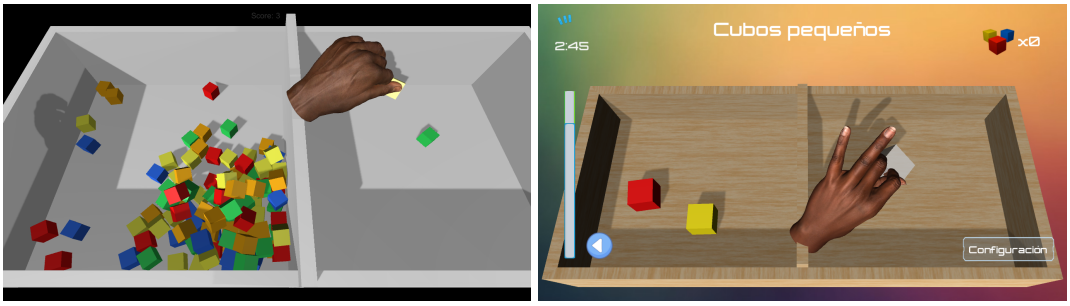


Figura 6.2: Actividad en el repositorio *Box and Block* por horas del día

El desarrollo de este primer juego fue el que llevó más tiempo, y eso quedó reflejado en el calendario inicial que se planteó al comienzo del proyecto. Si bien es cierto que el mismo ha variado con el desarrollo de los distintos juegos, en términos generales se ha cumplido con los objetivos.

El juego ha cambiado mucho desde su primera versión, que puede verse en la figura 6.3 que compara una de las primeras versiones con la última desarrollada actualmente, tanto a nivel gráfico como en la lógica del juego. No contaba con ningún elemento visual que informara sobre el estado del juego en un momento dado, ni se adaptaba a las necesidades de los pacientes, que por ejemplo tenían dificultad para coger los cubos que se encontraran más distantes o al no tener la capacidad de agarre ni siquiera podrían coger. Para la última versión, estos problemas han sido solucionados.



(a) Versión antigua (b) Última versión

Figura 6.3: Comparación entre versiones *Box and Block*

6.1.2 Repositorio Laboratorio

Como puede verse en la tabla 6.2, el desarrollo de los juegos se solapó durante cierto tiempo, esto es debido a que durante la etapa de pruebas de uno de los juegos se comenzó con el diseño del siguiente, de forma que mientras no hubiera usuarios que probaran los juegos, el tiempo era aprovechado con la implementación del siguiente prototipo.

Mes	Commits	Lineas añadidas	Lineas eliminadas
Marzo 2018	19	1077993	10234
Abril 2018	18	8976746	7123771
Mayo 2018	13	3044731	11657
Junio 2018	17	162317	10636
Julio 2018	2	4505	101
Septiembre 2018	1	56193	190
Octubre 2018	1	345395	235

Tabla 6.2: Actividad en el repositorio del Laboratorio según los *commits* realizados

El desarrollo del juego del Laboratorio se extendió durante siete meses, lo que puede resultar contradictorio con la afirmación de que la virtualización de la escala *Box and Block* llevó más tiempo. Esto es a causa de la dedicación exclusiva en el desarrollo del primer juego, necesitando tiempo de familiarización con la SDK del dispositivo y con el entorno de desarrollo. En el transcurso de los siete meses del desarrollo del laboratorio se incluye el desarrollo de parte de los otros dos juegos de forma paralela.

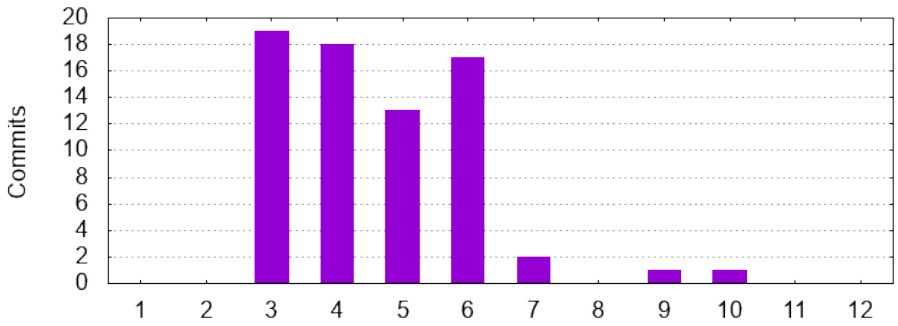


Figura 6.4: Actividad en el repositorio Laboratorio por meses del año

Durante este tiempo el juego también ha sufrido una gran evolución, aunque es posible que en las imágenes que se muestran a continuación en la figura 6.5 no se vea una gran diferencia a nivel visual del entorno, pero los elementos de la escena han cambiado completamente, tanto sus modelos 3D, materiales, texturas, sus *collider* y las fuentes de *feedback* permiten que el juego fluya con más facilidad.

(a) Versión antigua (b) Última versión

Figura 6.5: Comparación entre versiones del Laboratorio

6.1.3 Repositorio Explorador

El desarrollo completo de este juego se solapó con el juego del Laboratorio, como puede verse en la tabla 6.3, que muestra la actividad en el repositorio del Explorador, que tuvo lugar durante tres meses, con algún ajuste realizado en septiembre.

Mes	Commits	Lineas añadidas	Lineas eliminadas
Mayo 2018	6	928500	1803
Junio 2018	12	384462	192114
Julio 2018	1	57015	45
Septiembre 2018	1	35887	75

Tabla 6.3: Actividad en el repositorio del Explorador

En este juego se introdujo un elemento nuevo: *tool*, que permite el uso de un objeto alargado, como un bolígrafo para interaccionar con el controlador *Leap Motion*. Esto puede verse reflejado en el calendario de la figura 6.1, donde se estipuló que sería necesario más tiempo, para familiarizarse con los elementos de la SDK que permiten el uso de las *tools*.

En la figura 6.6 puede verse la diferencia desde la primera versión, hasta la final, que cambió completamente.

(a) Versión antigua (b) Última versión

Figura 6.6: Comparación entre versiones del Explorador

6.2 Resultados del desempeño motor de los usuarios

A continuación se describen los resultados del desempeño motor para cada uno de los juegos.

6.2.1 *Juego Serio 1: Box and Block*

En la tabla 6.4 se muestra el desempeño tanto de sanos como de pacientes en el juego del *Box and Block* en los cuatro niveles de dificultad seleccionados (cubos muy grandes, grandes, medianos y pequeños). El tiempo de ejecución de cada nivel se ha fijado en un minuto.

El desempeño se muestra en cuanto al número de cubos que se han conseguido pasar en ese tiempo.

En la tabla 6.5 se muestra una generalización de los resultados obtenidos, con la media y la desviación estándar medida en número de cubos durante el tiempo seleccionado.

Sujeto	Cubos muy grandes		Cubos grandes		Cubos medianos		Cubos pequeños	
	Abs.	*Relativo patrón referencia*	*Abs.*	*Relativo patrón referencia*	*Abs.*	*Relativo patrón referencia*	*Abs.*	*Relativo patrón referencia*
P1	6	27 %	5	21 %	11	48 %	7	30 %
P2	5	23 %	12	50 %	11	48 %	10	43 %
P3	18	81 %	16	67 %	19	82 %	15	65 %
S1	21	95 %	21	87 %	30	130 %	29	126 %
S2	20	90 %	18	75 %	18	78 %	16	69 %
S3	21	95 %	20	83 %	21	91 %	19	82 %
S4	18	81 %	25	104 %	30	130 %	23	100 %

Tabla 6.4: Desempeño de los participantes (sanos y pacientes) en la simulación virtual de la escala Box and Block

	Sanos (n=4)	Pacientes (n=3)
Cubos muy grandes	20 (1,41)	9.67 (7,23)
Cubos grandes	21 (2,94)	11 (5,57)
Cubos medianos	24,75 (6,18)	13,75 (4,62)
Cubos pequeños	21,75 (5,62)	10,67 (4,04)

Tabla 6.5: Generalización de los resultados obtenidos en la escala virtual *Box and Block*

Validación de la escala virtual *Box and Block*

Como resultados, se muestra en la Tabla 6.4 el desempeño de cada sujeto en cada nivel de dificultad programado.

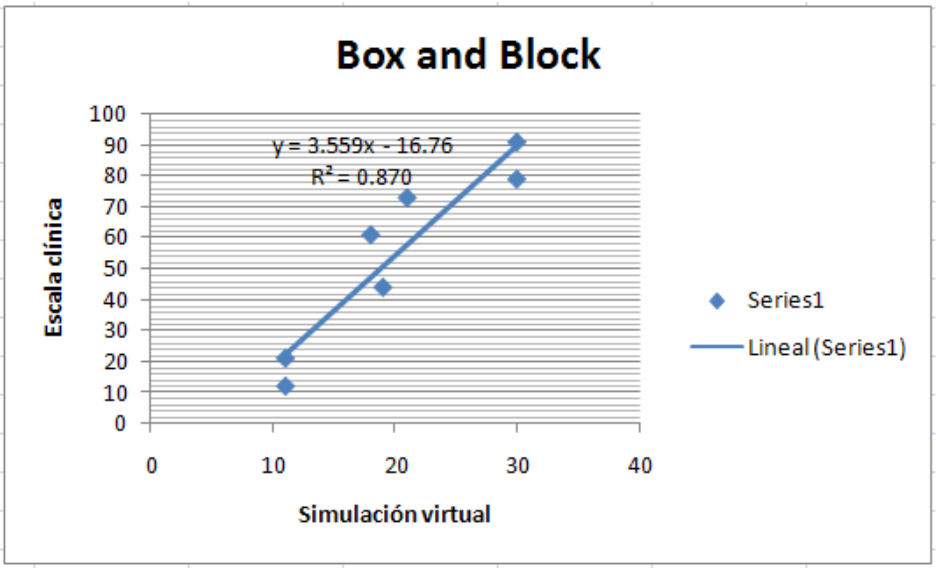


Figura 6.7: Diagrama de dispersión entre el resultado en la aplicación virtual *Box and Block* y el resultado en la escala real

En la figura 6.7 se muestra el resultado de forma gráfica destacando la línea de tendencia en la muestra relacionando el resultado conseguido en el juego virtual *Box and Block* y la puntuación obtenida en la escala real.

Se ha obtenido la correlación, con la aplicación virtual en el nivel de dificultad 3 (cubos medianos) ya que se corresponden en tamaño con la escala real. Se ha obtenido correlación elevada entre los dos sistemas analizados, 0.932.

6.2.2 *Juego Serio 2:* Laboratorio

En la prueba del juego del Laboratorio cada participante realizó los cuatro niveles de dificultad propuestos, teniendo 5 minutos para completar el 100 % de la tarea. Solo en el nivel de mayor dificultad, el Paciente 1 (P1) no completó el 100 % de la tarea. Para el resto de casos se muestra el tiempo restante del que disponían los participantes cuando se concluyó la tarea. Los resultados pueden verse en la tabla 6.6.

Nivel	**Muy fácil**		**Fácil**		**Medio**		**Difícil**	
Sujeto	*%*	*Tiempo restante*	*%*	*Tiempo restante*	*%*	*Tiempo restante*	*%*	*Tiempo restante*
P1	100 %	0:47	100 %	0:13	100 %	0:21	87 %	0:00
P2	100 %	1:09	100 %	0:51	100 %	0:43	100 %	0:27
P3	100 %	1:57	100 %	1:22	100 %	1:36	100 %	1:08
S1	100 %	2:14	100 %	1:46	100 %	1:34	100 %	1:07
S2	100 %	1:53	100 %	1:37	100 %	1:45	100 %	1:13
S3	100 %	2:17	100 %	1:58	100 %	2:03	100 %	1:31
S4	100 %	2:48	100 %	2:16	100 %	2:32	100 %	2:04

Tabla 6.6: Desempeño de los participantes (sanos y pacientes) en el juego del laboratorio

6.2.3 *Juego Serio 3:* Explorador

El juego del Explorador tiene dos variantes, una es juego libre, donde el jugador puede intentar resolver el dibujo desde cualquier punto; y la otra marca una trayectoria fija, que es la elegida en esta prueba para que todos los participantes partieran de las mismas condiciones y pudiera realizarse la comparación. En la tabla 6.7 se muestra el desempeño motor de cada participante: el tiempo empleado en realizar el trazado de la figura propuesta y el número de veces que la trayectoria se sale de la considerada ideal.

Los pacientes tardan más tiempo en completar la actividad que los sujetos sanos. De la misma forma se desvían en más ocasiones de la trayectoria que se considera ideal entre dos puntos del grafo. Esto puede estar relacionado con que los pacientes realizan más correcciones en la trayectoria durante la ejecución de la tarea.

Sujeto	Tiempo	Salidas
P1	23 s	13
P2	21 s	6
P3	92 s	22
S1	18 s	6
S2	19 s	5
S3	18 s	7
S4	20	1

Tabla 6.7: Desempeño de los participantes (sanos y pacientes) en el juego del explorador

A continuación, en la tabla 6.8 se muestra una generalización de los resultados obtenidos, con la media y la desviación estándar medida en segundos y salidas de la trayectoria ideal.

	Sanos (n=4)	Pacientes (n=3)
Tiempo	18,75 (0,96)	4,75 (2,63)
Salidas	45,33 (40,43)	13,67 (8,02)

Tabla 6.8: Generalización de los resultados obtenidos en el juego del Explorador

6.2.4 Cuestionarios de satisfacción

Tras el uso de cada uno de los juegos, se pasó un cuestionario de opinión sobre el mismo, donde se plantean una serie de preguntas y debe responderse siguiendo una escala de 1 a 7 siendo 1 'Totalmente en desacuerdo' y 7 'Totalmente de acuerdo':

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	
Totalmente en desacuerdo								**Totalmente de acuerdo**

La encuesta completa puede verse en el anexo 7.3.

Los test se pasaron a los pacientes que participaron en la prueba, y los resultados obtenidos son los que se muestran en las gráficas 6.8, 6.9 y 6.10.

Los resultados de los test son satisfactorios, los juegos resultan entretenidos y fáciles de usar, pero no sustituirían la terapia convencional por el uso de los juegos, si no que lo utilizarían de manera complementaria, y estos son los parámetros en los que las gráficas muestran datos más bajos.

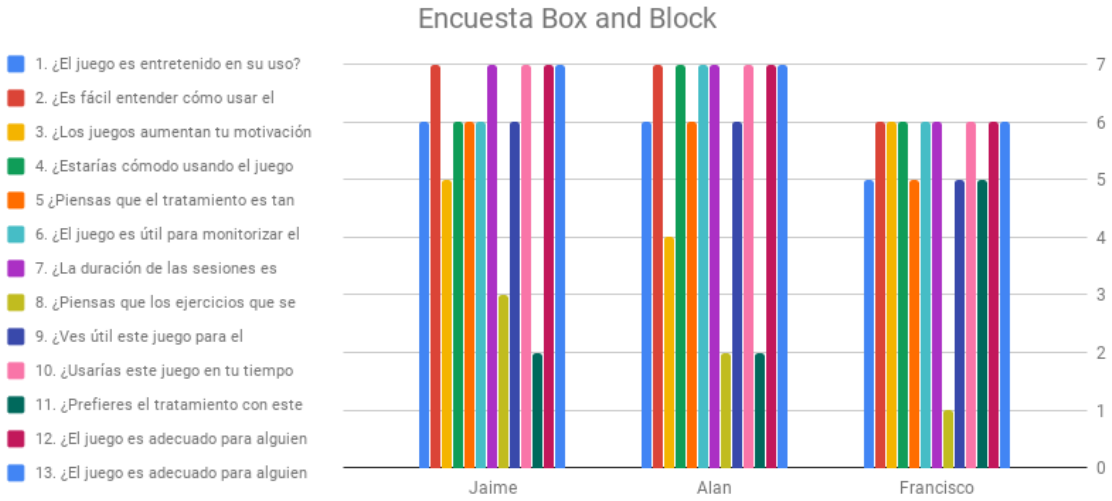


Figura 6.8: Encuesta de valoración del *Box and Block*

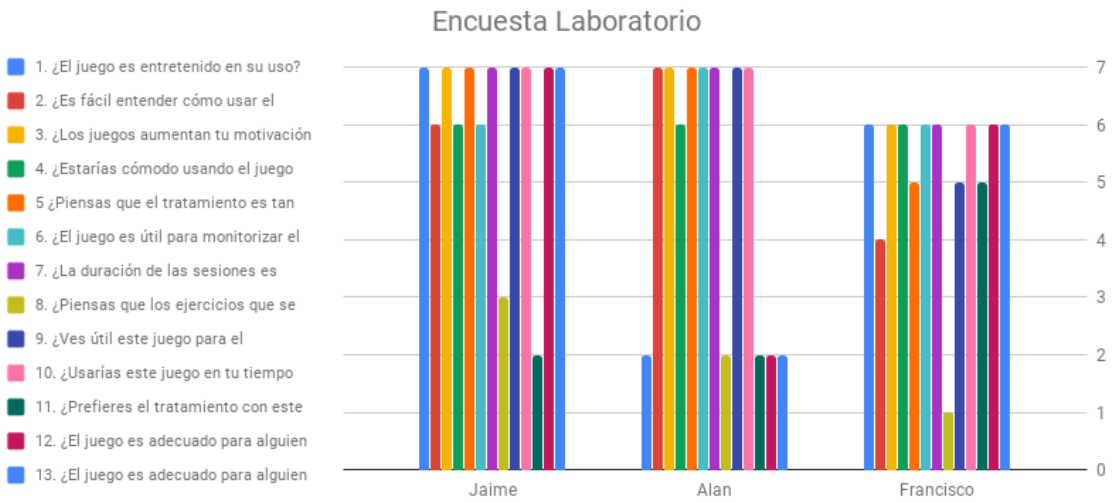


Figura 6.9: Encuesta de valoración del Laboratorio

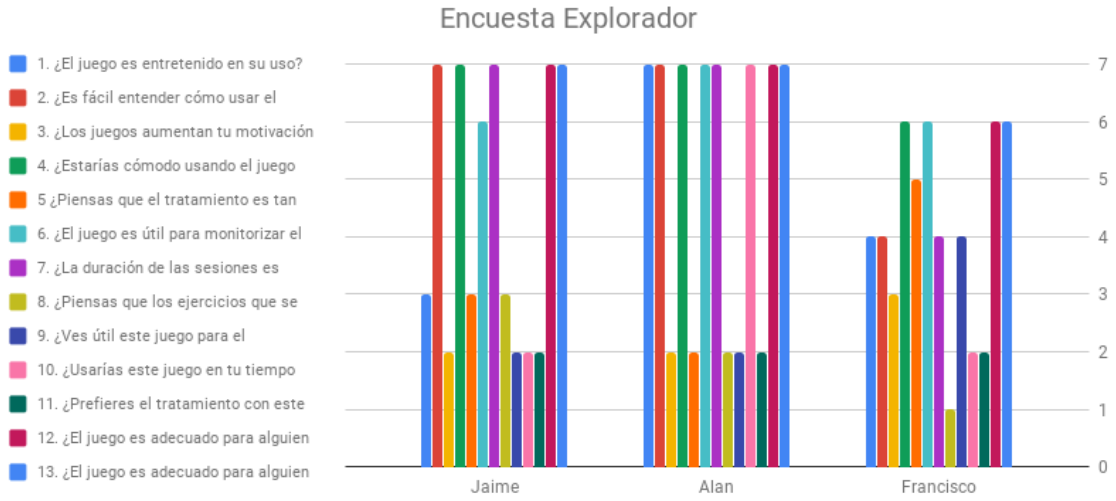


Figura 6.10: Encuesta de valoración del Explorador

Capítulo 7

Conclusiones

En el presenta capítulo se analiza si los objetivos planteados en el capítulo 2 han sido alcanzados. Se detallan las conclusiones obtenidas y se proponen posibles líneas de trabajos futuros. Por último, se presenta una reflexión a modo de conclusión personal.

7.1 Objetivos alcanzados

El objetivo general se ha alcanzado completamente con el desarrollo del sistema *Rehab-hand*, al implementar juegos serios usando tecnologías de bajo coste, *Leap Motion*, con el propósito de rehabilitar pacientes que han sufrido lesión medular cervical.

Los objetivos específicos también se han alcanzado satisfactoriamente. La captación de movimiento de la mano con tecnología de bajo coste basada en sensores ópticos se ha logrado haciendo uso del dispositivo *Leap Motion*, que hace uso de LED infrarrojos y cámaras para construir un modelo virtual de la mano que ejecute los movimientos que se realizan en el mundo real, y económicamente accesible.

Otro de los objetivos planteados al comienzo del proyecto fue determinar los requisitos clínicos y de contenido de cada juego serio en función de los objetivos rehabilitadores. Para alcanzarlo se trabajó de manera conjunta con el equipo clínico, de manera que con los juegos se trabajaran movimientos funcionales de acuerdo a las necesidades de los pacientes con lesión medular cervical.

Los juegos han sido diseñados e implementados de forma que su consumo de recursos sea mínimo, y las únicas restricciones para su ejecución son las propuestas por el dispositivo de captación de la mano.

Además, para el desarrollo de los mismos se contó en todo momento con la opinión del equipo clínico y con las pruebas realizadas con pacientes, para garantizar que los juegos estuvieran adaptados a sus necesidades.

Continuando con otro de los objetivos específicos del sistema, se ha logrado una evaluación objetiva el desempeño motor del paciente, mediante índices cinemáticos que informan acerca de la destreza y función del miembro superior. Para ello se lleva un registro del progreso del paciente en los juegos así como de los índices cinemáticos que el dispositivo captura durante la ejecución de los mismo.

A lo largo del proyecto se han ido realizando pruebas iterativas con pacientes, gracias a las cuales ha sido posible adecuar el contenido de los juegos a las necesidades que iban presentando.

Por último, al hacer uso de un motor de juegos multiplataforma como Unity, los juegos pueden compilarse para ejecutarse en GNU/Linux, Microsoft Windows y MacOS.

7.2 Propuestas de trabajos futuros

A pesar de alcanzar los objetivos propuestos, se considera que algunos aspectos aspectos son mejorables, pero por cuestión de tiempo no han podido llevarse a cabo. A continuación, se describen algunas lineas de trabajo futuro que se preveé mejorarían el sistema:

- **Ampliar el número de juegos:**
  Para el proyecto completo se han diseñado más juegos de los que aparecen en el presente documento, pero por cuestión de tiempo no ha sido posible incluirlos todos. El objetivo que se consigue es desarrollar un conjunto de juegos en los que se traten diferentes actividades y movimientos, de manera que de forma conjunta puedan trabajarse todos los objetivos rehabilitadores y cuanto mayor sea la variedad de juegos ofrecida más posibilidades de que éstos sean motivantes para los pacientes.
- **Sistema en la nube:**
  Uno de los aspectos que no ha llegado a alcanzar en el proyecto es la monitorización y seguimiento de los pacientes desde cualquier lugar, de forma que el clínico encargado de revisar la rehabilitación de un paciente pudiera establecer rutinas de ejercicios y evaluar el progreso en todo momento. Para ello sería interesante un registro *online* al comienzo de la sesión, y que el desempeño dentro de los juegos se registre en un servidor, que podrá ser accedido por los clínicos.

  Para llevar a cabo esta tarea será necesario definir una interfaz para los clínicos donde pudieran acceder a los datos de los pacientes de manera intuitiva y clara, además de poder definir rutinas de ejercicios que recibirán los paciente.

  Habría que evaluar también la mejor opción de servicio web e implementar la solución que integre una base de datos. Se estima que esto podría llevar unos dos meses de trabajo.

- **Gafas de realidad virtual:**
  Otra de las propuestas es convertir los juegos a realidad virtual inmersiva, mediante el uso de gafas de realidad virtual. Para ello se planea un estudio preliminar en el que se evalúe la aceptación de los pacientes que sufren lesión medular tienen a este tipo de tecnología y durante cuánto tiempo seguido es recomendable su uso. Si se obtuvieran resultados satisfactorios se procedería a la adaptación de cada uno de los juegos.

7.3 Conclusión personal

Este proyecto me ha permitido crecer en muchos aspectos, principalmente, el enfrentarme a un problema real, tratando con pacientes que sufren las consecuencias de una lesión de por vida, me ha permitido humanizar mi trabajo, y motivarme a intentar ser de ayuda cada día, siendo testigo de como un trabajo así puede ayudar en mayor o menor medida a las personas.

También, el hecho de trabajar en un equipo multidisciplinar me ha hecho aprender realmente la importancia de lo que cada uno puede aportar, enriqueciendo un proyecto que sin la parte de unos u otros no tendría ningún sentido.

Sin olvidar, que al encargarme del desarrollo completo de la aplicación me he enfrentado a multitud de problemas que gracias a los conocimientos adquiridos durante mis años de formación y la ayuda recibida de mis compañeros ha sido posible solventar y aprender de ellos.

Durante los últimos meses he participado en una tarea fascinante, que me ha ayudado a crecer tanto como persona como informática, y espero en un futuro poder dedicar mi vida a tareas tan enriquecedoras como esta.

ANEXOS

Encuesta valoración juegos *RehabHand*

Nombre: _____

Valore los juegos de la aplicación *RehabHand* siguiendo una escala de 1 a 7 siendo 1 'Totalmente en desacuerdo' y 7 'Totalmente de acuerdo':

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	
Totalmente en desacuerdo	○	○	○	○	○	○	○	**Totalmente de acuerdo**

---

1. **¿El juego es entretenido en su uso?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

2. **¿Es fácil entender cómo usar el juego?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

3. **¿Los juegos aumentan tu motivación para realizar los ejercicios?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

4. **¿Estarías cómodo usando el juego con la mínima atención y supervisión de un terapeuta?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

5. **¿Piensas que el tratamiento es tan efectivo para la rehabilitación como tus sesiones habituales con un terapeuta?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

6. **¿El juego es útil para monitorizar el progreso de tu tratamiento rehabilitador?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

7. **¿La duración de las sesiones es adecuada?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

8. **¿Piensas que los ejercicios que se proponen son más relevantes para las actividades de tu vida diaria que la rehabilitación tradicional?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

9. **¿Ves útil este juego para en entrenamiento de las AVD?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

10. **¿Usarías este juego en tu tiempo libre si lo tuvieses disponible?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

11. **¿Prefieres el tratamiento con este juego frente a la rehabilitación tradicional?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

12. **¿El juego es adecuado para alguien con tu nivel de lesión?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

13. **¿El juego es adecuado para alguien con tu tipo de lesión (severidad según ASIA A, B, C o D)?**

Box & Block	☐	*Bomb*	☐
Pétalos	☐	*Magical cave*	☐
Laboratorio	☐	*Apocalypse*	☐
The Explorer	☐		

14. **¿Cambiarías algo de algún juego?**

Escala clínica *Box and Block*

Los terapeutas están involucrados en la mejora de la destreza manual de los pacientes. A menudo, los pacientes no pueden realizar de forma satisfactoria test de destreza fina manual o de los dedos como *Purdue Pegboard Test* o el *Crawford Small Parts Dexterity Test*.

Otros test de destreza manual como el *Minnesota Rate of Manipulation Test* tienen limitada su aplicación clínica porque requieren mucho tiempo de administración, una posición de partida estandarizada y, además, usan valores de normalidad que representan de manera muy pobre el amplio rango de pacientes.

Por estos motivos, a menudo los terapeutas evalúan la destreza de forma subjetiva. De aquí surge la escala *Box and Block*, como una forma de solventar las limitaciones detectadas en otros test de medida.

La idea de la escala *Box and Block* tiene su origen en A. Jean Ayres y Patricia Holser Buehler. Usaron un bol y bloques para evaluar la destreza manual grosera de adultos con Parálisis Cerebral. El test se diseñó para ser durable y sencillo de forma que se pudiese usar para la valoración de pacientes con déficits severos de destreza. Después, Patricia Holser y Elisabeth Fuchs cambiaron el test a la forma de caja actual y patentado en 1957.

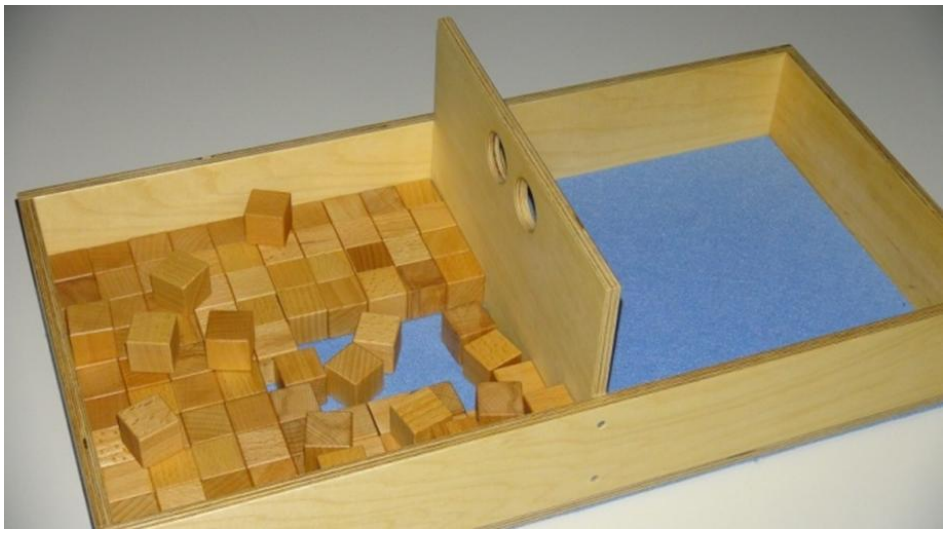


Figura 1: Caja de la escala *Box and Block*

La caja está formada por tableros de madera de 1cm de grosor. Las dimensiones de la caja son 53.7 cm de largo x 25.4 cm de ancho. Los lados largos de la caja son de 53.7 cm por 8.5 cm de 1 cm de grosor. Los lados cortos son de 7.5 cm por 25.4 cm.

La caja se divide en dos compartimentos cuadrados insertando un tablero división en el centro. Este tablero es de 25.4 cm de largo por 15.2 cm de alto y 1 cm de grosor. En la parte alta de esta división hay dos agujeros de 2.5cm para facilitar el transporte de la caja. Posteriormente se aplica una capa de barniz y después se pone una tela en la base para minimizar el ruido de los bloques durante la prueba.

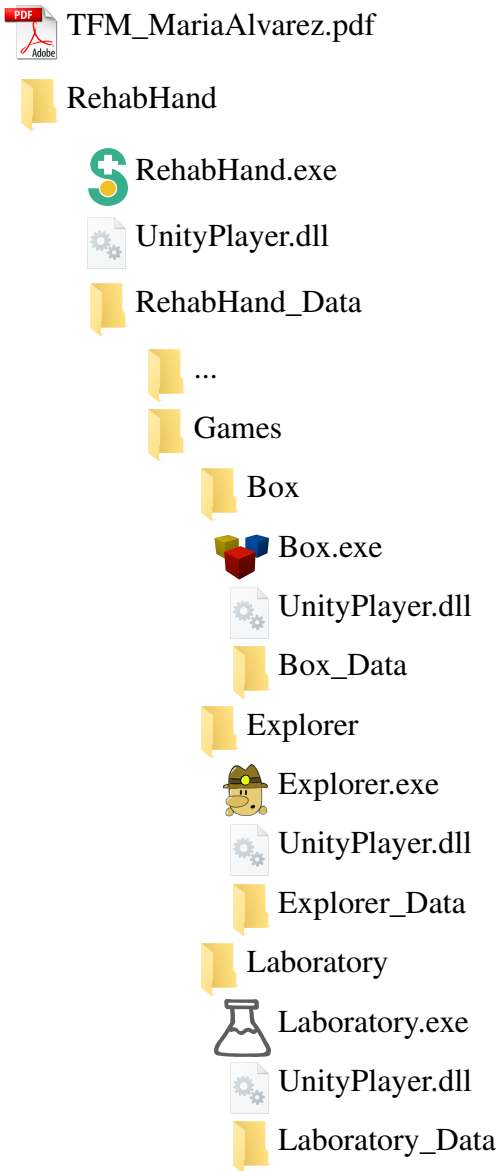
En la escala real se usan 100 bloques de madera, son cubos de 2.5 cm. En la escala original se utilizaban 150. Las instrucciones del test son una ligera modificación del test original. La caja se localiza a lo largo del borde de una mesa estandarizada en altura.

Cada sujeto se sienta en una silla estandarizada en altura enfrente de la mesa y de la caja. Los cubos están en el compartimento de la caja que se corresponde con la mano dominante del sujeto (en personas sanas).

El examinador u observador del test se sienta enfrente de forma que pueda ver los bloques que se transportan. Un periodo de ensayo de 15 segundos precede a la prueba. Después se retornan los bloques a su compartimento. Inmediatamente después, se comienza el test y antes de empezar, el sujeto pone las manos a ambos lados de la caja. A la señal, el sujeto coge solo un bloque a la vez con la mano dominante, lleva el bloque por encima de la partición y lo suelta en el compartimento contrario. Se cronometra el tiempo y se para después de 1 minuto. Entonces se repite el procedimiento con la mano no dominante.

Después de terminar la prueba, el examinador cuenta los bloques antes de retornarlos al compartimento. Si el sujeto transporta dos o más bloques al mismo tiempo, solo se cuenta uno. Si el bloque rebota y cae al suelo o a la mesa, cuenta como acierto. Si el bloque y los dedos no rebasan la partición, ese bloque no cuenta como acierto.

Contenido DVD



Referencias

[1] M. Bayón y J. Martınez. “Rehabilitación del ictus mediante realidad virtual”. En: *Rehabilitación* 44.3 (2010), págs. 256-260.

[2] J. Belda. *Leap Motion (I): características técnicas*. Abr. de 2015. URL: http://blog.showleap.com/2015/04/leap-motion-caracteristicas-tecnicas/ (visitado 11-06-2018).

[3] R. Boian y col. “Virtual reality-based post-stroke hand rehabilitation”. En: *Studies in health technology and informatics* (2002), págs. 64-70.

[4] A. De Bortoli y O. Gaggi. “PlayWithEyes: A new way to test children eyes”. En: *2011 IEEE 1st International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*. 2011.

[5] J. Broeren y col. “Virtual rehabilitation after stroke.” En: *Studies in health technology and informatics* 136 (2008), pág. 77.

[6] J. W. Burke y col. “Designing engaging, playable games for rehabilitation”. En: *Proceedings of the 8th International Conference on Disability, Virtual Reality & Associated Technologies*. 2010, págs. 195-201.

[7] J. W. Burke y col. “Serious games for upper limb rehabilitation following stroke”. En: *Games and Virtual Worlds for Serious Applications, 2009. VS-GAMES’09. Conference in*. IEEE. 2009, págs. 103-110.

[8] M. S. Cameirão y col. “Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System: methodology, design, psychometrics, usability and validation”. En: *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 7.1 (2010), pág. 48.

[9] K. Eng y col. “Interactive visuo-motor therapy system for stroke rehabilitation”. En: *Medical & biological engineering & computing* 45.9 (2007), págs. 901-907.

[10] A. Esclarín de Ruz. *Lesión medular: enfoque multidisciplinario*. Médica Panamericana, 2009.

[11] H. C. Fischer y col. “Hand rehabilitation following stroke: a pilot study of assisted finger extension training in a virtual environment”. En: *Topics in stroke rehabilitation* 14.1 (2007), págs. 1-12.

[12] A. Garcıa-Altés y col. “Spinal cord injury and traumatic brain injury: a cost-of-illness study”. En: *Neuroepidemiology* 39.2 (2012), págs. 103-108.

[13] A. Gil-Agudo y col. “Experiencia clínica de la aplicación del sistema de realidad TOy-RA en la neuro-rehabilitación de pacientes con lesión medular”. En: *Rehabilitación* 46.1 (2012), págs. 41-48.

[14] S. B. Jazayeri y col. “Incidence of traumatic spinal cord injury worldwide: a systematic review”. En: *European spine journal* 24.5 (2015), págs. 905-918.

[15] S. C. Kirshblum y col. “International standards for neurological classification of spinal cord injury (revised 2011)”. En: *The journal of spinal cord medicine* 34.6 (2011), págs. 535-546.

[16] S. C. Kirshblum y col. “Spinal Cord Injury Medicine. 3. Rehabilitation Phase After Acute Spinal Cord Injury”. En: *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 88.3 (2007), S62-S70.

[17] M. Kuttuva y col. “The Rutgers Arm, a Rehabilitation System in Virtual Reality: A Pilot Study”. En: 9 (mayo de 2006), págs. 148-51.

[18] G. Kwakkel, B. J. Kollen y H. I. Krebs. “Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review”. En: *Neurorehabilitation and neural repair* 22.2 (2008), págs. 111-121.

[19] G. Ludwig. *Lesiones medulares. Tratamiento global e investigación*. Jims, 1981.

[20] A. S. Merians y col. “Sensorimotor training in a virtual reality environment: does it improve functional recovery poststroke?” En: *Neurorehabilitation and neural repair* 20.2 (2006), págs. 252-267.

[21] S. Moya y col. “Animation of 3D Avatars for Rehabilitation of the Upper Limbs”. En: *2011 Third International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications* (2011), págs. 168-171.

[22] M. A. Murphy y col. “Three-dimensional kinematic motion analysis of a daily activity drinking from a glass: a pilot study”. En: *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 3.1 (2006), pág. 18.

[23] World Health Organization. *Lesiones medulares*. 2013. URL: `http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury` (visitado 19-06-2018).

[24] B. Peñasco-Martín y col. “Aplicación de la realidad virtual en los aspectos motores de la neurorrehabilitación”. En: 51 (ene. de 2010), págs. 481-8.

[25] G. B. Prange y col. “Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke”. En: *Journal of rehabilitation research and development* 43.2 (2009), págs. 171-184.

[26] Y. Quintana y O. García. *Serious Games for Health: Mejora tu salud jugando*. Gedisa, 2017.

[27] P. Rego, P. M. Moreira y L. P. Reis. “Serious games for rehabilitation: A survey and a classification towards a taxonomy”. En: *5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies*. 2010.

[28] D. J. Reinkensmeyer, J. L. Emken y S. C. Cramer. “Robotics, motor learning, and neurologic recovery”. En: *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 6 (2004), págs. 497-525.

[29] M. Roubidoux, C. M. Chapman y M. E. Piontek. “Development and Evaluation of an Interactive Web-Based Breast Imaging Game for Medical Students”. En: 9 (nov. de 2002), págs. 1169-78.

[30] J. C. Stewart y col. “Intervention to enhance skilled arm and hand movements after stroke: A feasibility study using a new virtual reality system”. En: *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 4.1 (2007), pág. 21.

[31] Unity Technologies. *Store - Unity Store*. URL: https://store.unity.com/es/?_ga=2.70926480.1043993154.1535016965-574568105.1516095143 (visitado 23-07-2018).

[32] *Unity Asset Store - The Best Assets for Game Making*. URL: https://assetstore.unity.com/ (visitado 23-07-2018).

[33] *Unreal Engine 3 is a complete game development framework that operates across 10 platforms. Provides a vast array of core technologies to creating high-quality games and applications.* URL: https://www.unrealengine.com/en-US/previous-versions (visitado 24-07-2018).

[34] D. Vallejo y C. Martín. *Desarrollo de Videojuegos: Un Enfoque Práctico. Vol 1: Arquitectura del Motor*. ESI, 2015.

[35] M. Van den Berg y col. “Incidence of nontraumatic spinal cord injury: a Spanish cohort study (1972–2008)”. En: *Archives of physical medicine and rehabilitation* 93.2 (2012), págs. 325-331.

[36] AEVI: Asociación Española de Videojuegos. Llorente y Cuenca. *El sector de los videojuegos en España: impacto económico y escenarios fiscales*. 2018. URL: http://www.aevi.org.es/web/wp-content/uploads/2018/01/1801_AEVI_EstudioEconomico.pdf (visitado 12-07-2018).

[37] V. Wattanasoontorn y col. “Serious games for health”. En: 4 (2013), págs. 231-247.

[38] P. L. Weiss y col. “Virtual reality in neurorehabilitation”. En: *Textbook of neural repair and rehabilitation* 51.8 (2006), págs. 182-97.

[39] Wikipedia, modificado de Henry Vandyke Carter. *Esquema de la columna vertebral con rótulos en español*. [Online; accedido 27 Julio, 2018]. 2018. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gray_111_-_Vertebral_column-coloured_esp.png.

[40] G. Yavuzer y col. “”Playstation eyetoy games”improve upper extremity-related motor functioning in subacute stroke: a randomized controlled clinical trial.” En: *European journal of physical and rehabilitation medicine* 44.3 (2008), págs. 237-244.

[41] J. Zariffa y col. “Feasibility and efficacy of upper limb robotic rehabilitation in a subacute cervical spinal cord injury population”. En: *Spinal Cord* 50.3 (2012), pág. 220.

[42] J. Zariffa y col. “Relationship between clinical assessments of function and measurements from an upper-limb robotic rehabilitation device in cervical spinal cord injury”. En: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 20.3 (2012), págs. 341-350.

Este documento fue editado y tipografiado con LaTeX empleando
la clase **esi-tfm** (versión 0.20181010) que se puede encontrar en:
`https://bitbucket.org/arco_group/esi-tfg`

[respeta esta atribución al autor]