
**Estudio de la eficacia
de Entornos Virtuales
basados en Actividades
de la Vida Diaria en la
Neurorrehabilitación
Funcional de Extremidad
Superior de pacientes
con TCE**

Enrique J. Gómez Aguilera
Fernando Molina Nájera | Mailin Adriana Villán
Julio Ontiveros | Rodrigo Pérez Rodríguez
Patricia Sánchez González

Ayudas a la investigación 2012

Equipo de trabajo:

Investigador Principal:
Enrique J. Gómez Aguilera

Equipo investigador:

Fernando Molina Nájera

Mailin Adriana Villán

Julio Ontiveros

Rodrigo Pérez Rodríguez

Patricia Sánchez González

Grupo de Bioingeniería y Telemedicina

ETSI Telecomunicación

Universidad Politécnica de Madrid

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al equipo investigador y al departamento de rehabilitación funcional del Hospital de Neurorehabilitación Institut Guttmann por su inestimable colaboración en el desarrollo de la presente investigación. Muy especialmente nos gustaría agradecer a los investigadores y terapeutas que fueron integrantes directos del equipo de investigación que llevó a cabo este trabajo: Cristina Gómez, Cristina Martín, Eloy Opisso, Josep Medina y Jose María Tormos. También queremos agradecer al resto del personal del Institut Guttmann que participó en el desarrollo de este trabajo, especialmente a Manel Ochoa, Lara Martín, Ignasi Soriano y Lluch Omar, Narda Murillo, Carlos Molleja, Lucas Conesa, Lara Martín y María Almenara; sin cuya colaboración no habría sido posible realizar el trabajo de investigación. Esta investigación ha sido parcialmente financiada por la Universidad Politécnica de Madrid y por el proyecto Sensingtoys (ITP-2012-1063-300000) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

AUTORES

Enrique J. Gómez Aguilera

Enrique J. Gómez Aguilera es Ingeniero de Telecomunicación y Dr. Ing. de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Catedrático de Universidad de la UPM, Director del Departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería de la ETSI Telecomunicación y Director del Máster en Ingeniería Biomédica.

Es investigador del Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Instituto de Salud Carlos III y del Centro de Tecnología Biomédica (UPM).

Ha sido investigador principal de 52 Proyectos de Investigación financiados por la Unión Europea y Plan Nacional, autor de 410 publicaciones en revistas y congresos internacionales en ingeniería biomédica.

Es asesor científico del Hospital de Neurorehabilitación Institut Guttmann (Badalona), Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón (Cáceres) y Measurement and Information and Medicine Institute (City University, Londres).

En la actualidad es Secretario General de la "Sociedad Española de Ingeniería Biomédica –SEIB".

Rodrigo Pérez Rodríguez

Rodrigo Pérez Rodríguez es Ingeniero de Telecomunicación y Dr. Ingeniero de Telecomunicación, bajo el programa de Ingeniería Biomédica, por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ha sido investigador en el Grupo de Bioingeniería y Telemedicina desde 2008 hasta 2014; actualmente es Profesor Visitante en el grupo de Control, Aprendizaje y Optimización de Sistemas (CAOS) de la Universidad Carlos III de Madrid. Los principales intereses de investigación de Dr. Pérez Rodríguez son el control inteligente aplicado a neurorehabilitación funcional y la minería de datos en bases de datos clínicas.

Patricia Sánchez González

Patricia Sánchez González es Ingeniera de Telecomunicación y Dra. Ingeniera de Telecomunicación, bajo el programa de Ingeniería Biomédica, por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Es investigadora del Grupo de Bioingeniería y Telemedicina desde 2005, así como del Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN) y del Centro de Tecnología Biomédica (CTB).

Como investigadora, centra su línea de investigación en el diseño y desarrollo de soluciones de usuario final, con especial énfasis en los entornos interactivos multimedia. Asimismo, tiene una avalada experiencia en el diseño de algoritmos inteligentes de procesamiento de vídeo que

permitan extraer nueva información y conocimiento a partir de las imágenes captadas por las cámaras.

Ha participado como investigadora en 16 proyectos de investigación (6 europeos y 10 nacionales).

Fernando Molina Nájera

Fernando Molina es Ingeniero de Informática por la Universidad Politécnica de Madrid. Ha cursado el Master Universitario en Telemedicina y Bioingeniería en la ETSI Telecomunicación de la UPM. Es Investigadora en el departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería de la UPM y actualmente es estudiante de doctorado en la línea de investigación de Neurorehabilitación Funcional. Ha participado en diferentes proyectos de investigación en los ámbitos de la neurorehabilitación funcional y cognitiva; de accesibilidad; y de tecnologías asistivas.

Mailin Adriana Villán Villán

Mailin Adriana Villán Villán es Ingeniera Biomédica por la Universidad Manuela Beltrán de Colombia. Ha cursado el Master Universitario en Telemedicina y Bioingeniería en la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), durante este Máster el Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN) le concedió una beca por competencia, para la realización de estudios oficiales de Máster en Ingeniería Biomédica.

Es Investigadora en el departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería de la UPM y actualmente es estudiante de doctorado en la línea de investigación de Neurorehabilitación Funcional, enfocada principalmente en la evaluación objetiva del movimiento de la extremidad superior en pacientes con Daño Cerebral Adquirido.

Ha sido investigadora colaboradora en 2 proyectos de Investigación, autor principal de 3 publicaciones en congresos nacionales e internacionales en ingeniería biomédica.

Julio Antonio Ontiveros Ravell

Julio Antonio Ontiveros Ravell es Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Anáhuac Mayab perteneciente a la Red de Universidades Anáhuac de México. Actualmente es estudiante de Maestría dentro del programa de Máster Universitario de Ingeniería Biomédica en la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), el Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN) le concedió una beca por competencia.

Índice

	Página
1. Resumen	9
2. Introducción.....	9
3. Antecedentes.....	10
4. Objetivos	10
5. Materiales y metodología	10
5.1. Descripción de la metodología	10
5.1.1. Metodología de diseño Software.....	10
5.1.2. Metodología para el modelado de procesos de neurorrehabilitación	11
5.1.3. Metodología para el diseño e implementación de EVs para Rehabilitación....	12
5.2. Diseño y especificación de las Actividades de Rehabilitación	13
5.2.1. Selección y definición clínica de las Actividades de Rehabilitación	13
5.2.2. Especificación de los entornos virtuales de rehabilitación.....	17
5.3. Diseño de los entornos virtuales de rehabilitación	19
5.3.1. Diseño de la estación de rehabilitación.....	20
5.3.2. Arquitectura conceptual del entorno virtual.....	21
5.3.3. Diseño de los contenidos virtuales	22
5.4. Desarrollo del entorno virtual de rehabilitación	24
5.4.1. Tecnologías empleadas en la estación de rehabilitación.....	25
5.4.2. Tecnologías empleadas en los contenidos virtuales.....	26
5.5. Diseño de la prueba de concepto de la estación de rehabilitación.....	26
6. Resultados	28
6.1. Desarrollo de los entornos de rehabilitación.....	28
6.1.1. Arquitectura de la Estación de rehabilitación.....	28
6.1.2. Primer prototipo Entorno de Rehabilitación A.....	28
6.1.3. Primer prototipo Entorno de Rehabilitación B.....	30
6.1.4. Valoración de los prototipos.....	31
6.1.5. Segundo prototipo Entorno de Rehabilitación A.....	31
6.1.6. Segundo prototipo Entorno de Rehabilitación B.....	33
6.2. Prueba de concepto	34
6.2.1. Descripción de Pacientes.....	35
6.2.2. Resultados de las ejecuciones de los Pacientes.....	35
6.2.3. Resultados de la encuesta de los Terapeutas	38
7. Discusión	38
8. Bibliografía	40
9. Anexos	58
9.1. Anexo A: Cuestionario de Usabilidad Pacientes	42

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Identificación de actividades actuales	14
Tabla 2. Actividad A: Criterios de inclusión	15
Tabla 3. Actividad A: Criterios de exclusión	15
Tabla 4. Actividad A: Objetivos terapéuticos	15
Tabla 5. Actividad A: Equipos materiales	15
Tabla 6. Actividad A: Pautas de ejecución	15
Tabla 7. Actividad A: Indicadores de ejecución	15
Tabla 8. Actividad A: Indicador de seguridad	15
Tabla 9. Actividad A: Indicadores de fin de sesión	15
Tabla 10. Actividad A: Asistencia	16
Tabla 11. Actividad A: Feedback	16
Tabla 12. Actividad A: Valoración periódica	16
Tabla 13. Actividad B: Criterios de inclusión	16
Tabla 14. Actividad B: Criterios de exclusión	16
Tabla 15. Actividad B: Objetivos terapéuticos	16
Tabla 16. Actividad B: Equipos materiales	16
Tabla 17. Actividad B: Pautas de ejecución	17
Tabla 18. Actividad B: Indicadores de ejecución	17
Tabla 19. Actividad B: Indicador de seguridad	17
Tabla 20. Actividad B: Indicador de fin de sesión	17
Tabla 21. Actividad B: Asistencia	17
Tabla 22. Actividad B: Feedback	17
Tabla 23. Actividad B: Valoración del paciente	17
Tabla 24. Entorno Virtual A: Objetivos terapéuticos	17
Tabla 25. Entorno Virtual A: Equipos materiales	18
Tabla 26. Entorno Virtual A: Indicadores de ejecución	18
Tabla 27. Entorno Virtual A: Indicador de resultado de sesión	18
Tabla 28. Entorno Virtual A: Indicador de fin de sesión	18
Tabla 29. Entorno Virtual A: Asistencia	18
Tabla 30. Entorno Virtual B: Objetivos terapéuticos	19
Tabla 31. Entorno Virtual B: Equipos materiales	19
Tabla 32. Entorno Virtual B: Indicadores de proceso	19
Tabla 33. Entorno Virtual B: Indicadores de resultado de sesión	19
Tabla 34. Entorno Virtual B: Indicadores de fin de sesión	19
Tabla 35. Entorno Virtual B: Asistencia	19
Tabla 36. Tecnologías asociadas a la Estación de Rehabilitación	21
Tabla 37. Datos demográficos de los pacientes	36
Tabla 38. Escalas de valoración neuropsicológica de los pacientes. NV (no valorable)	36
Tabla 39. Respuestas de la pregunta 1	37
Tabla 40. Respuestas de la pregunta 2	37
Tabla 41. Respuestas de la pregunta 3	37
Tabla 42. Respuestas de la pregunta 4	37

Índice de tablas (cont.)

	Página
Tabla 43. Respuestas de la pregunta 5.....	37
Tabla 44. Respuestas de la pregunta 6.....	37
Tabla 45. Respuestas de la pregunta 7.....	37
Tabla 46. Respuestas de la pregunta 8.....	37
Tabla 47. Respuestas de la pregunta 9.....	37
Tabla 48. Respuestas de la pregunta 10.....	37
Tabla 49. Respuestas de la pregunta 11.....	37
Tabla 50. Respuestas de la pregunta 12.....	37
Tabla 51. Respuestas de los pacientes a la encuesta.....	38

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Metodología de diseño y desarrollo software	11
Figura 2. Mapa AS IS patrón	12
Figura 3. Metodología para el diseño e implementación de entornos virtuales para rehabilitación	13
Figura 4. Actividad de Rehabilitación A.	16
Figura 5. Diseño general de los entornos de rehabilitación.	20
Figura 6. Escenificación Puesto Rehabilitación	20
Figura 7. Arquitectura Conceptual Actividad A.	22
Figura 8. Arquitectura Conceptual Actividad B.	23
Figura 9. Prototipo de papel del Entorno Virtual de Rehabilitación A	23
Figura 10. Prototipo de papel del Entorno Virtual de Rehabilitación B	24
Figura 11. Tecnologías utilizadas en la implementación	25
Figura 12. Puntos monitorizados por 3GearSystem.	26
Figura 13. Diseño del entorno virtual multimedia. Vista general	27
Figura 14. Diseño de entorno multimedia. Vista detalle	27
Figura 15. Arquitectura estación de rehabilitación	28
Figura 16. Esquema de control de la dirección.	29
Figura 17. Proceso de cálculo de la dirección.	29
Figura 18. Esquema de control de la velocidad	30
Figura 19. Prototipo Entorno Multimedia	30
Figura 20. Esquema de monitorización de manos.	31
Figura 21. Modelo 3d de manos 3GearSystem	31
Figura 22. Diseño del soporte del volante.	31
Figura 23. Soporte volante posición vertical.	32
Figura 24. Soporte volante posición horizontal.	32
Figura 25. Diseño del volante con iluminación.	32
Figura 26. Diseño de la tapa que cubrirá la electrónica	33
Figura 27. Prototipo impreso del volante.	33
Figura 28. Prototipo B del Escenario Virtual Coche.	34
Figura 29. Contenido virtual Tambores	34
Figura 30. Contenido virtual Xilófono	35
Figura 31. Contenido virtual Piano.	35
Figura 32. Ejecución de la actividad de coordinación durante la prueba de concepto.	36
Figura 33. Diseño del volante timón (A).	39
Figura 34. Diseño del volante timón (B).	39

1. RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene por objetivo el diseño, desarrollo y prueba de concepto de un entorno virtual interactivo para tareas de rehabilitación, basadas en actividades de vida diaria, que puedan ser usadas en la neurorrehabilitación funcional de extremidad superior en pacientes con traumatismo craneoencefálico (TCE).

El trabajo corresponde a la línea de investigación en Ingeniería de la Neurorrehabilitación que desarrollan el Grupo de Bioingeniería y Telemedicina de la Universidad Politécnica de Madrid junto con el Hospital de Neurorrehabilitación Instituto Guttmann.

Inicialmente se definió una metodología de diseño y desarrollo de entornos virtuales para neurorrehabilitación que permitiera abordar los objetivos marcados por el proyecto. En la primera fase de esta metodología se realizó una preselección de 14 actividades pertenecientes al área de terapia ocupacional del Institut Guttmann – Hospital de Neurorrehabilitación, que fueron formalmente definidas. Después se seleccionaron las 2 actividades que se consideraron más adecuadas para ser desarrolladas en un entorno virtual: 1) actividad de coordinación; y 2) actividad de disociación de dedos. A continuación se realizó una especificación formal de las actividades seleccionadas. En la segunda fase de la metodología se diseñó el entorno de rehabilitación, en el que se utilizaron dispositivos Ms Kinect como mecanismo de monitorización e interacción.

Finalmente, se diseñó una prueba de concepto para evaluar la viabilidad tecnológica del entorno virtual. Para llevar a cabo esta prueba se instaló el entorno virtual en el laboratorio de análisis de movimiento del Institut Guttmann, donde 4 pacientes con TCE ejecutaron las actividades de rehabilitación adaptadas.

La investigación, realizada por un equipo interdisciplinar constituido por ingenieros biomédicos de la Universidad Politécnica de Madrid y profesionales clínicos del Hospital Instituto Guttmann, ha mostrado la potencialidad de los entornos virtuales interactivos para la creación de tareas de neurorrehabilitación funcional de extremidad superior. La aplicación de estas tecnologías en la neurorrehabilitación permite un alto grado de monitorización, interacción y personalización de las terapias, lo que presumiblemente repercutirá en una mejora de los resultados y en un mayor conocimiento de los procedimientos de rehabilitación en pacientes que han sufrido un TCE.

La memoria de la investigación realizada se ha organizado de la siguiente forma: 1) una introducción, antecedentes y objetivos del proyecto; 2) los materiales y metodología empleados en la consecución de los objetivos de investigación; 3) un capítulo con los resultados principales obtenidos; 4) la discusión y conclusiones del trabajo; para finalizar con los anexos y memoria económica del proyecto.

Palabras clave: entorno virtual de rehabilitación, contenidos virtuales, monitorización con sensor de profundidad, neurorrehabilitación, traumatismo cráneo-encefálico

2. INTRODUCCIÓN

El traumatismo Craneoencefálico (TCE) representa una de las principales causas de discapacidad y muerte en niños y en adultos jóvenes [1]. La incidencia en España se estima en 200 nuevos casos anuales por cada 100.000 habitantes [2]. Según la estimación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), es una de las cinco causas con mayor repercusión global sobre la sociedad. Los TCE ocasionan alteraciones motoras, sensitivas, cognitivas y emocionales que implican un cambio significativo en la vida de los pacientes y sus familias [3].

La neurorrehabilitación es un proceso clínico complejo dirigido a restituir, minimizar y/o compensar las alteraciones, físicas y cognitivas, aparecidas en la persona afectada por una discapacidad como consecuencia de una lesión del sistema nervioso. Actualmente es el único medio para reducir el impacto de los déficits derivados de los TCE [4].

La rehabilitación funcional de la extremidad superior (ES) tiene por objetivo que los pacientes recobren la capacidad de realizar actividades relacionadas con la manipulación de objetos y de este modo puedan desarrollar una vida lo más autónoma posible. Aunque existen diferentes métodos y aproximaciones de rehabilitación orientadas a recuperar la capacidad de realizar movimientos analíticos mediante la utilización de sistemas robóticos [5,6], la complejidad del problema y la inter-variabilidad entre sujetos hace muy difícil disponer de tratamientos efectivos para restablecer la funcionalidad perdida, siendo éste uno de los principales retos de la neurorrehabilitación de la extremidad superior en TCE. Las nuevas tecnologías de realidad virtual (RV) y monitorización pueden facilitar la personalización y generación de conocimiento [7-9].

Este trabajo de investigación tiene por objetivo analizar la viabilidad del uso de nuevas tecnologías de monitorización e interacción de bajo coste para la creación de entornos virtuales de rehabilitación funcional de la extremidad superior que puedan ser utilizados en el tratamiento de pacientes con TCE. Para ello se ha diseñado e implementado un entorno virtual de rehabilitación que, haciendo uso de dispositivos Ms Kinect, permite ejecutar dos actividades de rehabilitación centradas en la recuperación de la coordinación manual y el movimiento dissociado de los dedos. Para comprobar su viabilidad se ha realizado una prueba de concepto con pacientes en el Institut Guttmann – Hospital de Neurorrehabilitación.

3. ANTECEDENTES

El auge de las tecnologías de monitorización que utilizan sensores de movimiento de bajo coste, inicialmente concebidos para el entretenimiento (Microsoft Kinect®, Nintendo Wii®, EyeToy...), está promoviendo su uso en la creación de nuevas actividades de rehabilitación funcional basadas en sistemas de RV [10]. Este tipo de actividades ofrecen un componente lúdico que favorece la motivación de los pacientes, lo cual se traduce en una mejora del rendimiento en la ejecución de los ejercicios [11]. Además, un sistema capaz de monitorizar en tiempo real los movimientos que realiza el paciente durante la ejecución de las actividades de rehabilitación, permite identificar determinados indicadores de proceso que sirven para analizar con precisión el nivel de ejecución de cada ejercicio. Por otro lado, el uso de nuevas tecnologías multimedia y de monitorización permite personalizar las actividades atendiendo a las necesidades del paciente. Otra ventaja proporcionada por este enfoque es la capacidad de almacenar los resultados obtenidos durante la ejecución de la actividad, disponiendo de una herramienta de análisis que ayude a valorar la evolución del paciente [9,12].

Existen algunas experiencias del uso de la RV como complemento a la terapia tradicional en la creación de nuevos programas de rehabilitación para la recuperación funcional de la ES de los pacientes con TCE [12-14]. Una de las ventajas principales de estas terapias es la retroalimentación en tiempo real durante la realización de los movimientos, lo que ayuda a la recuperación de patrones motores en pacientes con alteraciones moderadas y a la disminución en las compensaciones en pacientes con alteraciones severas [14].

Algunos trabajos incorporan estudios que comparan la eficacia de la rehabilitación de la funcionalidad de la ES entre terapias complementadas con RV y terapias convencionales [15,16]. Aunque los resultados obtenidos muestran un incremento en la mejora de la funcionalidad de la extremidad superior en los pacientes que siguieron terapias con RV, no existe suficiente evidencia estadística para afirmar el beneficio real de la integración de las terapias con RV en rutina clínica.

4. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es estudiar la viabilidad de crear nuevos mecanismos de rehabilitación de la funcionalidad de la extremidad superior mediante el uso de entornos virtuales multimedia y de tecnologías de monitorización de bajo coste. Para ello se pretende diseñar e implementar un entorno virtual interactivo para la rehabilitación de la funcionalidad de la extremidad

superior de pacientes con TCE que permita llevar a cabo una prueba de concepto con pacientes.

Los objetivos concretos a conseguir son:

- 1) Diseñar y desarrollar un entorno virtual de rehabilitación que permita al paciente realizar actividades de rehabilitación. Este entorno utilizará como sensor para la monitorización una cámara de profundidad de bajo coste. Inicialmente se implementarán dos actividades con contenidos terapéuticos de rehabilitación.
- 2) Realizar una prueba de concepto del entorno virtual de rehabilitación mediante su instalación en el laboratorio de análisis de movimiento del Institut Guttmann – Hospital de Neurorrehabilitación y la realización de una evaluación con pacientes y terapeutas.

5. MATERIALES Y METODOLOGÍA

5.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

El diseño y desarrollo de los entornos virtuales de rehabilitación se ha basado en la definición de una metodología de diseño y desarrollo iterativa que utiliza principios metodológicos de RUP (Rational Unified Process) [17] y del Diseño Centrado en el Usuario [18]. Esta metodología fue adaptada para adecuarse a las características específicas del desarrollo de entornos virtuales. Para ello se utilizó una metodología de modelado de procesos de neurorrehabilitación definida previamente por el equipo investigador [19].

5.1.1. Metodología de diseño Software

La metodología original de desarrollo software se basa en un proceso iterativo de especificación, diseño e implementación atendiendo a los principios básicos de la metodología RUP y de los principios del DCU (Diseño centrado en el Usuario). De este modo, la metodología refleja las fases de extracción de requisitos, análisis de los mismos y diseño del sistema; prestando gran atención a la implicación de los usuarios en todo el proceso. En la Figura 1 se muestra el ciclo del proceso completo.

Los principios de DCU, marcados por el estándar ISO 13407, definen cuatro actividades principales que deben iniciarse en las etapas más tempranas de un proyecto, y que deben realizarse de modo iterativo, las cuales están presentes la metodología de desarrollo software:

- Entender y especificar el **contexto** de uso.
- Especificar los **requisitos** de usuario y de la organización.
- Producir soluciones de diseño.
- **Evaluar** los diseños en base a los requisitos.

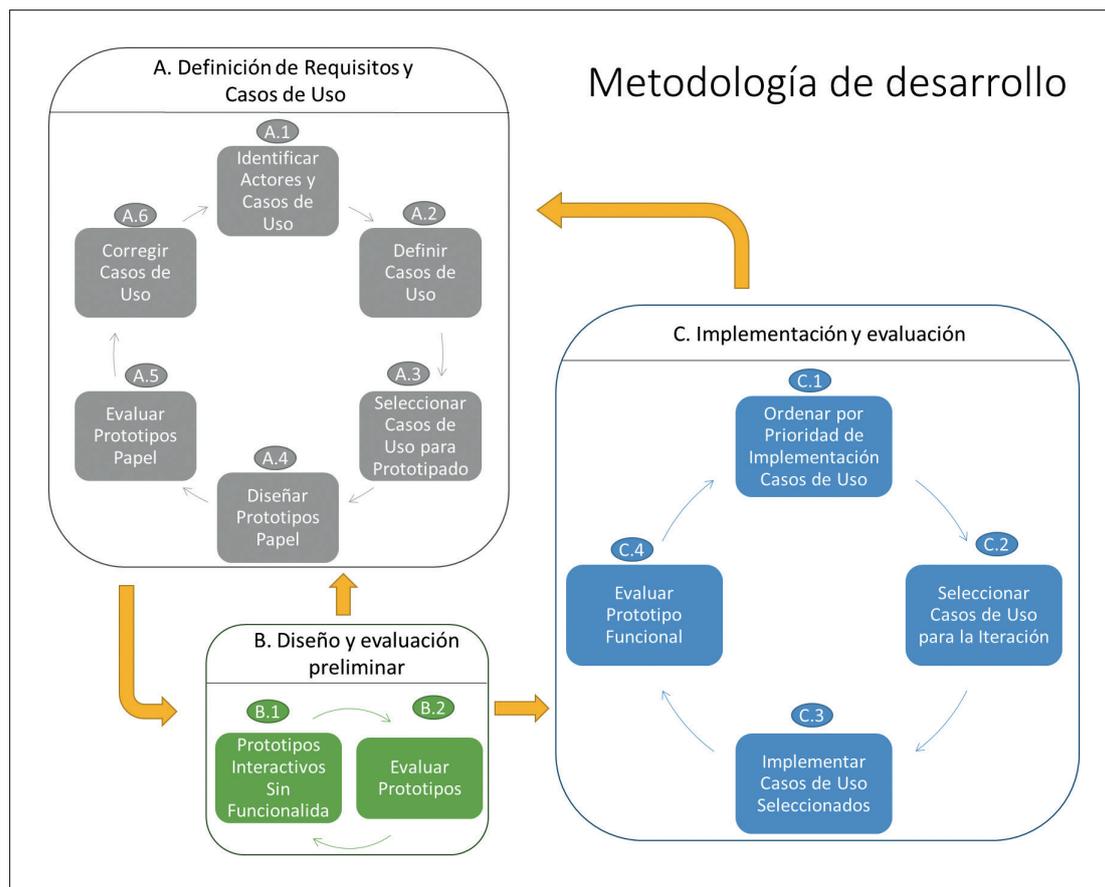


Figura 1. Metodología de diseño y desarrollo software

5.1.2. Metodología para el modelado de procesos de neurorrehabilitación

La metodología definida en [19], que se utilizará para adaptar el proceso descrito anteriormente a las necesidades específicas del desarrollo de entornos virtuales, marca los siguientes pasos:

1. Selección de las actividades de rehabilitación
2. Elaboración de los mapas
3. Identificación de las oportunidades de mejora tecnológica

Selección de actividades

En primer lugar, los clínicos especialistas deberán realizar una preselección y definición a alto nivel de actividades de rehabilitación orientadas principalmente al trabajo de la pinza y la coordinación óculo-manual, además del balance muscular y articular de la extremidad superior.

Una vez identificadas las actividades candidatas para ser implementadas en un Entorno Virtual, se seleccionará un subconjunto de ellas para comenzar el trabajo de definición y desarrollo. De estas actividades se realizará una descripción estructurada, siguiendo los campos de modelado que posteriormente se representan en los mapas de proceso.

Elaboración de los Mapas

Una vez seleccionadas y descritas las actividades, se crearán los mapas As-Is. Estos mapas contienen la siguiente información:

1. **Nombre de la actividad:** Palabra/s que identifican la actividad.
2. **Criterios de inclusión:** Tipo de paciente al que se presta este servicio, para el que es útil realizar esta actividad. Circunstancia (característica/estado/déficits del paciente) que aconseja/justifica la prescripción/realización de la actividad. Debe guardar relación con los objetivos de la actividad.
3. **Criterios de exclusión:** Circunstancia que desaconseja/prohíbe la prescripción/realización de la actividad.
4. **Objetivos terapéuticos:** El fin por el cual se lleva a cabo la actividad. Debe relacionarse con las necesidades del paciente, estar alineado con los criterios de inclusión.
5. **Equipos materiales:** Aparatos y medios físicos que se utilizan en la ejecución/developmento de la actividad.

6. **Pautas de ejecución:** Tareas/pasos/acciones principales que debe ejecutar el paciente para completar la actividad.
7. **Indicadores de proceso:** Parámetros que proporcionan información en tiempo real sobre el desarrollo de la actividad.
 - **Indicadores de ejecución:** Parámetro que permite valorar si la tarea se está ejecutando de forma correcta o incorrecta.
 - **Indicadores de seguridad:** Parámetros que, si se controlan, eliminan o reducen el riesgo de daño/lesión por parte del paciente/terapeuta a un nivel aceptable.
 - **Indicadores de fin de sesión:** Parámetros (tiempo, número de repeticiones, etc.) que permiten definir cuándo se acaba la actividad.
8. **Instrumentos de medida:** Materiales (aparato, software, escala...) o procedimientos que se utilizan para recoger/valorar los indicadores.
9. **Asistencia:** Ayuda que el terapeuta facilita al paciente para que pueda completar la actividad.
10. **Feedback:** Retroalimentación que recibe el paciente sobre la ejecución de la actividad.
11. **Indicadores de resultado:** Parámetro que permite valorar la evolución del paciente y determinar si se ha alcanzado el objetivo terapéutico.

La información se representa siguiendo la siguiente estructura (Figura 2):

Identificación de las oportunidades de mejora tecnológica

Los mapas de proceso ofrecen una visión integral y estructurada de la información relativa a las actividades de rehabilitación que queremos monitorizar/automatizar.

Para la identificación de oportunidades de mejora se sigue la siguiente metodología [20]:

1. Detección de debilidades y fortalezas sobre el modelo actual (*AS IS*)
2. Propuesta de estrategia de mejora para cada una de las debilidades detectadas
3. Integración de fortalezas y propuestas de mejora en el nuevo modelo (*TO BE*)

5.1.3. Metodología para el diseño e implementación de EVs para Rehabilitación

Finalmente, combinando las metodologías anteriores, se elaboró una nueva metodología que responde a las necesidades específicas del proyecto (Figura 3). En la primera etapa se obtiene una especificación detallada de las actividades de rehabilitación que se desean implementar en el entorno virtual. Para ello se realizan una serie de sub-tareas, la primera de las cuales consiste en preseleccionar y definir las actividades que en la actualidad son utilizadas en la práctica clínica y que se consideran candidatas para ser incluidas en el entorno virtual (tarea A.1). Acto seguido se seleccionan las actividades que se desean adaptar en la primera iteración (A.2) y se especifican de forma detallada, obteniendo como resultado un modelo de descripción inicial de la forma en que se desarrollan las actividades en la actualidad, sin tecnología asociada (A.3). Una vez que se dispone de una definición formal de las actividades, se analizan dichas actividades intentando identificar sus limitaciones y posibilidades de mejora; proponiendo las estrategias de mejora (A.4). Este análisis se utiliza para definir las nuevas actividades que van a ser ejecutadas en el entorno virtual. Finalmente, los últimos pasos de la fase de definición de actividades consisten en elaborar un prototipo de papel (A.5) y realizar una primera evaluación por parte de los terapeutas (A.6). Tras la evaluación, en el caso de ser necesario, se redefine la especificación de las nuevas actividades (A.7) y se vuelve a realizar un nuevo prototipo de papel, hasta que se obtenga una especificación estable.

Esta especificación sirve de entrada a la segunda etapa de la metodología, donde se realiza el diseño del entorno

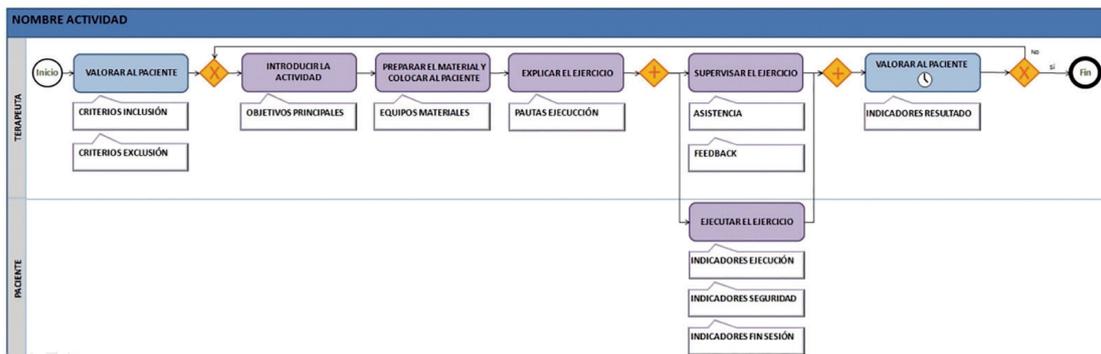


Figura 2. Mapa AS IS patrón

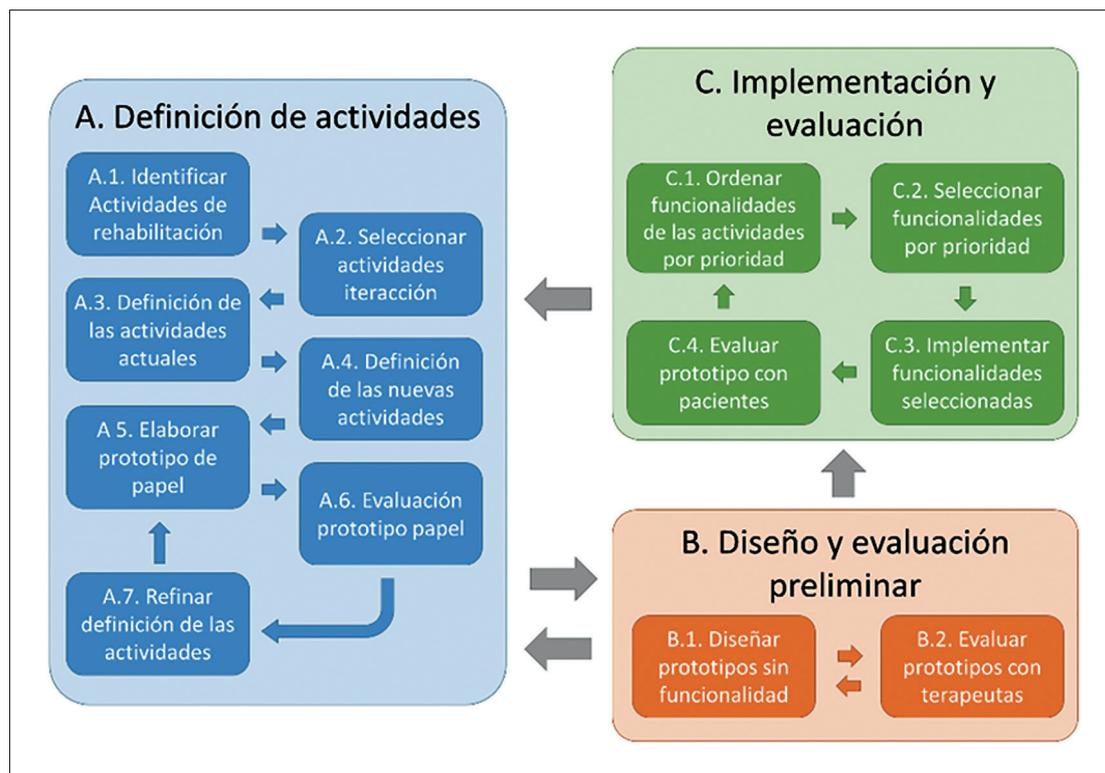


Figura 3. Metodología para el diseño e implementación de entornos virtuales para rehabilitación

virtual y se elabora un primer prototipo preliminar (B.1), que es evaluado por los terapeutas (B.2).

En la tercera fase de la metodología se ordenan todas las funcionalidades que debe tener el entorno de rehabilitación y se les otorga una prioridad (C.1). Acto seguido, se elabora un prototipo funcional con aquellas funcionalidades de mayor prioridad (C.2, C.3) y se evalúa con usuarios finales (pacientes) (C.4). El uso de esta metodología proporciona prototipos evolutivos, en los que cada vez se encuentran nuevas funcionalidades. De este modo, los resultados de las evaluaciones de la segunda y tercera fase, sirven a su vez para redefinir las especificaciones realizadas en la primera fase.

5.2. DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE REHABILITACIÓN

5.2.1. Selección y definición clínica de las Actividades de Rehabilitación

En primer lugar para la creación de los entornos virtuales se llevó a cabo un estudio interdisciplinar con los especialistas clínicos del Institut Guttmann que permitió identificar, dentro del catálogo actual de actividades de rehabilitación empleadas en la práctica en el hospital, cuáles son las más adecuadas para ser instrumentalizadas y adaptadas a un entorno tecnológico interactivo. Tras el análisis de las diferentes áreas de rehabilitación, se preseleccionaron 14 actividades pertenecientes al área

de terapia ocupacional (Tabla 1). De estas 14 actividades, se seleccionaron aquellas más adecuadas para su adaptación a un entorno interactivo controlado mediante una cámara de profundidad de bajo coste. Las actividades seleccionadas aparecen marcadas en la misma tabla (Actividad 8 y Actividad 10).

Una vez tomada la decisión de las actividades que deben implementarse inicialmente se realizó una descripción clínica de dichas actividades. En esta descripción se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- *Valoración inicial del paciente:* Antes de poder pautar una actividad a un paciente, se le deberá realizar una valoración que permita asegurar que el paciente es apto para realizar dicha actividad. La valoración del paciente se debe ajustar a los siguientes criterios:
 - Criterios de inclusión: Tipo de paciente para el que es útil realizar esta actividad. Circunstancia (característica, estado, déficits del paciente) que aconseja la prescripción de la actividad. Debe guardar relación con los objetivos de la actividad.
 - Criterios de exclusión: Circunstancia que desaconseja o prohíbe la prescripción de la actividad.
- *Objetivos terapéuticos:* El fin por el cual se lleva a cabo la actividad. Debe relacionarse con las necesidades del paciente y estar alineado con los criterios de inclusión.

- *Equipos materiales*: Aparatos y medios físicos que se utilizan en la ejecución de la actividad.
- *Pautas de ejecución*: Tareas, pasos y acciones principales que debe ejecutar el paciente para completar la actividad.
- *Indicadores de progreso*: Parámetros que proporcionan información en tiempo real sobre el desarrollo de la actividad.
 - Indicadores de ejecución: Parámetro que permite valorar si la tarea se está ejecutando de forma correcta o incorrecta.
 - Indicadores de seguridad: Parámetros que, si se controlan, eliminan o reducen el riesgo de daño o lesión por parte del paciente o del terapeuta a un nivel aceptable.
- Indicador de fin de sesión: Parámetros (tiempo, número de repeticiones, etc.) que permiten definir cuándo se acaba la actividad.
- *Asistencia*: Ayuda que el terapeuta facilita al paciente para que pueda completar la actividad.
- *Feedback*: Retroalimentación que recibe el paciente sobre la ejecución de la actividad.
- *Valoración periódica del paciente*: Parámetro que permite valorar la evolución del paciente y determinar si se ha alcanzado el objetivo terapéutico.

Tabla 1. Identificación de actividades actuales

Id	Nombre de la actividad	Descripción
Actividad 1	Deslizamiento en diferentes planos (horizontal, inclinado)	La actividad consiste en realizar una actividad de deslizamiento en diferentes planos con un miembro o con los dos, intentando facilitar el movimiento con diferentes superficies y materiales. La actividad se iniciará en el plano horizontal para ir incrementando la dificultad.
Actividad 2	Desplazamiento de objetos de diferentes formas, tamaños y pesos en diferentes planos	Desplazamiento de objetos de diferentes formas, tamaños y pesos en diferentes planos. La dificultad se adaptará a las características del paciente en función de la forma, tamaño y peso del objeto, así como el lugar de origen y final de la actividad.
Actividad 3	Encaje de piezas apareadas con diferentes formas y tipos de encaje (trabajo bimanual)	El paciente debe conseguir unir piezas del mismo color que estarán distribuidas en una mesa con el fin de conseguir reproducir figuras geométricas del mismo color, una vez estén formadas se colocaran encima de una guía / patrón.
Actividad 4	Coger diferentes tipos de piezas y encajarlas en el hueco correspondiente	La actividad consiste en coger diferentes objetos y encajarlos en el molde correspondiente. Los objetos pueden ser 3D, para el trabajo de la garra (sin dejar de lado el trabajo viso-espacial) y 2D, para el trabajo concreto de pinza lateral (y trabajo viso-espacial).
Actividad 5	Potenciación de la musculatura de la mano con plastilinas de diferentes densidades	Utilizando plastilinas de diferentes densidades se trabajaran la potenciación de las diversas pinzas que se pueden realizar con la mano.
Actividad 6	Óculo-motor: Chinchetas, pinchitos: pinchar con objetos de diferentes formas resiguiendo una línea y/o dibujo	El usuario debe clavar objetos tipo chinchetas, una tras otra, siguiendo el contorno de un dibujo. La actividad se puede realizar con diferentes objetos punzantes (chinchetas, palillos, alfileres,...) para realizar diferentes tipos de prensión/agarre.
Actividad 7	Coordinación bimanual (movimiento simétrico)	Realizar movimientos simétricos con ambas EESS sobre el tablero tándem
Actividad 8	Coordinación (pasar disco por obstáculos)	El usuario debe coger un disco con las dos manos y hacerlo encajar en un palo. El palo central por el que debe pasar el disco tiene palos transversales y el disco una abertura de manera que el paciente debe ir girando el disco para conseguir que llegue hasta la base.
Actividad 9	Coordinación de dedos y manos (botones)	El paciente debe utilizar ambas manos para simular la actividad de coser con botones gigantes.
Actividad 10	Disociación de dedos (piano)	El paciente se encontrará sentado delante de una mesa. En ella habrá un teclado de piano u otro elemento que simule un piano o teclado. La tarea consiste en estimular la movilidad de ambas manos mediante movimientos disociados de los dedos de cada mano. El usuario irá colocando los dedos en distintos puntos del teclado según los estímulos visuales que se le presenten.

Id	Nombre de la actividad	Descripción
Actividad 11	Alimentación (Uso de cubertería: cortar, pinchar...)	Entrenamiento de la actividad de alimentación utilizando cubiertos adaptados o no. Ya sea para uso de cuchara, tenedor y/o cuchillo
Actividad 12	Pre-escritura	El paciente realizará un entrenamiento de la escritura, a través de la pre-escritura. Utilizando diferentes plantillas y lápices/bolígrafos/rotuladores; según el nivel/habilidad del paciente.
Actividad 13	Pinzas de tender la ropa	La persona deberá coger de una bandeja diferentes pinzas de la ropa (de una en una), las tiene que colocar en una palo vertical (desde abajo hacia arriba) o en horizontal (de derecha a izquierda o al revés). El objetivo final de la tarea es colocar todas las pinzas de la bandeja en el palo.
Actividad 14	Apoyos laterales para inclinar el tronco	El paciente estará sentado en un taburete y realizará apoyos laterales para transferir la carga a las EESS inclinando el tronco a izquierda y derecha de la línea media.

Actividad A: “Coordinación (pasar disco por obstáculos)” – (Actividad 8)

Descripción: El usuario debe coger un disco con las dos manos y hacerlo encajar en un palo. El palo central por el que debe pasar el disco tiene palos transversales y el disco una abertura de manera que el paciente debe ir girando el disco para conseguir que llegue hasta la base.

Valoración inicial del paciente:

Tabla 2. Actividad A: Criterios de inclusión

Criterios de inclusión		
	Descripción	Instrumento de medida
CI 1	Déficit de coordinación bimanual	Observación
CI 2	Déficit de atención	Valoración neuropsicológica: CPT.

Tabla 3. Actividad A: Criterios de exclusión

Criterios de exclusión		
	Descripción	Instrumento de medida
CE 1	Incapacidad de agarre	Observación. En estudios: ARA-test.
CE 2	Problemas visuales importantes	Valoración oftalmológica.
CE 3	Ataxia grave	Observación (El “temblor” es excesivo suponiendo un riesgo para la integridad del usuario).
CE 4	Déficit cognitivo-conductual importante.	Valoración neuropsicológica: LCFS.

Objetivo terapéutico:

Tabla 4. Actividad A: Objetivos terapéuticos

Objetivo 1	Mejorar la coordinación
Objetivo 2	Mejorar la atención

Equipos materiales:

Tabla 5. Actividad A: Equipos materiales

Material 1	Discos
Material 2	Palo central

Pautas de ejecución:

Tabla 6. Actividad A: Pautas de ejecución

Tarea 1	Coger el disco con las dos manos
Tarea 2	Encajarlo por el palo hasta conseguir que el disco llegue a la base del palo

Indicadores de proceso:

Tabla 7. Actividad A: Indicadores de ejecución

Indicadores de ejecución		
	Indicadores de proceso	Instrumento de medida
Tarea 1	Contacto disco – palo central	Observación
Tarea 2	Tiempo que tarda hasta encontrar la posición correcta para que el disco avance	Observación
Actividad	Tiempo en finalizar la actividad	Observación
Actividad	Cantidad de discos depositados en la base	Observación

Tabla 8. Actividad A: Indicador de seguridad

Indicador de seguridad
Ninguno

Tabla 9. Actividad A: Indicadores de fin de sesión

Indicador de fin de sesión
Número de repeticiones

Asistencia:

Tabla 10. Actividad A: Asistencia

Tarea 1	No aplica.
Tarea 2	Verbal. Pautas para ayudar a entender cómo debe ir girando el disco para hacerlo pasar

Feedback:

Tabla 11. Actividad A: Feedback

Tarea 1	Verbal
Tarea 2	“Contacto”. El paciente sabe si está haciendo correctamente el ejercicio si el disco no choca contra el palo y puede avanzar hasta llegar a la base.

Valoración periódica del paciente:

Tabla 12. Actividad A: Valoración periódica

	Indicador de resultado	Instrumento de medida
Objetivo 1	Coordinación	Observación
Objetivo 2	Atención	Valoración neuropsicológica: CPT.

Actividad B: “Disociación de dedos (Piano)” – (Actividad 10)

Descripción: El paciente se encontrará sentado delante de una mesa. En ella habrá un teclado de piano u otro elemento que simule un piano o teclado. La tarea consiste en estimular la movilidad de ambas manos mediante movimientos disociados de los dedos de cada mano. El usuario irá colocando los dedos en distintos puntos del teclado según los estímulos visuales que se le presenten.

Valoración inicial del paciente:

Tabla 13. Actividad B: Criterios de inclusión

Criterios de inclusión		
	Descripción	Instrumento de medida
CI 1	Alteración de la coordinación óculo-manual	Observación, Valoración neuropsicológica (visopercepción): Escala Poppelreuter (figuras superpuestas).
CI 2	Alteración de la movilidad disociada de dedos.	Observación.
CI 3	Déficit de sensibilidad en dedos.	Valoración médica.

Tabla 14. Actividad B: Criterios de exclusión

Criterios de exclusión		
	Descripción	Instrumento de medida
CE 1	Ausencia de movilidad funcional en dedos	Observación. En estudios: ARA Test, 9HPT.
CE 2	Movimientos incoordinados/coreoatéticos.	Observación.
CE 3	Déficit cognitivo-conductual importante.	Valoración neuropsicológica: LCFS.

Objetivo terapéutico:

Tabla 15. Actividad B: Objetivos terapéuticos

Objetivo 1	Mejorar la coordinación óculo-manual.
Objetivo 2	Mejorar la movilidad de dedos y la coordinación motora fina/movimientos disociados.
Objetivo 3	Mejorar y estimular a nivel propioceptivo y sensitivo los dedos.

Equipos materiales:

Tabla 16. Actividad B: Equipos materiales

Material 1	Piano o superficie que simule un piano.
Material 2	Altavoces para mejorar el feedback.

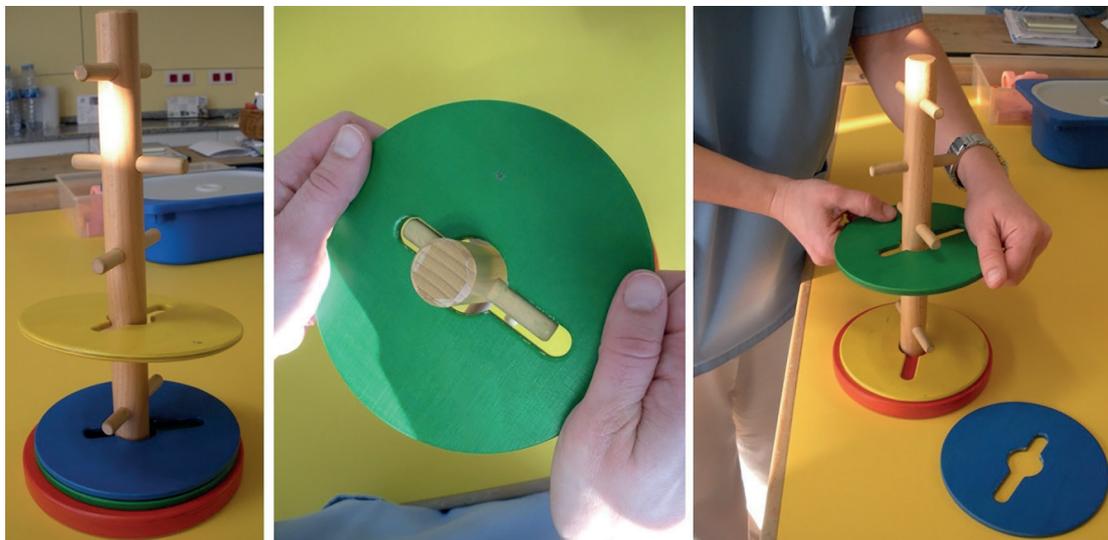


Figura 4. Actividad de Rehabilitación A.

Pautas de ejecución:

Tabla 17. Actividad B: Pautas de ejecución

Tarea 1	Mirar el piano, ver y escuchar la secuencia musical.
Tarea 2	Reproducir dicha secuencia en el piano con los dedos de ambas manos.

Indicadores de proceso:

Tabla 18. Actividad B: Indicadores de ejecución

Indicadores de ejecución		
	Indicadores de proceso	Instrumento de medida
Tarea 1	Atención visual/auditiva	Observación
Tarea 2	Reproducción correcta/parecida de la secuencia musical	Observación

Tabla 19. Actividad B: Indicador de seguridad

Indicador de seguridad
Ninguno

Tabla 20. Actividad B: Indicador de fin de sesión

Indicador de fin de sesión
Número de secuencias musicales asignadas por el terapeuta o tiempo máximo de la sesión

Asistencia:

Tabla 21. Actividad B: Asistencia

Tarea 1	Facilitar que mire la secuencia.
Tarea 2	Ayudarle a iniciar la secuencia en el piano.

Feedback:

Tabla 22. Actividad B: Feedback

Tarea 1	Verbal. Avisarle que escuche la música y se fije en la secuencia.
Tarea 2	Verbal. Avisarle que debe reproducirla.

Valoración periódica del paciente:

Tabla 23. Actividad B: Valoración del paciente

	Indicador de resultado	Instrumento de medida
Objetivo 1	Alteración de la coordinación óculo-manual	Observación, Valoración neuropsicológica (visopercepción): Escala Poppelreuter (figuras superpuestas).
Objetivo 2	Movilidad de los dedos.	Observación (Ejecución sin errores de los movimientos de los dedos).
Objetivo 3	Sensibilidad digital.	Observación (Realización de la misma presión con todos los dedos sobre el piano. Si ejerce más o menos presión de la normal, es posible que tenga alteración de la sensibilidad).

5.2.2. Especificación de los entornos virtuales de rehabilitación

Una vez se seleccionaron y analizaron las dos actividades de rehabilitación tal y como se desarrollan en la actualidad, se definieron tareas que, cumpliendo los mismos requisitos clínicos que las anteriores, puedan ser incluidas en la Estación de Rehabilitación. A continuación se detallan los requisitos definidos para las dos actividades.

Entorno Virtual de Rehabilitación A: Actividad de Coordinación

Esta actividad emula las características clínicas de la *Actividad de Coordinación* descrita en el apartado anterior. La adaptación se ha realizado de modo que el disco de madera que se utilizaba en la actividad original pase a ser considerado un volante, el cual permitirá controlar un objeto virtual móvil representado en el Entorno Interactivo. Para realizar la ejecución de la actividad, el usuario se debe colocar (sentado o de pie) delante de la Estación de Rehabilitación y debe coger con las dos manos el dispositivo "tipo volante".

Durante el recorrido, dependiendo del nivel de dificultad, al paciente se le presentarán diferentes estímulos con los que interactuar. Por ejemplo, cuando aparezca obstáculo, el paciente tendrá que esquivarlo, cuando aparezca un hito (semáforo en rojo, gasolinera de repostaje), el paciente tendrá que actuar en consecuencia (detener el coche en el caso del semáforo, o pasar por encima de la gasolinera).

La orientación y los movimientos del dispositivo "tipo volante" en el espacio determinarán la dirección y la velocidad de movimiento del coche. Permitiendo girar, acelerar y frenar el coche según los movimientos que se realicen con el volante. La tecnología de monitorización para realizar esta actividad consistirá en sensores de profundidad que permita medir movimientos en diferentes planos (3 ejes de rotación y 3 ejes de translación). En cuanto a la tecnología de realimentación al usuario, se empleará principalmente un sistema de realidad virtual interactivo ofrecido a través de una pantalla convencional; adicionalmente, y con el fin de proporcionar una realimentación más inmersiva al paciente, se ha propuesto la utilización de motores de vibración para la escenificación de las colisiones de los objetos virtuales.

Objetivo terapéutico:

Tabla 24. Entorno Virtual A: Objetivos terapéuticos

Objetivo 1	Mejorar la coordinación bimanual
Objetivo 2	Mejorar la atención

Equipos materiales:

Tabla 25. Entorno Virtual A: Equipos materiales

Material 1	Estación de trabajo: mesa y silla
Material 2	Pantalla de interacción
Material 3	Auriculares
Material 4	Kinect
Material 5	Disco (tipo volante que el paciente llevará en las manos) con feedback háptico mediante motor con vibratorio. El peso debería de estar entre 200g y 500g. El volante que debería de ser aproximadamente circular, debería tener un diámetro de 20-25 cm de diámetro.

Indicadores de proceso:

Tabla 26. Entorno Virtual A: Indicadores de ejecución

INDICADORES DE EJECUCIÓN		
	Indicador de proceso	Instrumento de medida
Actividad	Tiempo de agarre del volante con una sola mano. Si el tiempo es superior a 5 segundos, el volante empezará a vibrar. Si el tiempo es superior a 10 segundos, saltará un mensaje, por ejemplo, "coge el volante con las dos manos".	Automático
Actividad	Número de estímulos "erróneos". Si se superan los 10 errores seguidos, saltará un mensaje con un breve recordatorio de la instrucción de la pantalla.	Automático
Actividad	Tiempo de conducción fuera de la carretera. En cuanto salga de la carretera, el volante empezará a vibrar (de forma diferente a la del indicador de agarre con las dos manos). Si el tiempo es superior a 5 segundos, saltará un mensaje, por ejemplo, "vuelve a la carretera".	Automático

Tabla 27. Entorno Virtual A: Indicador de resultado de sesión

Indicador de resultado de sesión
Porcentaje de obstáculos esquivados
Velocidad media en tanto por ciento: 0% si la velocidad es nula y 100% si va a la máxima velocidad permitida en esa pantalla
Porcentaje de tiempo que el volante ha estado cogido con las dos manos

Tabla 28. Entorno Virtual A: Indicador de fin de sesión

Indicador de fin de sesión
Tiempo de la sesión, que será configurable por el terapeuta en el momento de planificación/personalización de la sesión

Asistencia:

Tabla 29. Entorno Virtual A: Asistencia

Actividad	Reloj con el tiempo que lleva el paciente ejecutando el ejercicio
Actividad	Mapa de situación en tiempo real
Actividad	Cuando se vaya aproximando a la "meta", que vayan saliendo mensajes motivadores, por ejemplo, "ya falta poco, sigue así" cuando falten 500m
Actividad	Puntuación considerando los obstáculos esquivados (suman puntos) y los atropellados (restan puntos)
Actividad	Mensaje "corrector" si se pierden un cierto número de puntos seguidos
Actividad	Y nada más porque al conductor no se le debe molestar

Rango terapéutico:

Se definirá un "índice resumen" de la actividad, calculado a partir de todos los indicadores de resultado de sesión, expresado en porcentaje. Como primera aproximación, se puede decir que si la ejecución está entre un 50% y un 85% está dentro del rango terapéutico

Los ejercicios se ajustarán al rango terapéutico ajustando diferentes parámetros:

- El escenario o entorno: tipo de recorrido y obstáculos (dificultad de 1 a 3):
 - Rural, dónde los obstáculos son vacas (deberían ser inmóviles o moverse lentamente) y el camino es recto y ancho, permitiendo varias orientaciones válidas del volante para esquivar los obstáculos.
 - Interurbano, dónde los obstáculos son perros (la velocidad de movimiento del obstáculo será mayor y podrá cruzarse en el camino) y la carretera no será completamente recta.
 - Urbano, dónde las personas son los obstáculos, la calle tiene señales de tráfico, encontrará múltiples desvíos o giros en el camino que requerirán una orientación concreta del volante para superar los obstáculos.
- Número de obstáculos por metro (dificultad de 1 a 4).
- Tiempo total de ejecución

Entorno Virtual de Rehabilitación B: Actividad de Disociación de dedos

Descripción: Esta actividad emula las características clínicas de la *Actividad de Disociación de dedos* descrita en el apartado anterior. En este caso el objeto de interacción consistirá en un piano virtual en el que el paciente deberá ir presionando una serie de teclas para reproducir un determinado patrón. El paciente se encontrará, sentado o de pie, frente a la pantalla y con las manos apoyadas sobre la mesa. En la pantalla aparecerá una representación virtual de las manos del paciente que se

adaptan a sus movimientos y le permitan interactuar con piano virtual. Las diferentes teclas del teclado virtual se irán “iluminando” y según el patrón que deba ejecutar el paciente. Debiendo este presionar sobre la mesa el espacio equivalente a las teclas indicadas con el dedo que se le indique.

La mesa dispondrá de una superficie sensible a la presión (sobre la que el usuario colocará las manos) que monitorizará las presiones ejercidas por el usuario a lo largo del ejercicio. También se utilizará un sensor de profundidad para monitorizar el movimiento de los dedos y poder discriminar si la presión se está realizando con el dedo indicado en cada momento.

Objetivo terapéutico:

Tabla 30. Entorno Virtual B: Objetivos terapéuticos

Objetivo 1	Mejorar la coordinación óculo-manual
Objetivo 2	Mejorar la movilidad de dedos y la coordinación motora fina/movimientos disociados
Objetivo 3	Mejorar y estimular a nivel propioceptivo y sensitivo de los dedos

Equipos materiales:

Tabla 31. Entorno Virtual B: Equipos materiales

Material 1	Estación de trabajo: mesa y silla
Material 2	Pantalla de interacción
Material 3	Auriculares
Material 4	Kinect
Material 5	Superficie sensible a la presión

Indicadores de proceso:

Tabla 32. Entorno Virtual B: Indicadores de proceso

Indicadores de ejecución		
	Indicador de proceso	Instrumento de medida
Actividad	Presión ejercida sobre la superficie. La presión correcta vendrá determinada por la melodía	Automático
Actividad	Tiempo de presión de cada tecla. El tiempo correcto vendrá determinado por la melodía	Automático
Actividad	Dedo con el que presiona cada tecla	Automático

Tabla 33. Entorno Virtual B: Indicadores de resultado de sesión

Indicador de resultado de sesión
Porcentaje de teclas acertadas
Porcentaje de errores con cada dedo (representado sobre un esquema de las manos)

Tabla 34. Entorno Virtual B: Indicadores de fin de sesión

Indicador de fin de sesión
Tiempo de la sesión, que será configurable por el terapeuta en el momento de planificación/personalización de la sesión

Asistencia:

Tabla 35. Entorno Virtual B: Asistencia

Actividad	Pentagrama con el avance de la melodía
Actividad	Puntuación considerando las teclas acertadas (suman puntos) y las erróneas (restan puntos)
Actividad	Mensaje “corrector” si se falla tres veces consecutivas en la misma tecla

Rango terapéutico:

Al igual que para en Entorno Virtual A, se definirá un “índice resumen” de la actividad, calculado a partir de todos los indicadores de resultado de sesión, expresado en porcentaje que permita ajustar la dificultad del ejercicio a un determinado rango terapéutico. Los ejercicios se ajustarán al rango terapéutico ajustando los siguientes parámetros:

- Definir el nivel de dificultad:
 - Cadencia de la secuencia: muy lento, lento, medio, rápido, muy rápido
 - Complejidad de la “melodía”: Estímulos ordenados, desordenados.
 - Uso de plantillas del teclado: Con el fin de facilitar la ejecución a los pacientes, se podrá hacer uso de una plantilla que se sitúe sobre la mesa y que emule el piano virtual. De este modo el paciente no tendrá que coordinar el movimiento únicamente haciendo uso del entorno virtual en el que se representan el piano y un modelo virtual de sus manos.
- Definir la modalidad de ejecución:
 - Manos implicadas en la actividad: izquierda, derecha o ambas
 - Dedos implicados en la actividad (poder seleccionar sobre un esquema)
 - Tamaño y forma del teclado.

5.3. DISEÑO DE LOS ENTORNOS VIRTUALES DE REHABILITACIÓN

Para poder ejecutar las actividades definidas anteriormente es necesario implementar un entorno virtual de rehabilitación que permitan realizar la monitorización de los pacientes, actuar en consecuencia a los actos que estos realicen y visualizar y transmitirlos a los pacientes toda la información que requieran para ejecutar las actividades. La Figura 5 muestra un diseño conceptual con los módulos necesarios:

- Estación de rehabilitación:** La Estación de rehabilitación reúne todos los componentes hardware y software que permitirá al paciente interactuar. En esta estación se incluirían todos los dispositivos físicos de control (volante, Kinect, sensores de presión, etc...), los dispositivos que proveen feedback al paciente (pantalla,



Figura 5. Diseño general de los entornos de rehabilitación

altavoces, etc...) y el software necesario para realizar la monitorización.

- **Contenidos virtuales:** Los contenidos virtuales se corresponden con aquellos componentes software relacionados directamente con la lógica de ejecución y la representación gráfica de la actividad a realizar por el paciente. De este modo, nos encontramos dos aspectos principales: El primero son aquellos componentes software encargados de implementar la lógica de la actividad y de su mecanismo de control, mientras que en un segundo lugar están los métodos de representación gráfica.

5.3.1. Diseño de la estación de rehabilitación

La Figura 6 representa un prototipo virtual que muestra el aspecto previsto para la Estación de Rehabilitación una vez implementada.

Requisitos tecnológicos

Una vez definidos los requisitos de los entornos virtuales de rehabilitación, y con el fin de permitir la implementación de las nuevas actividades, se ha realizado el diseño software. Previamente se ha definido la arquitectura física de la Estación de Rehabilitación así como los requisitos tecnológicos inherentes a dicha arquitectura. A continuación se listan las diferentes funcionalidades que debe ofrecer la Estación de Rehabilitación:

- **Personalización del ejercicio:** El software que se desarrolle deberá permitir a los terapeutas realizar una configuración de los parámetros descritos en cada una de las actividades de modo que la ejecución se adecúe a las necesidades clínicas del paciente. Además, el software de control de la actividad deberá ajustarse



Figura 6. Escenificación Puesto Rehabilitación

automáticamente a un rango terapéutico adecuado, en el caso de que los ajustes realizados por el terapeuta no permitan al paciente realizar un ejercicio clínicamente significativo.

- **Monitorización de la orientación del volante:** Monitorizar la orientación del volante para poder identificar en tiempo real los contactos avatar-obstáculo, registrarlos y facilitar el feedback necesario. Para llevar a cabo esta monitorización se utilizará el dispositivo que combine un sensor de profundidad y una cámara RGB. El volante de control estará dotado de marcadores, de forma que se pueda utilizar la información de video ofrecida por el dispositivo sensor para identificar las acciones realizadas por el paciente.
- **Monitorización contacto manos-volante:**
 - Detección de agarre con dos manos.
 - Detección de agarre con una sola mano: Si el tiempo es superior a 5 segundos, el volante empezará a vibrar. Si el tiempo es superior a 10 segundos, saltará un mensaje, por ejemplo, “coge el volante con las dos manos”. El dispositivo Kinect será utilizado para monitorizar el tipo de agarre.
- **Monitorización del movimiento de los dedos:** Monitorización del movimiento de las manos y los dedos del paciente al ejecutar el Entorno Virtual B: Disociación de Dedos. Se debe poder monitorizar de forma precisa todos los movimientos que realice el paciente con sus manos. Esta monitorización debe realizarse sobre un entorno lo suficientemente amplio como para que el paciente pueda ejecutar las actividades. Además, deberá poder calcularse la posición relativa de las manos con respecto a una superficie plana que sirva de referencia al paciente.
- **Monitorización de la presión ejercida por los dedos:** Se debe poder monitorizar la presión que el paciente ejerza sobre la superficie de referencia al ejecutar la actividad del Entorno Virtual B: Disociación de Dedos. Para ello se puede hacer uso de sensores de presión como el sensor Tactilus.
- **Entorno interactivo:** El entorno virtual 3D será desarrollado según las especificaciones realizadas por los especialistas del *Institut Guttmann*, mediante el uso de software de desarrollo de entornos interactivos. Este entorno, además de tratarse de un entorno virtual que implemente las pantallas diseñadas para las actividades, deberá ofrecer la siguiente información al paciente:
 - Asistencia audiovisual: Dar las instrucciones iniciales, guiar el ejercicio y facilitar las correcciones necesarias en cada momento.
 - Feedback audiovisual: Informar sobre los errores o aportar refuerzo positivo mediante estímulos visuales (luces de colores), sonidos, etc.

- **Feedback háptico:** También se contempla la posibilidad de dotar al mando de control del Entorno Virtual A: Coordinación con un motor vibrador que simule los contactos avatar-obstáculo y otras interacciones.

En la Tabla 36 puede verse la relación de las funcionalidades de la Estación de Rehabilitación con las tecnologías que serán empleadas en su implementación.

Tabla 36. Tecnologías asociadas a la Estación de Rehabilitación

FUNCIONALIDAD	TECNOLOGÍA
PERSONALIZACIÓN DEL EJERCICIO	Plataforma de gestión terapéutica
MONITORIZACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL DISCO	Cámara RGB-Depth
MONITORIZACIÓN DEL CONTACTO MANO-OBJETO (Actividad A)	Cámara RGB-Depth + Software de monitorización
MONITORIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS MANOS (Actividad A)	Cámara RGB-Depth + Software de monitorización
MONITORIZACIÓN DE PRESIÓN DE LOS DEDOS (Actividad B)	Sensor de presión
ENTORNO INTERACTIVO	Software de desarrollo de entornos interactivos
FEEDBACK HÁPTICO (Actividad A)	Sistema de vibración del volante

5.3.2. Arquitectura conceptual del entorno virtual

Arquitectura conceptual del Entorno Virtual A: Coordinación

Los módulos que intervienen en este entorno virtual son:

- **Concentrador:** El concentrador será el módulo encargado de comunicarse y coordinar la acción entre los dispositivos sensores y actuadores. En el caso del Entorno Virtual A gestionará la información de la cámara de profundidad y RGB.
- **Entorno Multimedia:** Este entorno será capaz de ofrecer feedback en tiempo real al paciente en función de los datos recibidos por el gestor de tareas. También deberá representar la conducción del coche durante la ejecución según se detalla en el apartado.
- **Gestor de la Actividad:** Este módulo tendrá una doble función. En primer lugar deberá permitir al terapeuta seleccionar y configurar la actividad de rehabilitación que va a ejecutar el paciente. Además, la otra labor que debe realizar será gestionar el flujo de ejecución de la actividad de rehabilitación, para ello tendrá también que recibir y procesar la información ofrecida por el concentrador de cada uno de los sensores, así como indicar las órdenes que deba ejecutar tanto el entorno multimedia como los actuadores implicados en la actividad.
- **Gestor Terapéutico:** Toda la información recogida por el Gestor de Tareas al ejecutar una actividad

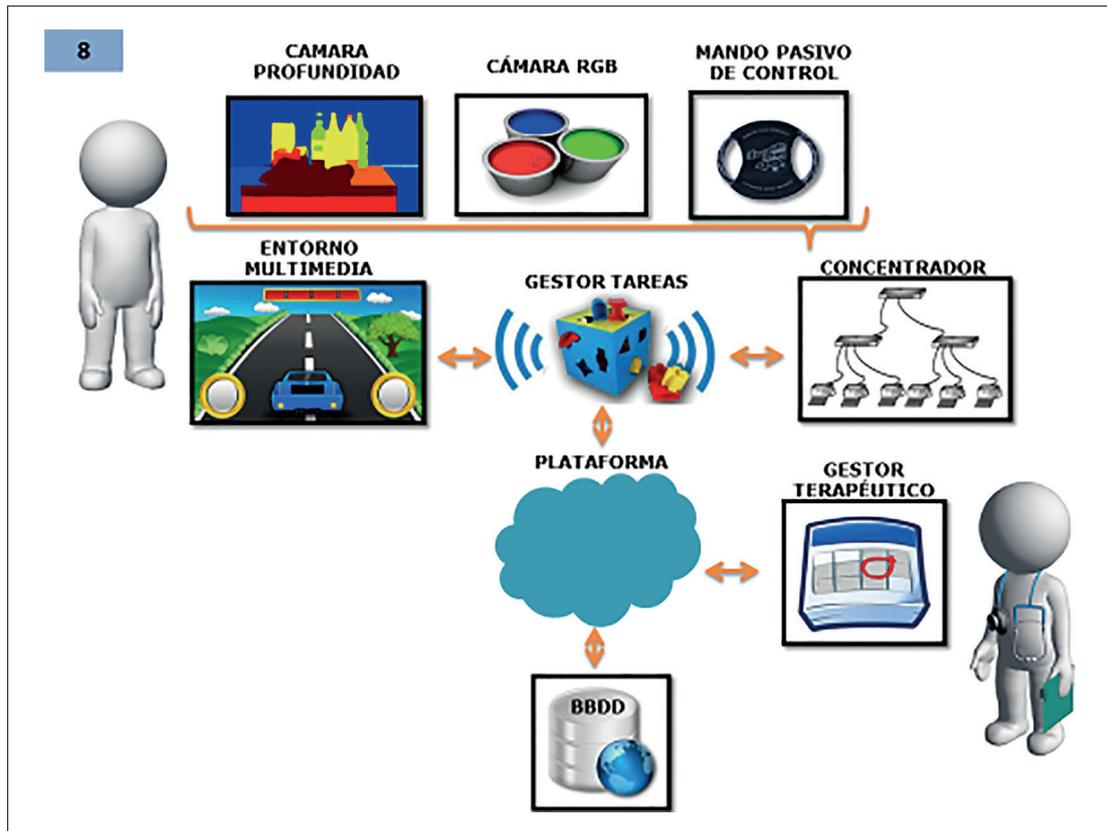


Figura 7. Arquitectura Conceptual Actividad A

deberá ser enviada y almacenada en un Gestor Terapéutico para poder ser revisada posteriormente por el terapeuta.

Arquitectura conceptual del Entorno Virtual B: Disociación de dedos

Los módulos que intervienen en este entorno virtual son:

- **Concentrador:** El concentrador será el módulo encargado de comunicarse y coordinar la acción entre los dispositivos sensores y actuadores. En el caso del Entorno Virtual B gestionará la información de la cámara de profundidad y RGB, y de la alfombra de presión.
- **Entorno Multimedia:** Este entorno será capaz de ofrecer feedback en tiempo real al paciente en función de los datos recibidos por el gestor de tareas. El Entorno Multimedia mostrará una representación del piano y las manos del paciente.
- **Gestor de la Actividad:** Al igual que en el caso anterior este módulo deberá permitir al terapeuta seleccionar y configurar la actividad de rehabilitación que va a ejecutar el paciente. Además, gestionará el flujo de ejecución de la actividad de rehabilitación, recibiendo y procesando la información proveniente del concentrador.

- **Gestor Terapéutico:** Toda la información recogida por el Gestor de Tareas al ejecutar una actividad deberá ser enviada y almacenada en un Gestor Terapéutico para poder ser revisada posteriormente por el terapeuta.

5.3.3. Diseño de los contenidos virtuales

Una vez definidos los requisitos tecnológicos, y realizado el diseño conceptual de los entornos de rehabilitación correspondientes a las dos actividades, se ha realizado un diseño preliminar, a modo de prototipo de papel, de las pantallas que serán implementadas.

Prototipo del Contenido Virtual A:

La Figura 9 ilustra un prototipo inicial del aspecto que debería tener la interfaz del entorno virtual en el que se ejecutará la actividad. Esta actividad estará compuesta por las siguientes pantallas de ejecución, que aparecerán de forma secuencial:

- Pantalla 1: presentación del ejercicio con las pautas de ejecución.
- Pantalla 2: Pantalla de ejecución del ejercicio (mostrada en Figura 9. Prototipo de papel del Entorno Virtual de Rehabilitación A):

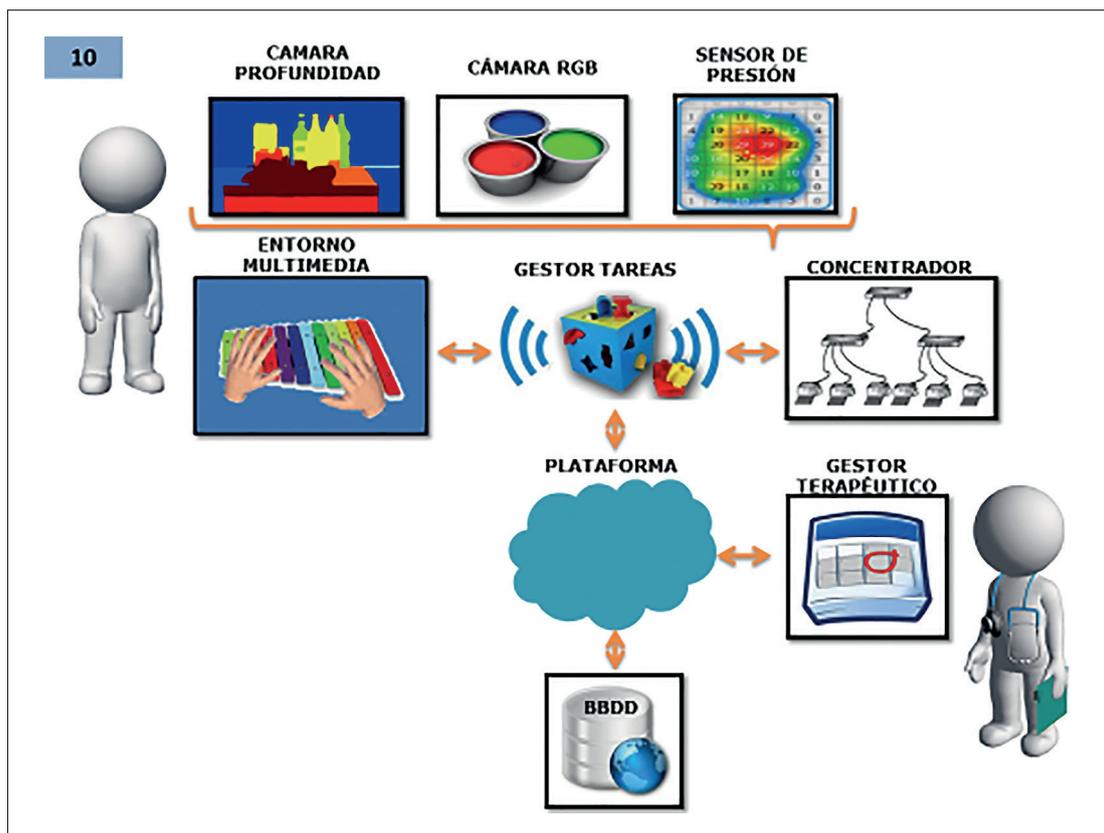


Figura 8. Arquitectura Conceptual Actividad B



Figura 9. Prototipo de papel del Entorno Virtual de Rehabilitación A

- Feedback auditivo: sonidos específicos en el momento que el coche colisiona (Cuando se atropella a alguien o algún ruido como por ejemplo).
- Feedback háptico: vibración del volante en el momento de la colisión o salida de carretera.
- Feedback visual:
 - Positivos, cuando el paciente llegue a destino pueden aparecer estímulos de felicitación.
 - Negativos, en el caso de atropello de alguno de los obstáculos, deberá representarse de alguna forma que ese obstáculo ha sido atropellado. En ningún

caso deberá verse sangre, con que el estímulo vilmente atropellado desaparezca basta.

- Pantalla 3: Pantalla de resultados donde se mostrará un “índice resumen de la actividad” y su evolución a lo largo de las sesiones.

Prototipo de Contenido Virtual B:

Esta actividad estará compuesta por las siguientes pantallas de ejecución, que aparecerán de forma secuencial:

- Pantalla 1: presentación del ejercicio con las pautas de ejecución. Una vez finalizada la presentación inicial del ejercicio, aparecerán unas manos sobre un teclado de piano, tocando la melodía que deberá reproducir el usuario.
- Pantalla 2: pantalla de ejecución del ejercicio:
 - Feedback auditivo: en el momento que el usuario presione una tecla, se producirá un sonido que dependerá de la tecla presionada (la nota, si ha presionado la tecla iluminada, o un sonido de “error” si ha presionado otra tecla) y de la manera (tiempo y fuerza) con la que se ha presionado (igual que pasa con las teclas de un piano).
 - Feedback visual: Las teclas se encenderán a medida que avance la melodía. Cada tecla iluminada se mantendrá encendida hasta que sea presionada con el dedo correcto. Si al tercer intento, el paciente no ha presionado la tecla correcta o lo ha hecho con el dedo equivocado, saltará un mensaje (verbal

y escrito). Si al siguiente intento, persiste el error, el ejercicio saltará automáticamente a la siguiente tecla.

- Pantalla 3: Pantalla de resultados donde se mostrará un “índice resumen de la actividad” y su evolución a lo largo de las sesiones.

La Figura 10 ilustra el prototipo inicial del entorno virtual en el que se ejecutará la actividad:

5.4. DESARROLLO DEL ENTORNO VIRTUAL DE REHABILITACIÓN

Como aparece reflejado en el diseño de los apartados anteriores, en la implementación de los entornos virtuales de rehabilitación existen dos aspectos bien diferenciados. Por un lado se ha desarrollado la Estación de Rehabilitación, que comprende tanto la implementación de los dispositivos de control con los que debe interactuar el paciente, como el desarrollo de los mecanismos software encargados de obtener y procesar la información de monitorización. Por otro lado, se han desarrollado los contenidos virtuales, tanto la lógica de control que gestionará su comportamiento, como los modelos y contenidos multimedia utilizados. La Figura 11 muestra las tecnologías utilizadas en cada uno de los elementos desarrollados en los entornos virtuales de rehabilitación.

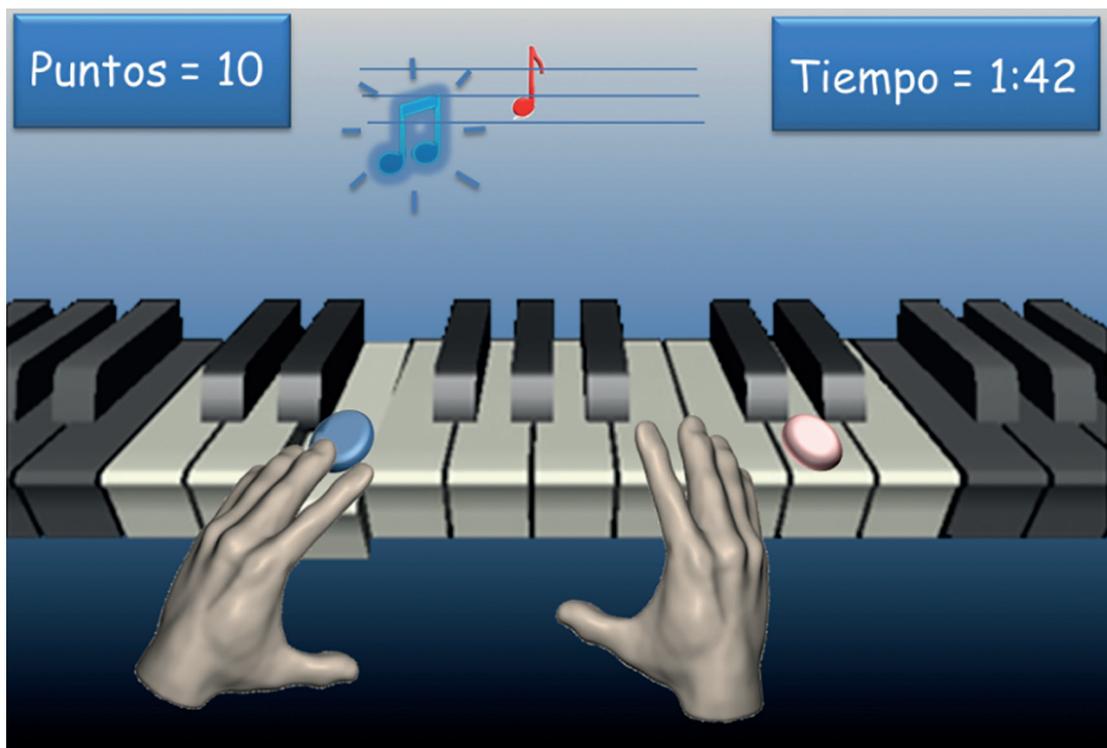


Figura 10. Prototipo de papel del Entorno Virtual de Rehabilitación B

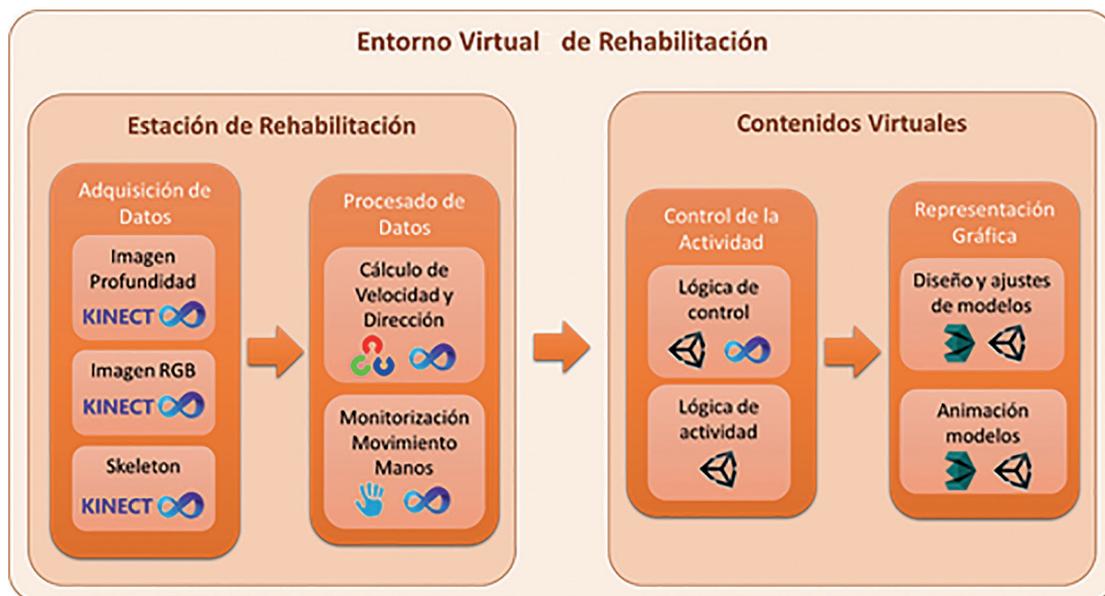


Figura 11. Tecnologías utilizadas en la implementación

5.4.1. Tecnologías empleadas en la estación de rehabilitación

La estación de rehabilitación comprende todos los dispositivos hardware y controladores software que permiten al paciente ejecutar las distintas actividades de rehabilitación. A nivel hardware los aspectos más importantes son el sensor Ms Kinect y el volante que se utilizará en el Entorno Virtual de Rehabilitación A. A nivel software, la estación de rehabilitación comprende todos los mecanismos utilizados para la monitorización, tanto los métodos referentes a la extracción de información como a su procesado. A continuación se describen las principales tecnologías utilizadas para la implementación de la estación de rehabilitación.

- **Microsoft Visual Studio:** Visual Studio es un IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) que permite desarrollar aplicaciones en los lenguajes como C#, C++ o Visual Basic. Este entorno se ha utilizado para implementar los componentes software de la Estación de Rehabilitación y también lógica de control de los Entornos Virtuales. Se han utilizado los lenguajes C# y C++.

Adquisición de datos

- **Microsoft Kinect (Hardware y software):** El dispositivo *Ms Kinect* es un sensor capaz de reconocer el comportamiento de los usuarios frente al ordenador. Este dispositivo, inicialmente pensado para el entretenimiento, permite crear un nuevo mecanismo de interacción más natural y amigable. Gracias a su coste reducido, su popularidad ha crecido enormemente desde su aparición en el mercado. Actualmente ha dejado de considerarse un dispositivo de entretenimiento para ser usado en multitud de aplicaciones como mecanismo de interacción.

El elemento principal de *Ms Kinect* consiste en un sensor infrarrojo de profundidad que ofrece una imagen en la que cada pixel, en vez de mostrar el nivel de intensidad de luz, indica la distancia a que se encuentra el objeto mostrado. Además de ofrecer la imagen de profundidad, el dispositivo *Ms Kinect* reúne las siguientes funcionalidades:

- Imagen RGB.
- Reconocimiento y segmentación de los usuarios.
- Detección de puntos clave de los usuarios (mano, codo, hombro, rodilla, cabeza...) y reconstrucción de un esqueleto virtual.
- Reconocimiento facial.
- Array de micrófonos para el reconocimiento de voz.

Existen varias herramientas de desarrollo que permiten trabajar con este dispositivo. Las más populares son la ofrecida por *PrimeSense*, empresa encargada del desarrollo inicial de *Kinect*, y el *Kinect SDK* distribuido por *Microsoft*. Este último ha sido utilizado para el desarrollo de este trabajo ya que se ha observado una mayor versatilidad y robustez en su sistema de identificación de esqueleto. La última versión del *Ms Kinect SDK* permite detectar el esqueleto en dos rangos de distancia (cercano y normal) y también dispone de un modo de detección específico para personas que se encuentren sentadas. *Microsoft* distribuye su entorno de desarrollo de forma gratuita junto con el dispositivo hardware, permitiendo desarrollar nuevas aplicaciones de forma sencilla.

MS Kinect y MS Kinect SDK serán utilizados para realizar la adquisición de datos. Los tres elementos utilizados en la estación de rehabilitación son la imagen de

profundidad, la imagen de color RGB y la información de puntos de interés del skeleton.

Procesado de datos

- **OpenCV:** OpenCV es una librería de visión artificial [21] con una interfaz que permite ser utilizada por C++. OpenCV dispone de una licencia BSD, siendo libre tanto para trabajos académicos como comerciales. OpenCV presenta un gran nivel de eficiencia, pudiendo ser utilizada en trabajos que exigen procesado en tiempo real, como es el caso del procesado de datos de la estación de rehabilitación. Esta librería es utilizada por la estación para la obtención de los valores de dirección en el Entorno Virtual A.
- **3GearSystem:** Para realizar el tracking de la mano necesario en el Entorno Virtual B se ha hecho uso del software de monitorización y control 3GearSystem [22]. Este software, utiliza la información capturada por el Ms Kinect para ofrecer la posición de las manos sobre una superficie, de modo que sea posible identificar cuando alguno de los dedos, tanto de la mano izquierda como derecha, entra en contacto con dicha superficie. Este software de control nos ofrece, mediante un proceso previo de calibración (cuyo resultado puede ser almacenado y empleado atendiendo a patrones antropométricos), la posibilidad de monitorizar los puntos mostrados en la Figura 12.

5.4.2. Tecnologías empleadas en los contenidos virtuales

- **Unity3D:** Para la mayor parte de la implementación de los contenidos virtuales se ha utilizado el software Unity3D [23]. Este software consiste en un motor de

renderizado para creación de videojuegos que se encuentra incluido en un conjunto de herramientas para la creación rápida de contenido 3d interactivo. Las figuras siguientes muestran el entorno de desarrollo utilizado (Figura 13 y Figura 14).

- **Autodesk 3ds Max:** 3ds Max [24] es un software de creación de gráficos y animación 3d. Mediante la utilización de 3Ds Max se ha realizado el rigging de los modelos 3D utilizados por Unity3D. El rigging es una técnica que consiste en separar las secciones que conforman el modelo 3D a las cuales se les asigna un hueso, este hueso es el que proporciona de movimiento a dicha sección. Los huesos aplican un peso a la malla del modelo 3D, esto quiere decir que el peso es el que indica cómo es la deformación del modelo, utilizando las herramientas que proporciona 3Ds Max es posible ajustar estos pesos para generar una deformación más natural sobre el modelo con el que se esté trabajando.

5.5. DISEÑO DE LA PRUEBA DE CONCEPTO DE LA ESTACIÓN DE REHABILITACIÓN

Para realizar una primera evaluación del entorno virtual desarrollado se diseñó una prueba de concepto con pacientes. Los objetivos principales de esta prueba fueron: 1) conocer la opinión de los usuarios acerca de la facilidad de uso de las actividades, la facilidad de aprendizaje y la comprensión de indicaciones a seguir; 2) detectar las limitaciones que existan tanto con los dispositivos de interacción como con los contenidos virtuales; y 3) determinar los cambios que se deben realizar para mejorar las actividades implementadas.

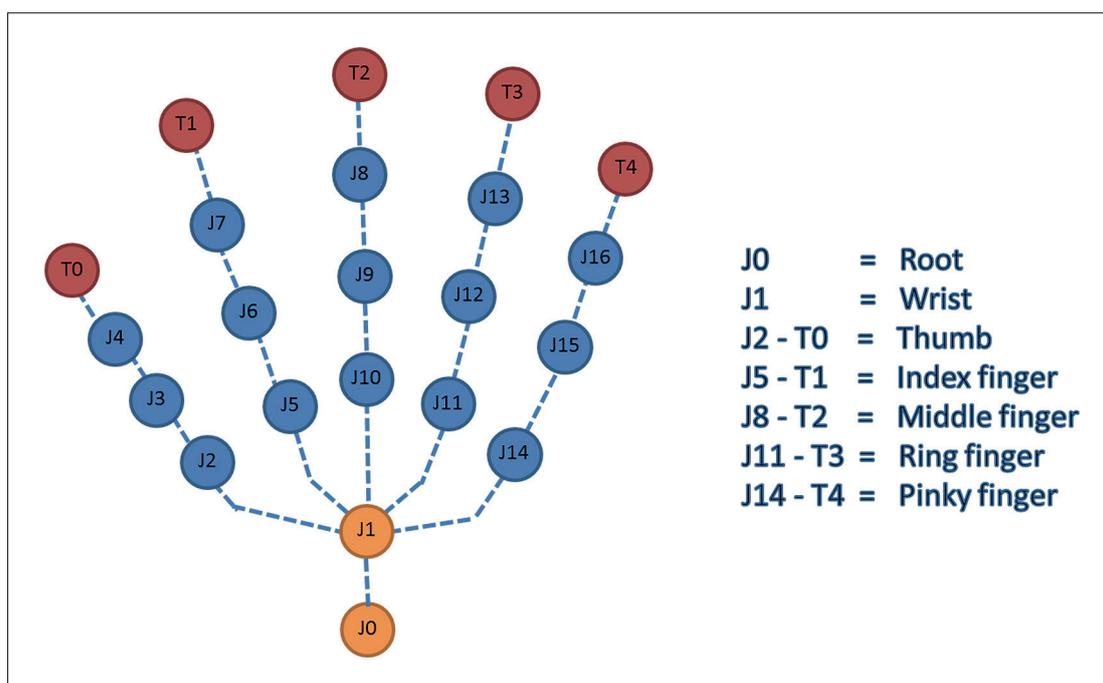


Figura 12. Puntos monitorizados por 3GearSystem

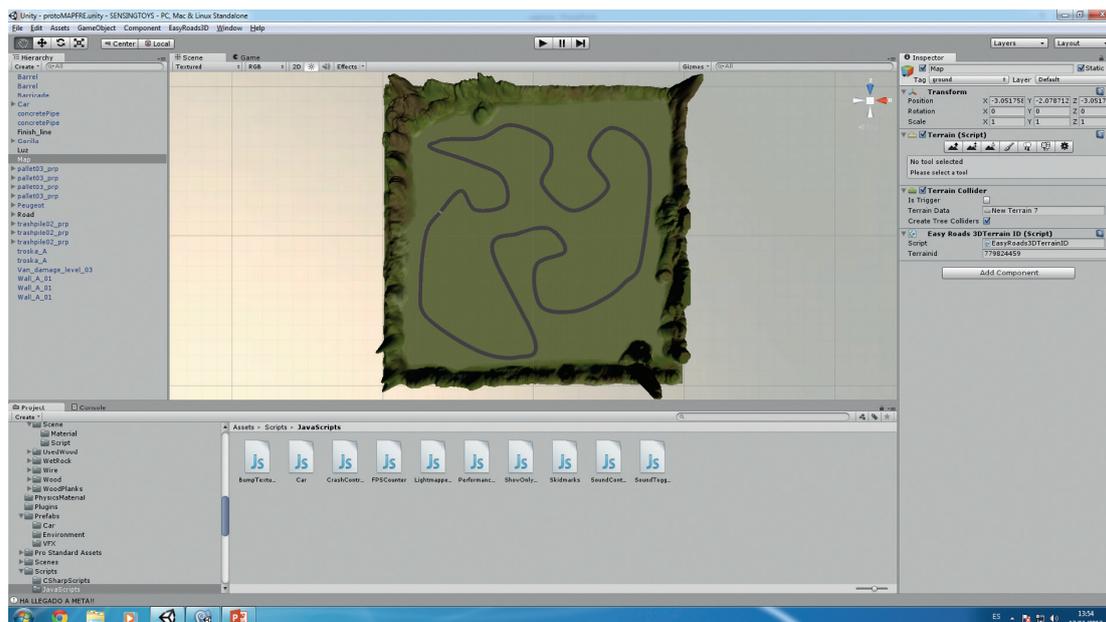


Figura 13. Diseño del entorno virtual multimedia. Vista general

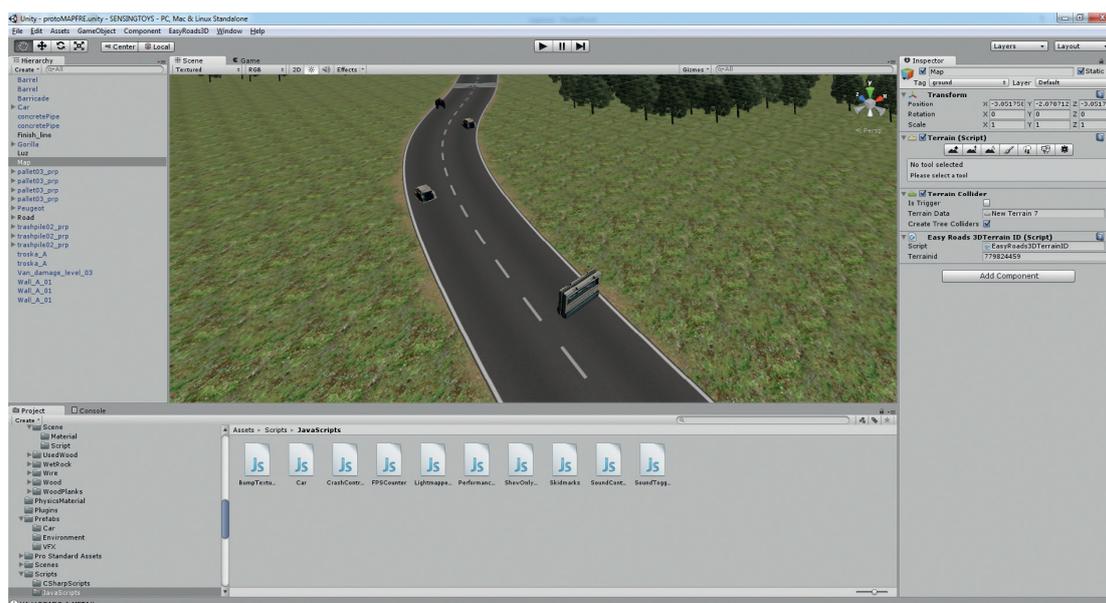


Figura 14. Diseño de entorno multimedia. Vista detalle

Se estableció que la prueba de concepto debía desarrollarse en un entorno controlado (laboratorio de análisis del movimiento del Institut Guttmann) con el fin de evitar distracciones y tensiones externas a los pacientes. Para el diseño de la prueba se contó con la participación de terapeutas especialistas, que participaron como co-investigadores.

Para poder evaluar el entorno virtual se definió un cuestionario de aceptación adaptado para las actividades de rehabilitación propuestas, construido a partir de varios test de usabilidad [25-27] (el cuestionario puede verse en el ANEXO 1).

Se elaboró un protocolo para la realización de la prueba de concepto consistente en los siguientes 4 pasos:

1. *Selección de pacientes*: los criterios de inclusión/exclusión de pacientes definidos para las 2 actividades de rehabilitación.
2. *Instalación de la estación de rehabilitación*.
3. *Ejecución de las actividades*: inicialmente, una ejecución libre de las actividades para familiarizar a los pacientes con el entorno virtual. Acto seguido, ejecución guiada mediante las indicaciones mostradas por el juego.
4. *Cumplimentación de los cuestionarios de aceptación*.

6. RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos en el proyecto han sido la obtención de prototipos del entorno virtual de rehabilitación que se ajustan estrictamente a los requisitos definidos, así como su evaluación mediante una prueba de concepto. A continuación se describen los aspectos más significativos de los prototipos desarrollados y los resultados de la prueba de concepto.

6.1. DESARROLLO DE LOS ENTORNOS DE REHABILITACIÓN

6.1.1. Arquitectura de la Estación de rehabilitación

Como introducción a los resultados mostramos la arquitectura de la estación de rehabilitación desarrollada, la cual se ajusta a los requisitos y diseños definidos en las etapas anteriores. Podemos encontrar tres módulos bien diferenciados. El primero de ellos, de Adquisición de Datos, es el encargado de comunicarse con los sensores, recolectar la información que estos ofrecen sin tratarla y enviársela al segundo módulo, el Concentrador. El concentrador obtendrá estos datos en bruto y la procesará para obtener la información que permita al Motor de Actividad ejecutar las actividades de rehabilitación. La Figura 15 muestra esta disposición y la comunicación entre los diferentes módulos.

6.1.2. Primer prototipo Entorno de Rehabilitación A

El primer prototipo que se diseñó del Entorno de Rehabilitación A se correspondía con los criterios definidos en el apartado de definición de requisitos y diseño de la actividad. Como está descrito, para poder ejecutar este ejercicio era necesario disponer de un sistema de monitorización que identificase la posición del volante y los movimientos que el paciente realizaba con él. En esta primera implementación se utilizó un volante estándar, al que se le incorporaron dos marcadores textiles. A continuación se explica el proceso de captura y procesador de datos.

Captura de datos y procesado

En la actividad de coordinación, de acuerdo a las especificaciones definidas, el paciente deberá conducir un coche a través de un circuito predefinido. El objeto de interacción que utilizará el usuario para realizar esta tarea será un volante con el que podrá girar el coche y modificar la velocidad a la que se desplace.

Para poder modificar la dirección del coche, el paciente deberá girar el volante en el sentido en el que desee girar el coche, existiendo un punto de reposo en el que el coche se desplazará en línea recta. El giro podrá medirse en un valor del rango $[-1,1]$, pudiendo configurar ángulo al que debe llevar el paciente el volante para alcanzar los valores máximos. La Figura 16 ilustra cómo el giro del volante afectará al valor de dirección.

El valor de giro del volante se obtendrá mediante métodos de visión artificial, identificando dos marcadores situados en la parte superior e inferior del volante. Para ello se hace uso del dispositivo *Microsoft Kinect*, el cual proporciona una imagen RGB, una imagen equivalente de profundidad y la generación de un esqueleto asociado al paciente. El proceso que se ha seguido para obtener el valor de giro (puede verse en la Figura 17), comienza haciendo uso del esqueleto ofrecido por *Kinect* para delimitar el área en la que se encuentra el volante. Acto seguido se realiza una transformación al espacio de colores HSV que permita realizar un filtrado por colores para segmentar los marcadores del volante. Finalmente se identifican los dos marcadores y se calcula el ángulo que forman sobre la horizontal de la imagen, pudiendo obtener de este modo el valor de dirección que se indicará al gestor de la actividad.

En cuanto a la velocidad del coche, el paciente deberá alejar o acercar el volante de su cuerpo para modificar el valor de velocidad en el rango $[-1,1]$, como se muestra en la Figura 18. Para calcular este valor se ha hecho uso de la imagen de profundidad ofrecida por el dispositivo *Microsoft Kinect*, calculando la diferencia de profundidad entre el tronco del paciente y el volante.



Figura 15. Arquitectura estación de rehabilitación

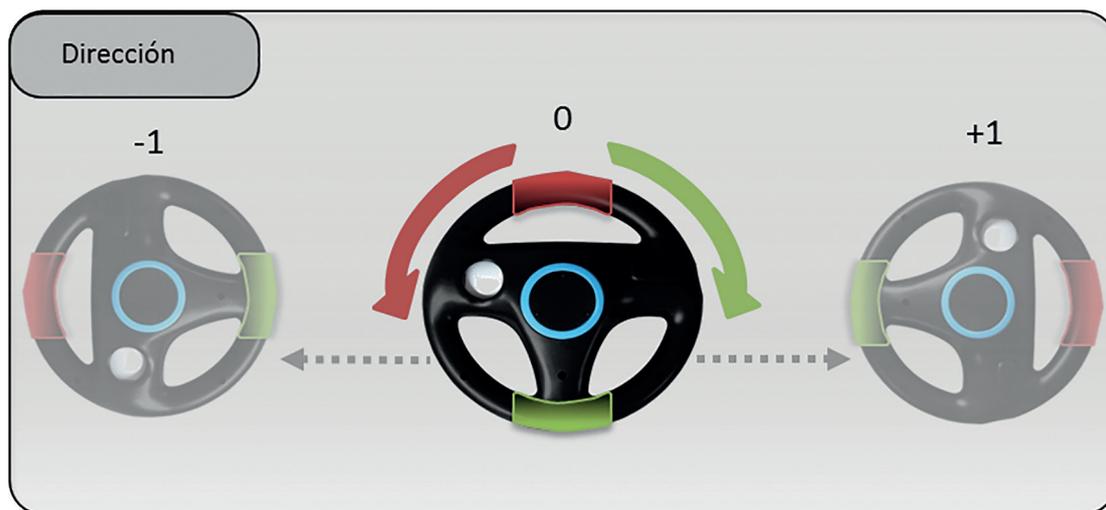


Figura 16. Esquema de control de la dirección

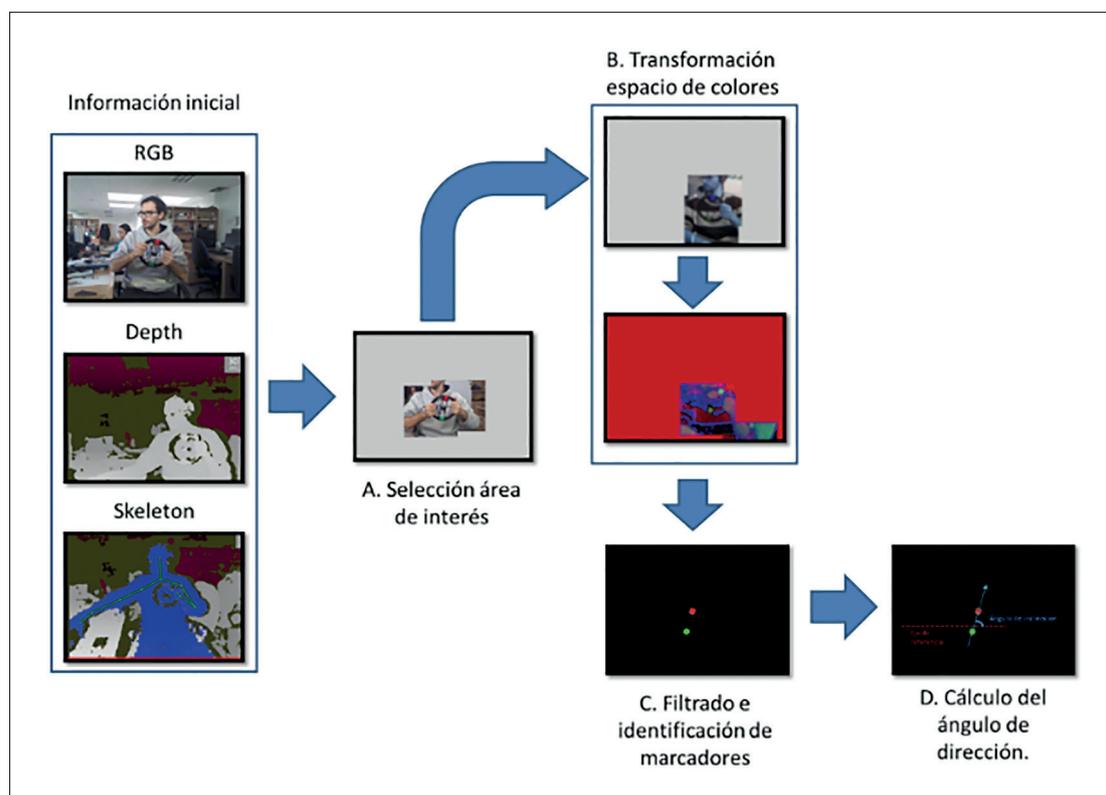


Figura 17. Proceso de cálculo de la dirección

Escenario Virtual Multimedia

El Escenario Virtual implementado consiste en un juego de conducción. El paciente adquiere el control de un coche que reacciona ante los movimientos realizados sobre el volante. De este modo, el coche está dotado de unas físicas realistas tanto en la aceleración y velocidad como en la dirección. La (Figura 19) muestra el aspecto

de este primer prototipo. En esta imagen puede observarse los elementos gráficos que servirán de feedback al usuario y que indican el valor de dirección y aceleración del coche. También pueden apreciarse algunos de los obstáculos (fijos y móviles) que el paciente deberá sortear con el cucho, cuyo número dependerá del nivel de dificultad que se haya planificado. También se visualizan mensajes que indican al paciente el comienzo de la

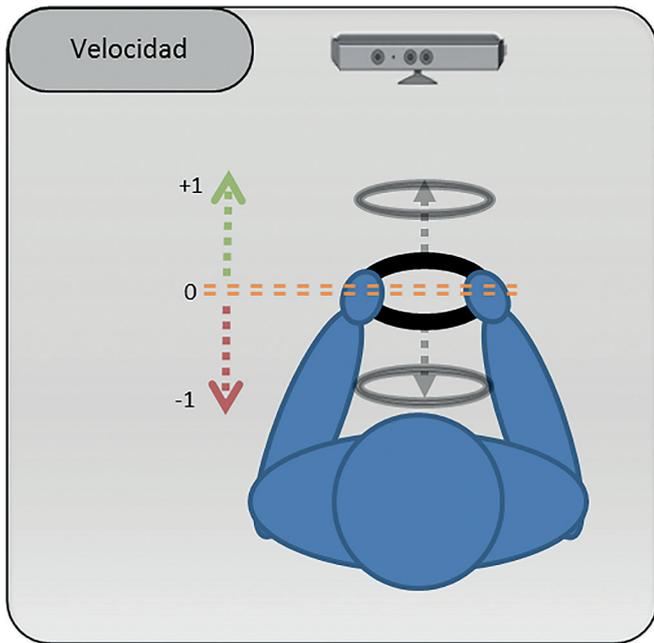


Figura 18. Esquema de control de la velocidad

prueba y algunos de los eventos que suceden a lo largo de la ejecución.

6.1.3. Primer prototipo Entorno de Rehabilitación B

El primer prototipo que se diseñó del Entorno de Rehabilitación B se adecua a las especificaciones realizadas a la hora de diseñar las actividades. En esta primera implementación se utilizó únicamente información proveniente del sensor Ms Kinect, dejándose como trabajo futuro la inclusión de un sensor textil de presión que permita agregar esta información a la ejecución de la actividad. También se utilizó únicamente la realidad virtual como referencia visual para el paciente, prescindiendo de cualquier tipo de plantilla o referencia física. Esta decisión se tomó con la intención de comprobar la viabilidad de utilizar únicamente una referencia virtual, ya que esto permitiría una mayor versatilidad y posibilidad de creación de contenidos en la actividad. Para la monitorización, como está indicado en el apartado anterior, se ha hecho uso del software 3GearSystem.

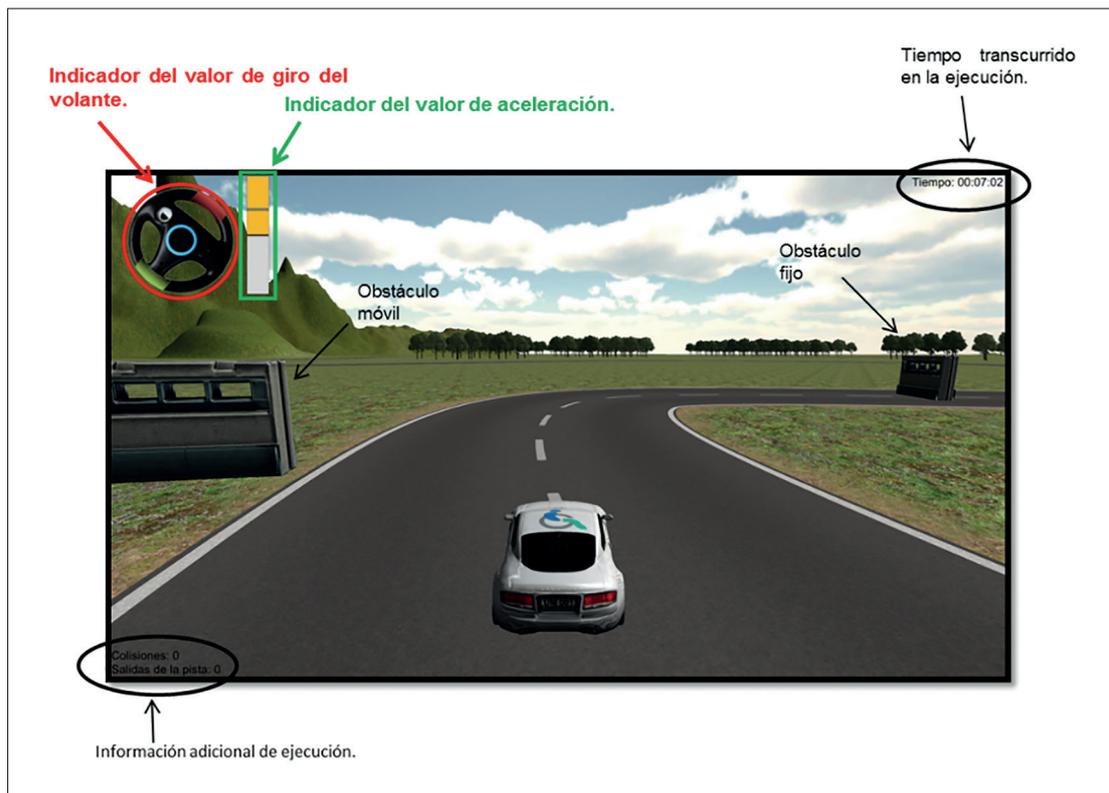


Figura 19. Prototipo Entorno Multimedia

Captura de datos y procesado

Gracias al mecanismo de monitorización se realizó el seguimiento de los dedos del paciente con el fin de averiguar si efectúa el movimiento indicado por el entorno multimedia. Además, se representó un modelo tridimensional de las manos del paciente en pantalla, ayudándole así a realizar el ejercicio. Las figuras de más adelante

muestran modelos que ejemplifican la monitorización y representación que se realizó en el entorno multimedia final, en el que, además de las manos, se representan el teclado, indicadores de progreso, etc. En el apartado de especificación de requisitos tecnológicos pueden verse detallados todos los puntos detectados en la monitorización.

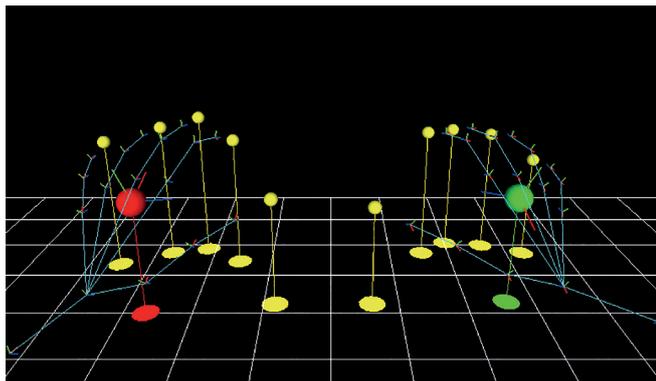


Figura 20. Esquema de monitorización de manos

Este sistema de monitorización debe ser calibrado para poder realizar el seguimiento de las manos del paciente de forma adecuada. Además, es necesario realizar una calibración del entorno de trabajo, con el fin de que los contenidos multimedia se ajusten a la superficie física donde el paciente ejecuta la actividad. En este primer prototipo, dicha calibración se realiza de forma manual.

Escenario Virtual Multimedia

El escenario virtual implementado en este primer prototipo consistió en un instrumento musical (Piano) dotado de una serie de teclas. Gracias al sistema de monitorización, el paciente puede interactuar con este instrumento moviendo sus manos y pulsando cualquiera de las teclas. El sistema es capaz de detectar el contacto virtual de cualquiera de los dedos del paciente con dichas teclas, emitiendo en ese momento el sonido correspondiente y ofreciendo un feedback visual. En la interfaz mostrada pueden verse también los indicadores de tiempo y puntuación. Una vez que da comienzo la actividad, el sistema indica al paciente mediante un mensaje de texto que pulse una tecla determinada. Además, se le indica el dedo con el que debe realizar la acción. Esta

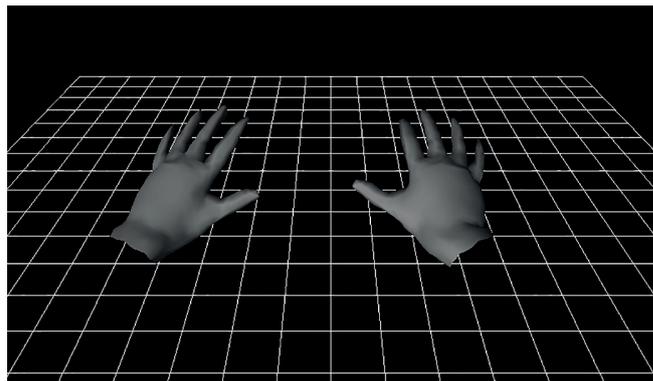


Figura 21. Modelo 3d de manos 3GearSystem

información también aparece reflejada en el indicador de las manos que se encuentra en la esquina inferior derecha.

6.1.4. Valoración de los prototipos

Una vez que se implementaron los prototipos descritos anteriormente, y se valoró su potencial como actividades de rehabilitación, se envió una demostración y se realizó una nueva reunión con terapeutas en las que se les detallaron las actividades creadas. Tras dicha reunión se identificaron algunas limitaciones que podrían presentar los prototipos para ser utilizados por pacientes y especificaron una serie de modificaciones que debían ser realizadas antes de las pruebas con pacientes. Estos cambios dieron lugar a la segunda versión de los prototipos.

6.1.5. Segundo prototipo Entorno de Rehabilitación A

A continuación describiremos las modificaciones realizadas a partir del primer prototipo.

Soporte del volante

La primera limitación que se encontró fue la dificultad que podría tener un paciente para realizar la actividad

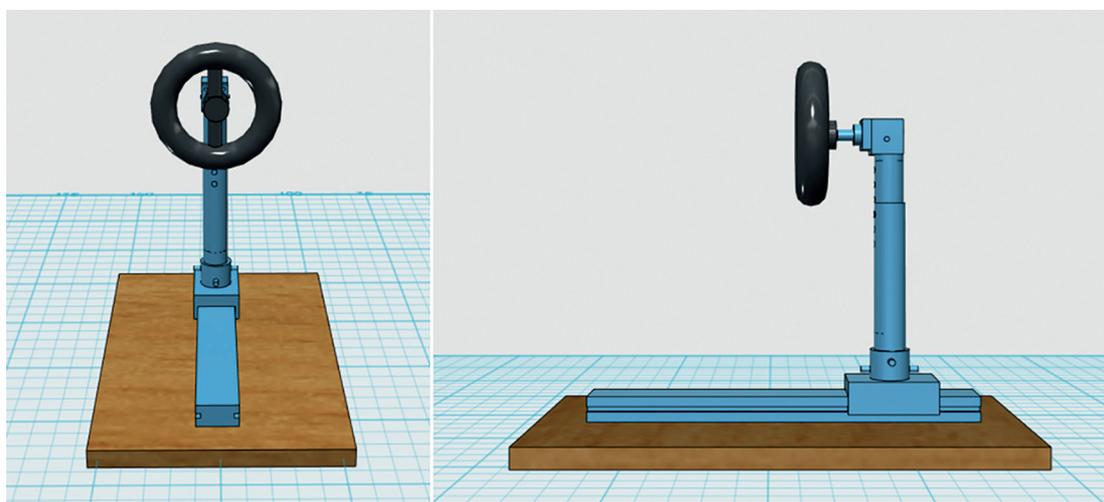


Figura 22. Diseño del soporte del volante

sosteniendo el volante en el aire. Aunque hay pacientes que podrían ser capaces de hacerlo, para la mayoría de los pacientes podría suponer un esfuerzo demasiado elevado sostener el volante con los brazos en la posición correcta durante el periodo de tiempo requerido para ejecutar la actividad. Ante este inconveniente, se decidió diseñar y fabricar un soporte con 2GdL que permita a los pacientes ejecutar la actividad de una forma cómoda.

La fabricación del soporte se realizó según el diseño anterior, permitiendo configurar la posición del volante tanto en modo vertical como horizontal, lo que permitirá realizar las actividades en las dos posiciones. La Figura 23 y la Figura 24 muestran el soporte final en las dos posiciones posibles. La altura del soporte también es configurable, pudiéndose adaptar a diferentes pacientes.

Volante con iluminación

Otro aspecto que se vio modificado respecto al primer prototipo, fue la creación de un volante específicamente diseñado para la actividad. Para la fabricación del prototipo del volante se contó con la utilización de una impresora 3D BQ Witbox [28] capaz de imprimir modelos de hasta 21x29, 7x20 cm de tamaño y 50micras de resolución. El diseño del volante fue realizado ofreciendo la posibilidad de añadir la electrónica necesaria para dar soporte a dos marcadores led, además de una superficie difusora, que sustituyan a los marcadores utilizados en el prototipo anterior. Esta modificación mejorará la precisión y la robustez del sistema de tracking. La intensidad de los led puede ser regulada manualmente mediante un controlador implementado con tecnología TinyDuino [29]. Además, se contempló que la tecnología empleada pudiera ser utilizada en el futuro para implementar un mecanismo de calibración automática estableciendo una comunicación con el concentrador de la estación de rehabilitación. La Figura 25 muestra el diseño del volante.



Figura 23. Soporte volante posición vertical



Figura 24. Soporte volante posición horizontal

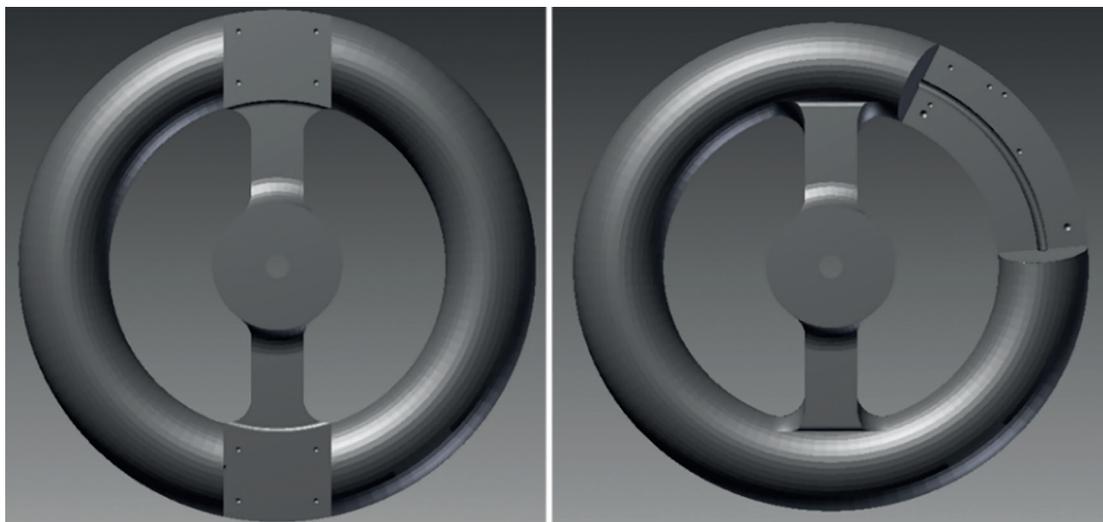


Figura 25. Diseño del volante con iluminación

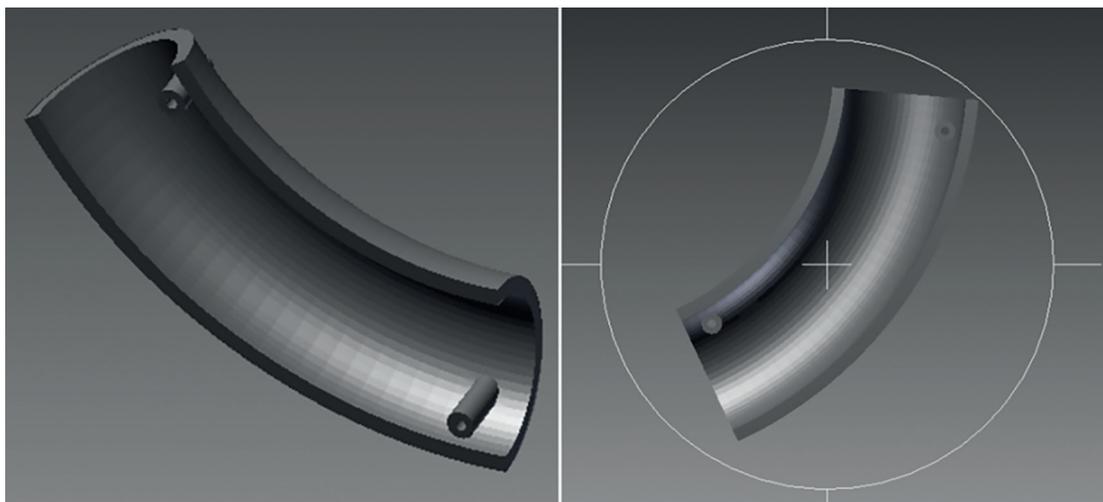


Figura 26. Diseño de la tapa que cubrirá la electrónica



Figura 27. Prototipo impreso del volante

Contenido Virtual Multimedia

Otro de los inconvenientes que se observaron en el prototipo inicial fue la física y el comportamiento del coche. Se consideró que un coche que simula un comportamiento real resulta demasiado complejo para que un paciente con afectación cognitiva pueda ejecutar la actividad. Por esta razón se decidió simplificar la actividad. En la segunda versión del prototipo, el coche reacciona de forma directa a los movimientos de giro, realizando una traslación directa del modelo sobre el plano de la carretera, en vez de realizar un giro realista. La velocidad también pasó a calcularse de forma directa a partir de la posición del volante, en vez de ejercer una aceleración sobre el vehículo. Para la realización de la prueba de concepto con este prototipo, se crearon 3 tipos de obstáculos. Los primero, obstáculos fijos que el paciente vea acercarse y deba esquivar, estos obstáculos adquieren la representación de coches. El segundo tipo, obstáculo móvil, se representa mediante animales

que cruzan la carretera a distintas velocidades. El tercer tipo de obstáculos consiste en pasos de peatones en los que el paciente debe detener el coche y esperar a que los peatones pasen. En este tipo de obstáculos, se ofrece al paciente la indicación de parar y avanzar, a través de un semáforo representado en la pantalla. Además, se permite ejecutar las actividades en dos modalidades: velocidad constante y velocidad controlada por el paciente. El modo de velocidad constante ofrece un nivel de dificultad inferior en el que el paciente sólo debe preocuparse de realizar los movimientos de desplazamiento a izquierda y derecha, con el fin de esquivar los obstáculos. La Figura 28 muestra una captura de pantalla de la nueva interfaz implementada.

6.1.6. Segundo prototipo Entorno de Rehabilitación B

En el segundo prototipo del Entorno de Rehabilitación B se mantuvo el mismo sistema de control utilizado en la primera versión de la actividad. Sin embargo, se decidió realizar cambios en los entornos virtuales implementados. Una primera limitación que se encontró consistía en el reducido tamaño de las teclas. Además, también existía una limitación para determinados pacientes, sobre los que se quería que mantuvieran las manos estáticas moviendo únicamente los dedos. Los cambios que se consideraron necesarios derivaron en la creación de 3 nuevos modos de ejecución de la actividad. El primer modo (el más básico) se limita la actividad a coordinación óculo-manual, creando un nuevo escenario con instrumentos de percusión que pueden ser tocados con toda la mano. El segundo modo definido mantiene el mismo concepto de ejecución que en el primer prototipo, pero se decide cambiar el instrumento a tocar, considerándose necesario un aumento de las teclas y de la distancia a la que se encuentran situadas. Por último, se diseñó un modo en el que las manos permanecen estáticas y únicamente se monitoriza el movimiento de los dedos.



Figura 28. Prototipo B del Escenario Virtual Coche

- **Contenido Virtual Tambores (Coordinación Óculo-Manual):** Prototipo del primer modo de funcionamiento de la actividad, en el que el paciente únicamente tiene que tocar con cualquier parte de la mano, el tambor (bidón) que se le indique. La interfaz también indica la mano con la que debe presionarse el tambor. La Figura 29 muestra la interfaz de este modo de funcionamiento.
- **Contenido Virtual Xilófono (Manos libres):** El paciente debe pulsar la tecla resaltada con el dedo indicado. Para realizar la actividad, debe desplazar la mano hasta el punto donde se encuentre dicha tecla.
- **Contenido Virtual Piano (Manos fijas):** En este modo, el movimiento de las manos del paciente no se ve reflejado en el entorno virtual, monitorizándose únicamente el movimiento realizado por los dedos. En el prototipo diseñado se utiliza un piano como instrumento de

interacción, pero se decidió que en el futuro se implemente una nueva versión con un instrumento que se adapte a la fisonomía de la mano, en la que cada tecla esté asignada a uno de los dedos.

6.2. PRUEBA DE CONCEPTO

Con el fin de tener una primera toma de contacto con los pacientes que utilizarán las actividades de rehabilitación desarrolladas, se realizó una prueba de concepto. Esta prueba permitió determinar la facilidad de uso, la facilidad de aprendizaje, las posibilidades de mejora y las limitaciones que presentan tanto los mecanismos de interacción como los contenidos virtuales diseñados e implementados. Los resultados principales de la prueba de concepto se fundamentan en el análisis de las encuestas efectuadas a los pacientes y en la recopilación

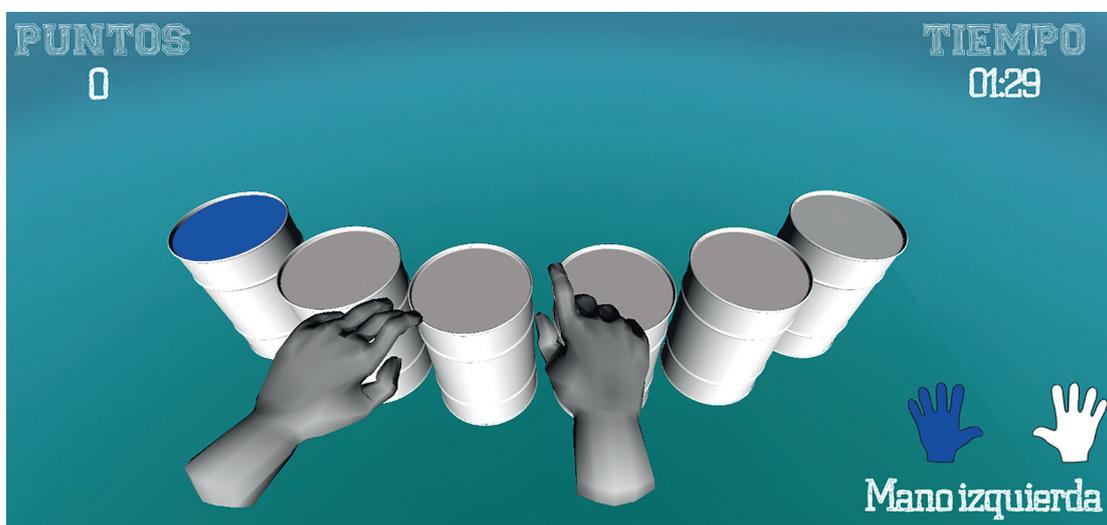


Figura 29. Contenido virtual Tambores



Figura 30. Contenido virtual Xilófono



Figura 31. Contenido virtual Piano

de las aportaciones, sugerencias y propuestas de mejora hechas por los terapeutas.

La prueba de concepto se llevó a cabo siguiendo los pasos descritos en el apartado 5.5 *Diseño de la prueba de concepto de la estación de rehabilitación*, siendo el primero de ellos la selección de pacientes. En este proceso se escogieron cuatro pacientes, los cuales cumplieran con los criterios de inclusión especificados inicialmente.

Todas estas pruebas fueron supervisadas por 5 terapeutas, quienes también aportaron sus opiniones y sugerencias acerca de las actividades.

A continuación se describen los resultados obtenidos en cada uno de los pasos del protocolo descrito en la metodología de diseño de la prueba de concepto.

6.2.1. Descripción de Pacientes

La Tabla 36 y la Tabla 37 muestran los perfiles de los pacientes seleccionados. En ellas se describen los datos demográficos y las escalas de valoración neuropsicológica de los pacientes. Las escalas se corresponden directamente con los criterios de inclusión y exclusión descritos anteriormente en el apartado 5.2.

6.2.2. Resultados de las ejecuciones de los Pacientes

Los pacientes 1 y 2 no mostraron una gran dificultad a la hora de interactuar con los entornos virtuales y pudieron ejecutar las actividades. Sin embargo, los pacientes 3 y 4, con graves problemas de orientación, tuvieron serias dificultades al ejecutar las actividades, especialmente en el caso de la actividad del Entorno Virtual 2: Disociación

Tabla 37. Datos demográficos de los pacientes

Paciente	Edad (años)	Género	Diagnóstico	Afectación-motora	Tiempo desde la lesión (días)
1	27	Masculino	TCE	Tetraparesia predominio derecho.	89
2	29	Masculino	TCE	Tetraparesia predominio izquierdo.	239
3	54	Masculino	TCE	Tetraparesia predominio izquierdo.	119
4	44	Femenino	TCE	Tetraparesia predominio derecho.	204

Tabla 38. Escalas de valoración neuropsicológica de los pacientes. NV (no valorable)

Valoración Neuropsicológica		Pacientes			
		1	2	3	4
CPT	Tiempo de reacción	65,48	55,5	NV	---
	Error de omisión	46,88	49,50	NV	---
	Error de comisión	31,60	39,32	NV	---
LCFS	Primera valoración	4 (09/04/14)	3 (27/11/13)	3 (21/03/2014)	---
	segunda valoración	8 (11/06/14)	8 (21/03/14)	---	---

de Dedos. A estos pacientes les resultó extremadamente complejo relacionarse con un entorno virtual sin la ayuda de una referencia visual directa en la superficie de trabajo. También les costó relacionar sus movimientos con los realizados por los modelos en la RV.

En cuanto al Entorno Virtual 1: Coordinación (Figura 32), los pacientes se relacionaron mejor con el sistema de control gracias a disponer de un dispositivo físico

relacionado con el entorno virtual, lo que les facilita una referencia háptica. Sin embargo, se observó dificultad de los pacientes a la hora de ejecutar las actividades cuando la velocidad de desplazamiento del vehículo fue demasiado elevada o aparecían demasiados obstáculos en la pantalla. En estos casos los pacientes necesitaron constantes indicaciones para rectificar la ejecución. Además, se observó una dificultad específica en la ejecución de la tarea del paciente 4, cuya lesión fue producida por un accidente de tráfico.

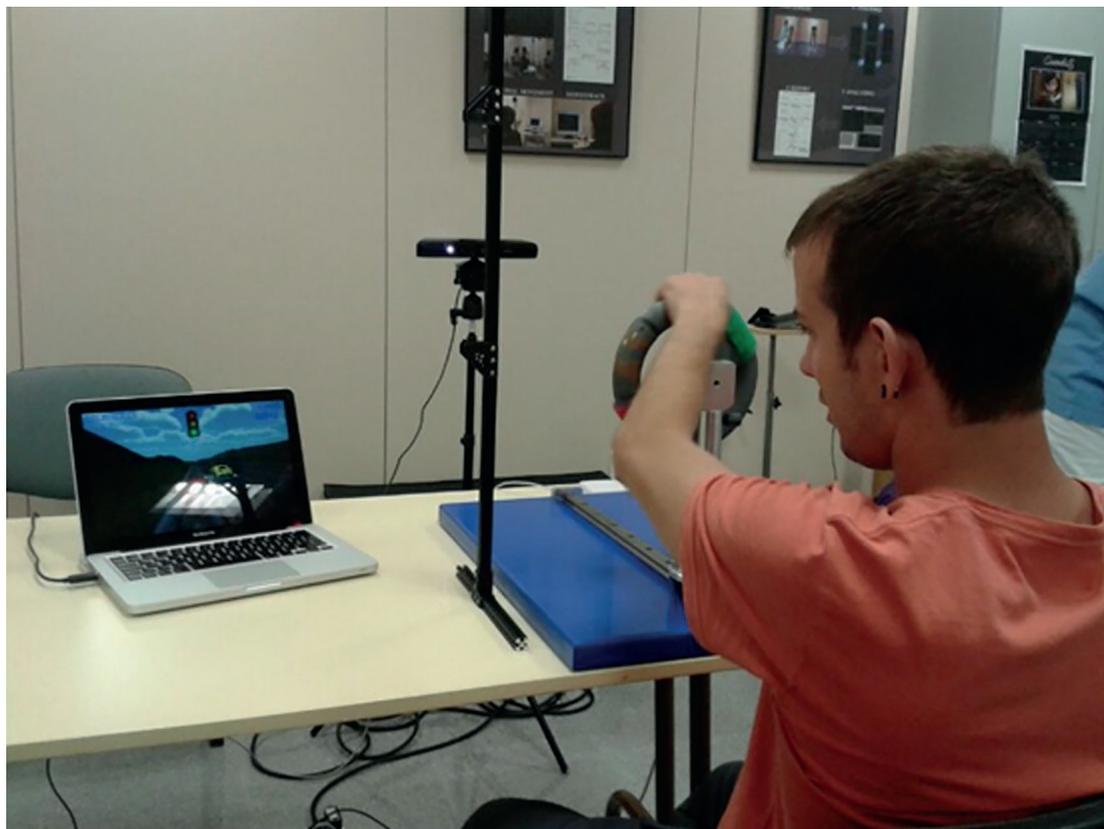


Figura 32. Ejecución de la actividad de coordinación durante la prueba de concepto

A continuación mostramos las respuestas que ofrecieron los pacientes a las distintas preguntas. Las preguntas de selección múltiple (de la 1 a la 8) presentan como respuesta un valor numérico que indica el grado en el que el paciente está de acuerdo con el resultado (siendo el menor grado de aceptación 1 --en nada de acuerdo-- y el mayor 5 --totalmente de acuerdo--).

Tabla 39. Respuestas de la pregunta 1

Pregunta 1: ¿Te parece divertido usar este juego?				
Paciente	Tambor	Xilófono	Piano	coche
1	4	5	5	5
2	3	5	5	4
3	5	5	No lo hizo	5
4	5	5	No lo hizo	5

Tabla 40. Respuestas de la pregunta 2

Pregunta 2: ¿Te parece aburrido usar los juegos?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	2	1	1	1

Tabla 41. Respuestas de la pregunta 3

Pregunta 3: ¿Me gustaría usar estos juegos en las terapias de rehabilitación?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	5	5	5	5

Tabla 42. Respuestas de la pregunta 4

Pregunta 4: ¿Me gustaría realizar actividades virtuales interactivas parecidas a estas, en mi rehabilitación?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	4	3	5	5

Tabla 43. Respuestas de la pregunta 5

Pregunta 5: ¿Me he sentido cómodo y seguro usando estos juegos?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	5	5	5	5

Tabla 44. Respuestas de la pregunta 6

Pregunta 6: ¿Fue difícil entender las indicaciones para ejecutar los juegos?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	1	1	1	1

Tabla 45. Respuestas de la pregunta 7

Pregunta 7: ¿Fue fácil entender cómo usar el volante en el juego del coche?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	5	5	5	5

Tabla 46. Respuestas de la pregunta 8

Pregunta 8: ¿Fue fácil entender cómo usar el tambor, el xilófono o el teclado del juego?				
Paciente	1	2	3	4
Respuesta	5	4	5	5

A continuación se comentan las respuestas de las preguntas abiertas 9 a 12.

Tabla 47. Respuestas de la pregunta 9

Pregunta 9: ¿Qué fue lo que más me gusto de estos juegos?	
Paciente	Respuesta
1	El coche
2	Piano y coche
3	Los juegos con música como el xilófono y el tambor
4	Los juegos con música como el xilófono

Tabla 48. Respuestas de la pregunta 10

Pregunta 10: ¿Qué no me gustó de los juegos?	
Paciente	Respuesta
1	El volante es muy pequeño y aumentar el rango de la regulación altura (el paciente era de baja estatura y el volante le quedaba muy alto) No detecta bien las manos en la actividad del tambor
2	El tambor estaba muy lejos y le costaba darle.
3	Todo le ha gustado
4	Todo le ha gustado

Tabla 49. Respuestas de la pregunta 11

Pregunta 11: ¿Debería ser más fácil usar estos juegos? ¿Qué cambios haría para conseguirlo?	
Paciente	Respuesta
1	Todas son fáciles. El más fácil fue el juego del xilófono Mejoras: En el juego de piano, xilófono y tambores: poder apoyar los brazos. Calibrar mejor el nivel En el juego del coche: volante más grande lo que le permitiría ser más real y más cómodo.
2	Todos los juegos son fáciles
3	No deben ser más fáciles
4	Sí, deberían ser más fáciles los juegos.

Tabla 50. Respuestas de la pregunta 12

Pregunta 12: ¿Cómo mejoraría los juegos?	
Paciente	Respuesta
1	Ninguna mejora.
2	Haría más visible algunos de los obstáculos en el juego del coche. Disminuiría la velocidad del coche.
3	Más tiempo de práctica o familiarización con el juego para adaptarse mejor. Debería haber un indicador de la proximidad de coches, de manera que cuando se aproxime otro coche aparezca una flecha que indique que próximamente aparecerá un coche. Tal como está ahora parece como si el coche se va encima.
4	No responde

La Tabla 51 muestra las medias de las respuestas de las 8 preguntas de selección múltiple agrupadas según 5 apartados temáticos:

- Diversión (preguntas 1 y 2)
- Interés y Motivación (preguntas 3 y 4)
- Sensación de Seguridad (pregunta 5)
- Comprensión de los indicadores (pregunta 6)
- Facilidad de uso (pregunta 7 y 8)

Tabla 51. Respuestas de los pacientes a la encuesta

	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3	Paciente 4
Diversión	4,37	4,62	5	5
Interés y motivación	4,5	4	5	5
Sensación de seguridad	5	5	5	5
Comprensión de los indicadores	5	5	5	5
Facilidad de uso	5	4,5	5	5

Con estos resultados se puede observar que todos los pacientes han tenido sensación de seguridad y han podido comprender las indicaciones de ejecución de cada una de los juegos. En los resultados de los temas facilidad de uso, interés y motivación y diversión, aunque no todos los pacientes han dado la máxima puntuación, se mantienen resultados con valores altos, lo que indica que la mayoría de los pacientes están de acuerdo con que es fácil usar los juegos, que son divertidos y además les motiva a usarlos durante las terapias de rehabilitación.

6.2.3. Resultados de la encuesta de los Terapeutas

Las actividades también fueron evaluadas por 5 terapeutas que no participaron en el proceso de definición de las actividades. Estos terapeutas realizaron una serie de observaciones y aportaciones que permitirán mejorar las actividades de rehabilitación en la siguiente iteración de desarrollo. Algunos de los comentarios referentes al entorno virtual de coordinación fueron la necesidad de aumentar el tamaño del volante, crear un dispositivo que permita realizar agarres para mejorar la ejercitación de la coordinación bimanual o ampliar las capacidades de configuración de la actividad para ampliar el espectro de posibles pacientes. En cuanto al entorno virtual de disociación de dedos, existieron varios comentarios referentes a la gran dificultad que supone para los pacientes interactuar con la RV sin disponer de una referencia visual y física sobre la superficie de trabajo.

7. DISCUSIÓN

Esta investigación ha tenido por objetivo mostrar la potencialidad de los entornos virtuales interactivos basados en tecnologías de monitorización para la creación de tareas de neurorrehabilitación funcional de extremidad superior.

La evidencia de que el uso de videojuegos comerciales (Nintendo Wii, EyeToy PlayStation y Cy Wee Z) en la rehabilitación mejora la funcionalidad de la extremidad superior en pacientes con DCA es muy limitada [30]. Una de las hipótesis principales del trabajo de investigación realizado es la necesidad de modificar y adaptar estas tecnologías al entorno real para su explotación clínica. En este sentido, en este proyecto se ha realizado un gran esfuerzo para: 1) el desarrollo de dispositivos de interacción específicos; 2) la adaptación del nivel de sensibilidad de los mismos; y 3) el diseño de nuevos contenidos virtuales específicos. De esta forma se pretende trasladar a elementos de valor clínico las potencialidades que ofrecen dichas tecnologías.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la prueba de concepto se ha podido concluir que las actividades diseñadas atraen el interés de los pacientes y pueden servir para mejorar su nivel de motivación. Sin embargo, diseñar sistemas virtuales de rehabilitación que aprovechen todo el potencial de las nuevas tecnologías de bajo coste, minimizando sus limitaciones, es un reto que requiere un especial esfuerzo en el ajuste de dichas tecnologías a las necesidades específicas de los pacientes. En este sentido, se han detectado varias modificaciones que deben ser implementadas sobre el prototipo actual con el fin de permitir el uso clínico de los entornos virtuales.

La primera de las necesidades que deben ser cubiertas es la creación de nuevos mecanismos de asistencia, que guíen de forma más eficiente a los pacientes, permitiéndoles llevar a cabo la ejecución de la actividad de forma autónoma. Estos mecanismos de guiado deben indicar al paciente, paso a paso, cada movimiento necesario para conseguir los objetivos de la actividad.

El análisis de la experiencia de uso del entorno virtual de coordinación también ha permitido: 1) modificar el dispositivo de interacción del paciente para mejorar la actividad de coordinación bimanual, mediante el rediseño del volante añadiendo agarres (Figura 33 y Figura 34); y 2) cambiar el contenido del escenario virtual para que el objeto móvil no sea un vehículo, mejorando la aceptación y usabilidad de un mayor número de pacientes con TCE.

En relación con el entorno virtual de disociación de dedos, la experiencia con pacientes ha resaltado la dificultad que estos presentan a la hora de interactuar con la RV sin disponer de una referencia visual y física sobre la superficie de trabajo. Por esta razón se considera necesario incluir un dispositivo de interacción físico, que

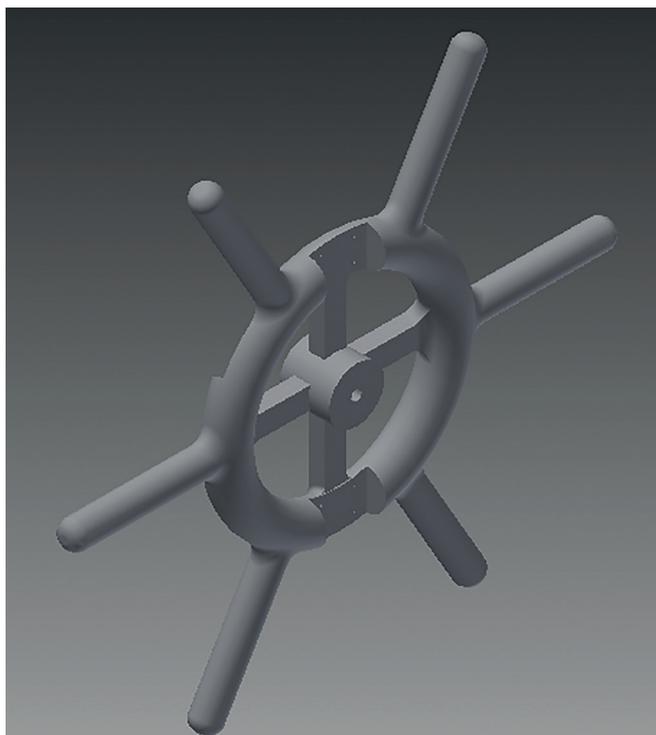


Figura 33. Diseño del volante timón (A)

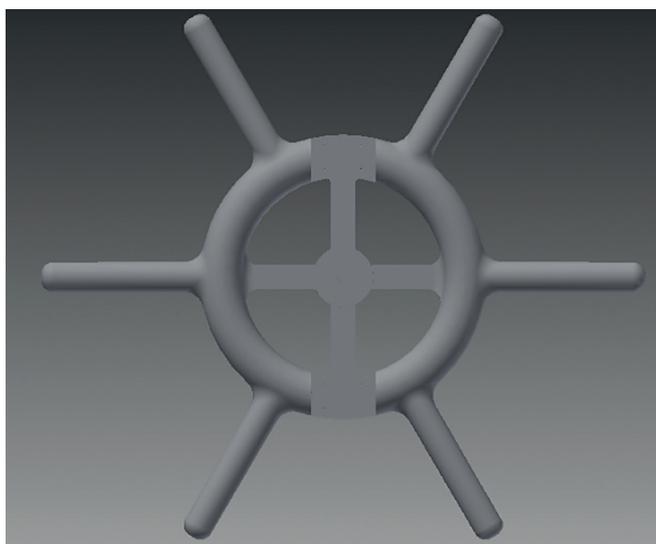


Figura 34. Diseño del volante timón (B)

facilite al paciente el posicionamiento de la mano y los dedos. En el futuro se valorará ofrecer realimentación háptica (táctil y fuerza), así como un sensor de presión que permita medir la fuerza ejercida. Por último, se ha identificado la necesidad de incorporar nuevas modalidades de ejecución que permitan explotar más posibilidades de interacción con instrumentos musicales virtuales, como puede ser la creación de actividades basadas en ritmos.

Como conclusión final, este trabajo ha mostrado la utilización de nuevas tecnologías de rehabilitación funcional

basadas en entornos virtuales interactivos capaces de monitorizar y personalizar las terapias de neurorrehabilitación. Así mismo, se ha podido incrementar el nivel de interacción con orientación terapéutica durante las actividades de rehabilitación, lo que ayudará a una mejor recuperación de los pacientes que han sufrido un TCE.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. The Lancet Neurology. Traumatic brain injury: time to end the silence. *The Lancet Neurology* 2010; 9(4): 331.
2. Alvaro LC, Lopez-Arbolea P, Cozar R. Hospitalizations for acute cerebrovascular accidents and transient ischemic attacks in Spain: temporal stability and spatial heterogeneity, 1998-2003. *Revi. Calid. Asist.* 2009; 24(1):16-23.
3. Laxe S, Tschiesner U, Zasler N, López-Blazquez R, Tormos JM, Bernabeu M. What domains of the International Classification of Functioning, Disability and Health are covered by the most commonly used measurement instruments in traumatic brain injury research?. *Clin Neurol Neurosurg* 2012; 114(6):645-50.
4. Laxe S, Zasler N, Tschiesner U, López-Blazquez R, Tormos JM, Bernabeu M. ICF use to identify common problems on a TBI neurorehabilitation unit in Spain. *NeuroRehabilitation* 2011; 29(1):99-110.
5. Pérez R, Marcano A, Costa U, Solana J, Cáceres C, Opisso E, et al. Inverse kinematics of a 6 DoF human upper limb using ANFIS and ANN for anticipatory actuation in ADL-based physical Neurorehabilitation. *Expert Syst. Appl* 2012; 39(10):9612-22.
6. Zabaleta H, Bureau M, Olaiz E, Medina J, Perez, M. Exoskeleton design for functional rehabilitation in patients with neurological disorders and stroke. *Rehabilitation Robotics, IEEE 10th International Conference* 2007; 112-18.
7. Pietrzak E, Pullman S, McGuire A. Using Virtual Reality and Videogames for Traumatic Brain Injury Rehabilitation: A Structured Literature Review. *Games for Health Journal* 2014; 3(4): 202-14.
8. Villán-Villán MA, Pérez-Rodríguez R, Gómez C, Opisso E, Tormos JM, Medina J, et al. Dysfunctional Profile for Patients in Physical Neurorehabilitation of Upper Limb. *Actas XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing MEDICOM, Sevilla, España, Septiembre* 2013. P. 1775-78.
9. Pérez R, Costa Ú, Torrent M, Solana J, Opisso E, Cáceres C, et al. Upper Limb Portable Motion Analysis System Based on Inertial Technology for Neurorehabilitation Purposes. *Sensors* 2010; 10(12):10733-51.
10. De Mauro A. Virtual Reality Based Rehabilitation and Game Technology. *Proceedings of the 1st International Workshop on Engineering Interactive Computing Systems for Medicine and Health Care* 2011; 48-52.
11. Chang YJ, Chen SF, Huang JD. A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities. *Res Dev Disabil* 2011; 32:2566-70.
12. Lange B, Chang CY, Suma E, Newman B, Rizzo A, Bolas M. Development and evaluation of low cost game-based balance rehabilitation tool using the microsoft kinect sensor. *Actas Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society EMBC. Boston, Massachusetts USA, Septiembre* 2011. p.1831-34.
13. Dahl-Popolizio S, Loman J, Cordes C. Comparing Outcomes of Kinect Videogame-Based Occupational/Physical Therapy Versus Usual Care. *Games for Health* 2014; (3)157-61.
14. Subramanian SK, Lourenco CB, Chilingaryan G, Sveistrup H, Levin MF. Arm motor recovery using a virtual reality intervention in chronic stroke: randomized controlled trial. *Neurorehabil Neural Repair* 2013; 27 (1):13-23.
15. Levin MF, Snir O, Liebermann D, Weingarden H, Weiss P. Virtual reality versus conventional treatment of reaching ability in chronic stroke: clinical feasibility study. *Neurol Ther* 2012; 1(3):1-15.
16. Crosbie JH, Lennon S, McGoldrick MC, McNeill MDJ, McDonough SM. Virtual reality in the rehabilitation of the arm after hemiplegic stroke: a randomized controlled pilot study. *ClinRehabil* 2012; 26 (9):798-806.
17. Jacobson I, Booch G, Rumbaugh J. *The unified software development process*. Reading: Addison-Wesley 1999.
18. Vredenburg K, Isensee S, Righi C. *User-Centered Design: An Integrated Approach*. Prentice Hall 2001.
19. Caballero-Hernández R, Gómez-Perez C, Cáceres-Taladriz C, García-Rudolph A, Vidal-Samsó J, Bernabeu-Guitart M, et al. Modelado de Procesos de Neuror rehabilitación. *Actas del xxix Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica (CASEIB 2011)*. Cáceres, España, Noviembre 2011. P. 125-8.
20. Gómez-Pérez, C; Caballero-Hernández, R; Medina-Casanovas, J; Roig-Rovira, T; Vidal-Samsó, J; Bernabeu-Guitart, M; et al. Identificación de Oportunidades de Mejora en Procesos de Neuror rehabilitación. *Actas del xxx Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica (CASEIB 2012)*. 2012.

21. Página web de opencv: <http://opencv.org/> (último acceso: noviembre de 2013).
22. Página web de 3GearSystem: <http://www.threegear.com/> (último acceso: octubre de 2013).
23. Página web de Unity3D: <http://unity3d.com> (último acceso: diciembre de 2013).
24. Página web de 3ds Max: <http://www.autodesk.es/products/3ds-max/overview> (último acceso: mayo de 2014).
25. Lewis JR, Sauro J. The Factor Structure of the System Usability Scale. Actas: 1st International Conference on Human Centered Design held at the 13th International Conference on Human Computer Interaction 2009, 5619(94-103).
26. Moreno-Ger P, Torrente J, Hsieh YG, Lester WT. Usability Testing for Serious Games: Making Informed Design Decisions with User Data. Advances in Human-Computer Interaction - Special issue on User Assessment in Serious Games and Technology-Enhanced Learning, 2012.
27. Shin J, Ryu H, Jang SH. A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: a usability test and two clinical experiments. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2014; 11:32.
28. Página web de 3d BQ Witbox: <http://www.bqreaders.com/productos/witbox.html> (último acceso: junio de 2014).
29. Página web de TinyDuino: <https://tiny-circuits.com/index.php/tiny-duino.html> (último acceso: marzo de 2014).
30. Shin J, Ryu H, Jang SH. A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: a usability test and two clinical experiments. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2014; 11:32.

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A: CUESTIONARIO DE USABILIDAD PACIENTES

CUESTIONARIO DE ACEPTACIÓN – PACIENTES

PACIENTE N° _____

Datos demográficos de pacientes

Edad: _____

Género: _____

Patología: _____

Lado de la lesión: _____

Tiempo desde la lesión: _____

Fugl-Meyer: _____

Chedoke McMaster Scale: _____

Valoración neuropsicológica CPT: _____

Valoración neuropsicológica LCFS: _____

1. ¿Te parece divertido usar este juego?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

2. ¿Te parece aburrido usar este juego?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

3. ¿Me gustaría usar estos juegos en las terapias de rehabilitación?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

4. ¿Me gustaría realizar actividades virtuales interactivas parecidas a estas, en mi rehabilitación?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo
- 6.

5. ¿Me he sentido cómodo y seguro usando estos juegos?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

5b. En el caso de no sentirse cómodo o seguro indicar el motivo...**6. ¿Fue difícil entender las indicaciones para usar los juegos?**

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

7. ¿Fue fácil entender cómo usar el volante del juego?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

8. ¿Fue fácil entender cómo usar el tambor, el xilófono o el teclado del juego?

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Indiferente
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

9. ¿Qué fue lo que más me gustó de estos juegos?**10. ¿Qué no me gustó de los juegos?****11. ¿Debería ser más fácil usar estos juegos? ¿Qué cambios haría para conseguirlo?****12. ¿Cómo mejoraría los juegos?**