



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

# **Rehabilitación motora con instrumentos musicales en entorno virtual**

Autora:

**Dña. Sofía Mulero Palencia**

Tutor:

**Dr. D. Mario Martínez Zarzuela**

Valladolid, Julio de 2017



---

**TÍTULO:** **Rehabilitación motora con instrumentos musicales en entorno virtual**

**AUTORA:** **Dña. Sofía Mulero Palencia**

**TUTOR:** **Dr. D. Mario Martínez Zarzuela**

**DEPARTAMENTO:** **Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática**

---

**TRIBUNAL**

---

**PRESIDENTE:** **Dr. D. Francisco J. Díaz Pernas**

**VOCAL:** **Dr. D. Mario Martínez Zarzuela**

**SECRETARIO:** **Dr. D. Míriam Antón Rodríguez**

**SUPLENTE 1:** **Dr. D. David González Ortega**

**SUPLENTE 2:** **Dr. D. Carlos Gómez Peña**

---

---

**FECHA:**

**CALIFICACIÓN:**

---



## **Resumen**

Las enfermedades cerebrovasculares representan una de las principales causas de muerte e invalidez en personas adultas. Por ello, es tan importante el diagnóstico y la aplicación de programas rehabilitación de forma temprana: el momento de inicio del tratamiento resulta determinante para alcanzar una mayor recuperación funcional.

En primer lugar se realiza una revisión del conocimiento sobre las terapias para la neurorehabilitación. Dado que los métodos clásicos presentan sus limitaciones, en los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas para conseguir protocolos de mayor efectividad. Fruto de esta investigación, aparece una nueva línea en la que se trata de explotar los beneficios derivados de la práctica musical para conseguir terapias de mayor utilidad. Se realiza un recorrido por dichos estudios, y finalmente se centra la atención en la rehabilitación con sistemas de Realidad Virtual, punto en el que convergen los juegos desarrollados para apoyo a la rehabilitación.

A continuación se presenta el diseño y desarrollo de dos videojuegos musicales, con los que se interactúa a través de uno de los dispositivos analizados antes, Leap Motion, destinados a personas que han sufrido un accidente cerebrovascular. Finalmente se discuten las principales conclusiones extraídas de todo el proceso y se plantean nuevas líneas futuras.

## **Palabras clave**

Rehabilitación, Accidente Cerebrovascular, Realidad Virtual, práctica musical, Juego Serio, Leap Motion, Unity.



## **Abstract**

Cerebrovascular diseases represent one of the leading causes of death and disability in adults. Therefore, diagnosis and application of early rehabilitation programs is so important: starting the treatment in the right moment is decisive in order to achieve a greater functional recovery.

First, a state of the art is done over therapies for neurorehabilitation. Since classical methods show limitations, in recent years new techniques have been developed to achieve more effective protocols. Due to this research, a new line based on exploiting the benefits derived from the musical practice comes up, with the aim of obtaining therapies of the greater utility. A research study is carried out, and finally the attention is focused on rehabilitation with Virtual Reality systems, which is the point where the games developed to support rehabilitation, converge.

Then, the process of designing and developing of two musical video games is explained. One of the devices analyzed before, Leap Motion, is used for interacting with the games, which are intended for people who have suffered a stroke. Finally, the main conclusions drawn from the whole process are discussed and new future investigation lines are proposed.

## **Keywords**

Rehabilitation, Stroke, Virtual Reality, musical practice, Serious Videogame, Leap Motion, Unity.





# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 MOTIVACIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE GRADO</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>LA ENFERMEDAD CEREBROVASCULAR</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>2.1 TERAPIAS PARA LA NEUROREHABILITACIÓN</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>TERAPIAS BASADAS EN LA MÚSICA</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>3.1 APORTACIÓN PROPIA DE LA MÚSICA</b>	<b>11</b>
<b>3.2 LA MÚSICA EN LA NEURO-EDUCACIÓN</b>	<b>13</b>
<b>3.3 PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE PROTOCOLOS DE REHABILITACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>3.4 MUSIC SUPPORTED TRAINING (MST)</b>	<b>15</b>
<b>3.5 RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS</b>	<b>16</b>
3.5.1 Estudio de Schneider (2007)	18
3.5.2 Resultados de Altenmüller (2009)	19
3.5.3 Aportaciones de Schneider (2010)	20
3.5.4 Plasticidad en el córtex sensoriomotor inducida por MST	21
3.5.5 Estudio de Van Vugt (2014)	24
3.5.6 Aportaciones de Villeneuve (2014)	25
3.5.7 Otras terapias con música	27
3.5.8 Una perspectiva global	28
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>REHABILITACIÓN CON REALIDAD VIRTUAL</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>4.1 DISPOSITIVOS HÁPTICOS</b>	<b>32</b>
4.1.1 Realidad Virtual con música	34
<b>4.2 DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DE GESTOS</b>	<b>37</b>
4.2.1 Comparación de dispositivos comerciales	37
4.2.2 Implementaciones: Kinect y gafas de visión estereoscópica	39
<b>4.3 EL CONTROLADOR LEAP MOTION</b>	<b>42</b>
4.3.1 Características	42
4.3.2 Funcionamiento	43

4.3.3	Ejemplos de aplicación de Leap Motion	44
<b>CAPÍTULO 5</b>		
<b>REHABILITACIÓN MOTORA CON LEAP MOTION</b>		<b>49</b>
<hr/>		
<b>5.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>EJERCICIO MOTOR PARA LA REHABILITACIÓN</b>	<b>49</b>
5.2.1	Instrumentos de medida	50
<b>5.3</b>	<b>ELEMENTOS COMUNES DE LOS JUEGOS</b>	<b>51</b>
5.3.1	Sistema completo	51
5.3.2	Principios comunes	52
<b>5.4</b>	<b>MÓDULO MÚSICA</b>	<b>53</b>
5.4.1	Movimientos a trabajar	53
5.4.2	Elección del instrumento musical	53
5.4.3	Elección de las piezas a interpretar	54
5.4.4	Funcionamiento	55
5.4.5	Parámetros	55
5.4.6	Pantallas y desarrollo del juego	57
<b>5.5</b>	<b>MÓDULO PERCUSIÓN</b>	<b>61</b>
5.5.1	Movimientos a trabajar	61
5.5.2	Elección del instrumento musical	62
5.5.3	Elección de las piezas a interpretar	63
5.5.4	Funcionamiento	63
5.5.5	Parámetros	64
5.5.6	Pantallas y desarrollo del juego	65
<b>5.6</b>	<b>ESTIMACIÓN PRESUPUESTARIA</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>		
<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b>		<b>71</b>
<hr/>		
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>71</b>
<b>6.2</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>73</b>
<hr/>		

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

### **LA ENFERMEDAD CEREBROVASCULAR** ;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

- Figura 2-1. (A)** Sistema IREX; **(B)** sistema de rehabilitación Rutgers Ankle; **(C)** sistema de rehabilitación Rutgers Master II-ND; **(D)** Guante CyberGlove..... 9

## CAPÍTULO 3

### **TERAPIAS BASADAS EN LA MÚSICA** ;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

- Figura 3-1.** Set de percusión de 8 platos, 4 para cada brazo, organizados en un semicírculo para facilitar el alcance del paciente [28]. .....16
- Figura 3-2. (A)** Sistema para el entrenamiento supervisado; **(B)** pantalla con la interfaz de Synthesia; **(C)** piano enrollable para el uso en el hogar [36].....27

## CAPÍTULO 4

### **REHABILITACIÓN CON REALIDAD VIRTUAL** ;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

- Figura 4-1.** Piano virtual simulado presentado por Adamovich: **(A)** combinación de CyberGrasp con el guante CyberGlove; **(B)** aspecto visual del software; **(C)** perspectiva virtual en primera persona [43]. .....35
- Figura 4-2. (A)** Guante de datos MusicGlove [44]; **(B)** sistema Mobile Music Touch [45]. .....36
- Figura 4-3.** Oculus Rift DK2, utilizado en el estudio de Baldominos. ....41
- Figura 4-4. (A)** Área de interacción del sensor Leap Motion; **(B)** sistema de ejes sobre el controlador; **(C)** esfera virtual generada por la curvatura de la mano. ....43
- Figura 4-5.** Puntos de referencia en la mano y renderizado en 3D. ....44

## CAPÍTULO 5

### **REHABILITACIÓN MOTORA CON LEAP MOTION** 49

- Figura 5-1.** Articulaciones de los dedos de la mano: **a)** metacarpofalángica; **b)** interfalángica proximal, y **c)** interfalángica distal [58]. .....50
- Figura 5-2. (A)** Goniómetro universal para grandes articulaciones con un transportador de 360°; **(B)** ejemplo de uso: se sostiene la parte fija mientras la parte móvil se desplaza sobre su eje [58]. .....51
- Figura 5-3.** Flexión del dedo pulgar a partir de la posición 0 [58]. .....53
- Figura 5-4.** Pantalla inicial del Módulo Música. ....57
- Figura 5-5.** Marcadores de mano y dedos en el Módulo Música. ....57
- Figura 5-6.** Calibración de los dedos de la mano. ....58
- Figura 5-7.** Instrucciones del juego contenido en el Módulo Música. ....58
- Figura 5-8.** Código de colores empleado en el teclado. ....59
- Figura 5-9.** Pantallas finales donde aparece el título de la canción y la puntuación alcanzada. ....60
- Figura 5-10.** Pantallas de pausa y error. ....61
- Figura 5-11.** Flexión-extensión de muñeca partiendo desde la posición 0 [58]. .....62
- Figura 5-12.** Pantalla inicial del Módulo Percusión. ....65
- Figura 5-13.** Calibración de los movimientos de muñeca. ....65

<b>Figura 5-14.</b> Instrucciones del Módulo Percusión.....	66
<b>Figura 5-15.</b> Elementos visuales del Módulo Percusión: <b>(A)</b> baqueta empleada como marcador de manos; <b>(B)</b> icono que simboliza que se trata de una fase de escucha; <b>(C)</b> aspecto de un timbal en el instante en que es golpeado.....	66
<b>Figura 5-16.</b> Muestra de desarrollo del juego: arriba, en la fase de escucha, los timbales incluidos en la secuencia se somborean en amarillo. Abajo, durante la ejecución los timbales a golpear se visualizan en azul. ....	67
<b>Figura 5-17.</b> Muestra del código de colores empleado en los timbales.....	68
<b>Figura 5-18.</b> Pantalla final del módulo, donde se informa sobre la puntuación alcanzada.....	68
<b>Figura 5-19.</b> Pantallas de pausa y error. ....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

### **CAPÍTULO 3**

#### **TERAPIAS BASADAS EN LA MÚSICA** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

---

<b>TABLA 3-1.</b> COMPARATIVA RESUMEN DE DIFERENTES ESTUDIOS BASADOS EN MST.....	17
--	----

### **CAPÍTULO 4**

#### **REHABILITACIÓN CON REALIDAD VIRTUAL** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

---

<b>TABLA 4-1.</b> CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE DIFERENTES DISPOSITIVOS COMERCIALES EMPLEADOS PARA LA DETECCIÓN DE GESTOS.....	38
--	----

### **CAPÍTULO 5**

#### **REHABILITACIÓN MOTORA CON LEAP MOTION** 49

---

<b>TABLA 5-1.</b> MELODÍAS INTRODUCIDAS EN LA ESCENA MÚSICA.....	54
<b>TABLA 5-2.</b> CÓDIGO DE COLORES EN EL MÓDULO MÚSICA.....	55
<b>TABLA 5-3.</b> PARÁMETROS CONFIGURABLES EN EL MÓDULO MÚSICA .....	56
<b>TABLA 5-4.</b> PARÁMETROS DE SALIDA EN EL MÓDULO MÚSICA.....	56
<b>TABLA 5-5.</b> CÓDIGO DE COLORES EN EL MÓDULO PERCUSIÓN.....	63
<b>TABLA 5-6.</b> PARÁMETROS CONFIGURABLES EN EL MÓDULO PERCUSIÓN.....	64
<b>TABLA 5-7.</b> PARÁMETROS CONFIGURABLES EN EL MÓDULO PERCUSIÓN.....	64



El trabajo recogido en este documento continúa la línea de investigación que desarrolla el Grupo de Telemática e Imagen de la Universidad de Valladolid, para la rehabilitación de discapacidades motoras y cognitivas. El sistema TELEKIN (Tele-Rehabilitation System for musculoskeletal and cognitive disorders) [1], pretende servir de ayuda para fomentar la terapia entre los pacientes, y que su grado de adecuación sea óptimo. Además, permite que los especialistas puedan realizar un seguimiento del progreso de los pacientes desde cualquier lugar.

El sistema consta de módulos diferenciados, para poder integrar nuevas partes de modo sencillo sin que afecte al resto del trabajo. A grandes rasgos, consta de las siguientes partes:

- *Módulo Web*, que permite la gestión de sesiones y el acceso a resultados de los pacientes.
- *Módulo de Juego*, que contiene las actividades de rehabilitación.

Los videojuegos desarrollados se integran como nuevas actividades del sistema, en las que la captura de movimientos se realiza a partir del dispositivo Leap Motion.

### 1.1 Motivación

Las enfermedades cerebrovasculares representan una de las principales causas de discapacidad física en personas adultas. Es fundamental contar con programas de rehabilitación adecuados, para que las secuelas posibles tras un accidente de este tipo sean mínimas. Sin embargo, muchas de las técnicas clásicas empleadas presentan ciertas limitaciones y no siempre es sencillo disponer de los recursos pertinentes. Es preciso explorar nuevos caminos al alcance del usuario, que permitan cubrir todas las necesidades en una etapa tan importante para preservar la calidad de vida de una persona.

Los avances tecnológicos nos permiten hablar sobre sistemas de Realidad Virtual, que cada vez son más accesibles, portables y configurables. De este modo, el trabajo podría incluso realizarse en el hogar, y se conseguiría contar con programas de terapia adaptados a las necesidades personales del paciente.

Otro camino, menos explorado en el campo científico, es el que se puede recorrer de mano de la música: la práctica musical puede conducir a cambios significativos en el sistema motor, incluso en personas sin una formación previa en esta materia. Sería interesante conseguir que la música pudiera contribuir a recuperar la

movilidad de personas que han sufrido algún accidente de este tipo, a través de programas de rehabilitación que combinaran ejercicios con música.

Y si se unen ambas vertientes, ¿qué puede ocurrir? Existen trabajos previos en los que se han obtenido grandes resultados. Todo ello ha motivado el planteamiento de este proyecto, en el que se desarrollan dos videojuegos con una base musical, que pretenden ser un complemento a la terapia de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular, desde un enfoque atractivo y motivador.

## 1.2 Objetivos

El propósito general de este Trabajo Fin de Grado es diseñar y desarrollar una aplicación para la rehabilitación motora basada en instrumentos musicales. Está dirigida a personas con daños motores, que van a seguir un programa dirigido por un especialista, quien puede adecuar las tareas a las necesidades individuales del paciente. Este objetivo principal, se alcanza cumpliendo otros más específicos:

- Conocer las características más relevantes de los potenciales usuarios, para que las tareas a realizar sean comprensibles para ellos y cubran las necesidades correspondientes para mejorar la recuperación funcional de las extremidades afectadas.
- Realizar una revisión del conocimiento sobre las terapias basadas en la música utilizadas para rehabilitación motora, para establecer unos criterios de partida en el momento de diseñar las tareas y elegir los instrumentos musicales más adecuados.
- Estudiar sistemas de Realidad Virtual utilizados en otros proyectos, para conocer diferentes dispositivos para el control de gestos, analizarlos de forma comparativa y prestar atención a las características particulares del dispositivo seleccionado como medio de interacción con los juegos.
- Establecer las funcionalidades de la aplicación, y valorar los posibles problemas a considerar en el diseño de las actividades, en base a la información analizada tras la lectura de estudios previos.
- Permitir que la gestión y configuración del sistema sea sencilla para el especialista y que resulte de utilidad para conocer la evolución de sus pacientes.
- Conseguir que el uso de la aplicación esté al alcance de los usuarios, tanto en el ámbito económico como por su accesibilidad, es decir, la facilidad de disponer de un sistema adaptado a sus necesidades incluso en el hogar.
- Establecer conclusiones, plantear nuevas líneas futuras y propuestas de mejora.

## 1.3 Estructura del Trabajo Fin de Grado

Este Trabajo Fin de Grado está compuesto por seis capítulos: *Introducción, La enfermedad cerebrovascular, Terapias basadas en la música, Rehabilitación con Realidad Virtual, Rehabilitación motora con Leap Motion y Conclusiones y Líneas futuras.*

En el primer capítulo, *Introducción*, se recogen las motivaciones que han conducido este trabajo, los objetivos planteados y la estructura de este documento.



En el segundo capítulo, *La enfermedad cerebrovascular*, se describen los detalles sobre dicha dolencia, las circunstancias en que se produce y las terapias para la neurorehabilitación más extendidas. Entre esas prácticas, se menciona el uso de la Realidad Virtual, y se describen las principales ventajas derivadas del empleo de dichos sistemas, y los dispositivos inmersivos más frecuentes.

En el tercer capítulo, *Terapias basadas en la música*, se destacan las aportaciones especiales de la música que pueden contribuir a una mejora significativa en la calidad de vida de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular. Existen una serie de prácticas comunes en una serie de estudios sobre rehabilitación basada en la música, de los que se recogen los principales datos y las conclusiones más relevantes. Muchas de esas ideas se toman como referencia para el diseño de los videojuegos explicados más adelante.

En el cuarto capítulo, *Rehabilitación con Realidad Virtual*, se realiza un recorrido a lo largo de otros proyectos desarrollados, cuyo fin era conseguir la recuperación de personas con limitaciones motoras. Se describen experiencias utilizando diferentes herramientas con las que se puede interactuar en los sistemas simulados (dispositivos hápticos o para el control de gestos) y se completa la investigación realizando una comparativa entre herramientas comerciales semejantes. Por último, se centra la atención en el controlador Leap Motion, dispositivo con el que se dirige la actividad en los videojuegos desarrollados, y se detallan sus particularidades: características, funcionamiento y ejemplos de aplicación.

En el quinto capítulo, *Rehabilitación motora con Leap Motion*, se describen los juegos musicales desarrollados, denominados Módulo Música y Módulo Percusión, recogiendo los aspectos clave considerados como punto de partida, los ejercicios motores que permiten reforzar y la justificación de los diferentes elementos que constituyen cada juego (instrumentos musicales seleccionados, melodías y secuencias rítmicas, parámetros de configuración, etc.). Asimismo, se muestran las pantallas asociadas a cada una de las actividades propuestas.

En el sexto y último capítulo, *Conclusiones y Líneas futuras*, se recogen las conclusiones derivadas del presente Trabajo Fin de Grado. Asimismo, se incluyen las posibles mejoras y las futuras líneas de investigación que se abren como fruto de este desarrollo.



### LA ENFERMEDAD CEREBROVASCULAR

El término enfermedad cerebrovascular alude a cualquier alteración, permanente o temporal, de una o varias áreas del encéfalo como resultado de un trastorno de la circulación cerebral. Por otro lado, con la palabra ictus se hace referencia a la enfermedad cerebrovascular aguda, que engloba trastornos como la isquemia cerebral, la hemorragia intracerebral (HIC) y la hemorragia subaracnoidea (HS).

Las enfermedades cerebrovasculares (ECV) pueden ser clasificadas por su naturaleza, y se distinguen dos grupos: isquémica y hemorrágica. La primera tiene lugar como resultado de una falta de aporte sanguíneo al encéfalo, mientras que la segunda es consecuencia de la rotura de un vaso sanguíneo intracraneal. Aproximadamente el 80% de los ictus tienen naturaleza isquémica. Se trata de una enfermedad que acontece especialmente en la población mayor de 65 años (un 75% de los casos), y en la que el riesgo de mortalidad a lo largo del primer mes de evolución es de un 20%. La edad media con que se sufre en varones es de 69.8 años (entre 60.8 y 75.3), y 74.8 años en el caso de las mujeres (entre 66.6 y 78) [2].

El ictus representa una de las causas principales de muerte e invalidez en adultos, con una incidencia aproximada en la población mayor de 18 años de unos 174 por cada 100.000 habitantes al año, incrementándose de forma progresiva con la edad. En España representa la segunda causa de muerte tras la cardiopatía isquémica en varones, y la primera por entidades específicas en la mujer, y además es el motivo más frecuente de hospitalización neurológica. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), supone la primera causa de discapacidad física en las personas adultas y la segunda de demencia. En la Encuesta sobre Discapacidades, Deficiencias y Estado de Salud (INE 1999), se pudo comprobar que el 13% de personas con dependencia la padecen como consecuencia de una enfermedad cerebrovascular, y que de ellas un tercio presenta un grado de dependencia moderado, el 50% grave y el 16% absoluto. Es previsible un incremento de la incidencia de esta enfermedad en los próximos años.

La discapacidad motora tras un ictus se refiere a la debilidad de los músculos en cuanto al control y la capacidad de ejecutar movimientos voluntarios. El problema subyacente es que las limitaciones en brazos y manos, se extienden a las actividades propias de la vida diaria.

Es muy importante contar con un programa de rehabilitación, ya que es posible prevenir complicaciones y reducir el déficit neurológico, consiguiendo una mayor capacidad funcional que proporcione mayor autonomía personal y reintegración familiar y socio laboral. Por ello, debe iniciarse de forma precoz y coordinada y

mantenerse en las diferentes fases (fase aguda o de hospitalización y fase subaguda). Asimismo, resulta determinante el momento de inicio de la rehabilitación, así como la duración e intensidad del tratamiento y el lugar donde se recibe, para obtener el máximo beneficio. Uno de los principales retos es que el paciente sea incluido en un programa en el momento adecuado, ya que un retraso en el comienzo del mismo, se asocia a una disminución de la reorganización cortical y una menor capacidad de recuperación funcional. Por el contrario, de forma independiente a la gravedad del ictus, el inicio temprano se asocia a una mejor evolución funcional y a mayores puntuaciones en la escala de Actividades básicas de la Vida Diaria (AVD) y la FIM (Functional Independence Measure).

El periodo de recuperación y el grado de intensidad debe establecerse en relación a la gravedad del ictus, ya que cuanto más grave sea más funciones hay que recuperar, y más tiempo se tendrá que invertir. La puntuación más alta en las AVD se alcanza de media a los dos meses (ocho semanas y media) en pacientes con ictus leves, a los tres en pacientes con ictus moderados (trece semanas), a los cuatro en pacientes con ictus graves (diecisiete semanas), y a los cinco en caso de ictus muy grave (veinte semanas). Los resultados indican que los procesos de plasticidad cerebral se optimizan con un inicio precoz y se mantienen durante al menos seis meses en los ictus más graves [3].

## **2.1 Terapias para la neurorehabilitación**

Las personas que han sufrido un ictus o accidente cerebrovascular, suelen presentar deficiencias que limitan la funcionalidad de sus miembros superiores. Por otro lado, es importante hablar de la plasticidad cerebral, la cual implica diferentes mecanismos de adaptación funcional de sistema nervioso central, para poder minimizar las alteraciones estructurales o fisiológicas, que pueden haberse provocado. Hay que tener en cuenta que dicha plasticidad es menor en adultos que en niños, y además, la reorganización cortical que tiene lugar en las zonas cercanas a donde se produce un infarto tras un ictus determina la futura recuperación de la movilidad. Algunos mecanismos biológicos pueden estudiarse gracias a técnicas como la Resonancia Magnética Nuclear (RMN), y la Estimulación Magnética Transcraneal (EMT). Gracias a los ejercicios terapéuticos, se puede conseguir una reorganización cortical [4].

En el campo de la rehabilitación neuronal, han surgido terapias nuevas en los últimos años, como el entrenamiento motor bilateral de los miembros superiores, la terapia de restricción del lado sano (CIMT), la terapia frente a espejo, la estimulación eléctrica funcional (FES), la asistida con robots o la basada en Realidad Virtual. Es en esta última en la que se insistirá en mayor medida, dada la naturaleza de este estudio [5].

### ***Entrenamiento motor bilateral***

En esta técnica, los pacientes practican un entrenamiento con los dos miembros superiores de forma simultánea y simétrica, para que el movimiento de uno ayude al del otro.

### ***Terapia de restricción del lado sano***

Consiste en restringir el uso del miembro sano y enfatizar el entrenamiento intensivo de la otra extremidad. En base a los datos obtenidos en ciertos estudios, se puede afirmar que puede llegar a ser muy eficaz en pacientes subagudos y crónicos con paresia moderada.

La terapia de restricción-inducción del movimiento (CIMT) sigue dos principios básicos: por un lado restricción del movimiento del lado sano, haciendo que la mano descanse en una tablilla el 90% del tiempo durante 10-20 días, y en segundo lugar, entrenamiento de la parte afectada con un procedimiento basado en la ejecución de actividades motoras durante unas 6 horas al día en el periodo de terapia [6].

### ***Terapia frente al espejo***

Esta práctica emplea un *feedback* visual, de modo que se interpone un espejo entre el miembro sano y el parético, bloqueando la visión del afectado mientras el paciente intenta mover ambas extremidades. Algunos estudios demuestran que esta técnica es eficaz en enfermos que se hallan en fase subaguda y crónica.

### ***Estimulación eléctrica funcional***

Esta terapia resulta de utilidad para incrementar la fuerza, reducir el dolor y la espasticidad, y mejorar la pinza y prensión manual. Algunos sistemas de este grupo son Hand master Ness H200, FreeHand System o Bionic Glove.

### ***Terapia asistida con robots***

En este tipo de técnica se puede actuar movilizándolo pasivamente o sosteniendo el miembro superior cuando la fuerza del paciente no es suficiente, a la vez que asistiendo a los movimientos voluntarios. Es de utilidad para recuperar la función motora distal, ya que se mejora el balance muscular de los flexores de muñeca y la destreza manual, y se facilita la ejecución intensiva de tareas [5].

Estos dispositivos permiten realizar ejercicios de forma repetitiva e intensiva, y proporcionan un *feedback* sensorial [4]. Los más destacables son:

- *MIT-Manus*: para ejercicios de hombro y codo, indicado para pacientes con paresia grave.
- *MIME (Mirror Image Motion Enabler)*: para codo y hombro, con constricción activa del lado sano.
- *Bi-Manu-Track*: para antebrazo y muñeca, asiste el movimiento del miembro superior parético en la práctica de ejercicios bimanuales en espejo.

Otros, más complejos, tienen un exoesqueleto que se acopla al miembro afectado, como Myomo eI00 y Lokomat.

### ***Realidad Virtual***

La Realidad Virtual permite la interacción sensorial del usuario con un entorno simulado que facilita la ejecución de los ejercicios programados. Este tipo de tratamiento suele suponer sesiones diarias de 1 h, durante 3-4 semanas.

Los tratamientos con Realidad Virtual ofrecen una interfaz en tiempo real que muestra una representación de la realidad perceptiva, sin soporte objetivo, ya que sólo existe en el ordenador. Los puntos a destacar son la capacidad de interacción y el *feedback* sensorial que proporcionan, a través de un entorno que resulta motivador para el paciente, donde se han de desarrollar tareas similares a las de la vida real y que pueden organizarse en niveles de dificultad. La práctica de ejercicios en pacientes en fase subaguda y crónica tras un ictus, puede mejorar la habilidad para realizar tareas motrices y de la vida diaria [7].

Se puede distinguir entre sistemas inmersivos, ligados a un entorno virtual que genera el ordenador donde el paciente puede interactuar mediante algún tipo de hardware (guantes, casos de visión estereoscópica), y sistemas no inmersivos, donde el individuo participa en el entorno a través de un teclado, mando o ratón, sin emplear ningún hardware adicional (consolas comerciales como Nintendo Wii o Sony PlayStation). La inclusión de dispositivos hápticos como los guantes de datos (CyberGlove), permite aumentar el *feedback* en términos como presión e información táctil, de modo que se experimenta una mayor sensación de inmersión. Estos sistemas se han empleado en pacientes sin deterioro cognitivo, que presentan paresia leve o moderada [5].

La inmersión favorece la mejora de presión, marcha, y se ha comprobado una activación del córtex sensitivo motor en el hemisferio lesionado, así como del sistema de neuronas en espejo. Por ello, contribuyen a la plasticidad neuronal y favorecen la recuperación funcional de los individuos [7]. En el caso de pacientes en fase crónica tras un ictus, se mejora la motricidad y la capacidad de desempeño de tareas diarias [4].

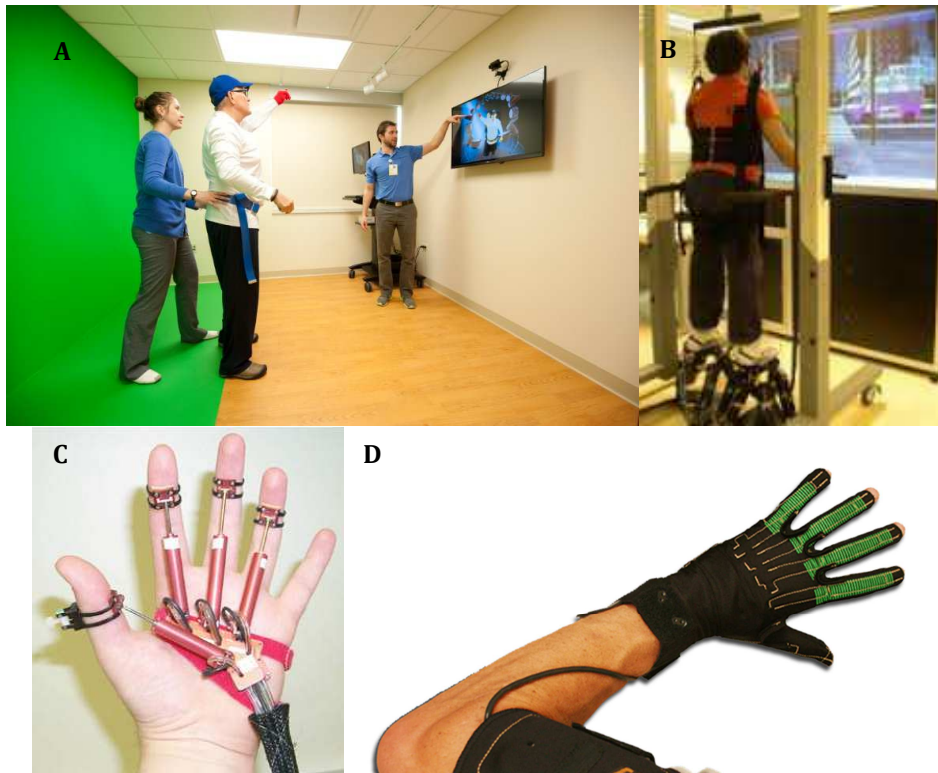
La práctica reiterada de movimientos en pacientes con ictus, permite la recuperación funcional motora. La ventaja de los sistemas de Realidad Virtual, es que cada vez son más accesibles y portables, y puede extenderse el trabajo al hogar, pudiendo intensificar el programa de ejercicios.

Los dispositivos inmersivos más empleados con este tipo de pacientes son los que se indican a continuación [7]:

- *Sistema Interactive Rehabilitation Exercise (IREX)*: consistente en un ordenador conectado a una pantalla gigante, para que el paciente pueda visualizar su imagen captada por una cámara en modo de avatar, y un guante de datos conectado sin cables.  
En un estudio con pacientes en fase crónica, se propuso a los participantes una serie de ejercicios de marcha y equilibrio, y se pudo comprobar que la práctica reiterada les permitía mejorar en actividades de la vida diaria, transferencias y equilibrio. Gracias a la Resonancia Magnética Funcional, fue posible observar la activación ocasionada en la corteza del hemisferio lesionado durante la terapia.
- *Rutgers Master II-ND*: es un prototipo de guante cibernético que consta de unos cilindros neumáticos en la palma, que al ser activados aplican fuerza sobre los 4 primeros dedos. El puño no puede cerrarse por completo, pero se pueden trabajar movimientos de presión y pinza, asistidos y resistidos, en entornos virtuales.
- *Rutgers Ankle Rehabilitation System*: consiste en unas plataformas robóticas que son acopladas a tobillos y pies, que permiten registrar los niveles de fuerza.

El paciente las emplea a modo de joystick, mientras participa en un entorno simulado que visualiza en una pantalla.

- *CyberGlove*: este guante permite ejecutar ejercicios de arco y de velocidad de movimiento, así como trabajar cada movimiento de dedo por separado. Se trata de un guante de datos compuesto de licra y cables de fibra de vidrio para cada dedo. Consta de 18-22 sensores de ángulo para las diferentes articulaciones: dedos, la palma de la mano y la muñeca. Las fibras emiten luz, y disponen de un sensor al final. En función de la intensidad de la luz recibida se determinan los giros. Puede emplearse con los dedos en movimiento simultáneo o separado.



**Figura 2-1.** (A) Sistema IREX; (B) sistema de rehabilitación Rutgers Ankle; (C) sistema de rehabilitación Rutgers Master II-ND; (D) Guante CyberGlove.

Tanto Rutgers Master II-ND como CyberGlove pueden conectarse a un ordenador mediante un puerto para su inclusión en el videojuego donde se vayan a utilizar. Estos dos dispositivos se han empleado en diversos estudios, consiguiendo mejoras de la capacidad de prensión y de disminución de tiempo para realizar tareas manuales. Rutgers Ankle Rehabilitation System se ha utilizado en un estudio donde se realizaban entrenamientos de 1 h durante 3 días a la semana, un periodo de 4 semanas, para pacientes crónicos que habían sufrido un ictus, consiguiendo aumentar la velocidad de marcha, longitud del paso y perímetro de marcha.

En el caso no inmersivo, el equipo de trabajo suele tener un menor coste, y el por ello el acceso para el usuario ha sido mucho más sencillo hasta ahora. Cabe destacar las consolas comerciales Nintendo Wii y Sony PlayStation 2 Eye Toy. El inconveniente mayor es conseguir adaptar el software a los déficits propios del paciente.

La ventaja de los sistemas de Realidad Virtual es que cada vez son más accesibles y portables, y puede extenderse el trabajo al hogar, permitiendo intensificar el programa de ejercicios.



# TERAPIAS BASADAS EN LA MÚSICA

Las aproximaciones clásicas presentan sus limitaciones para la rehabilitación de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular, por lo que resulta necesario encontrar técnicas más efectivas. El objetivo es recoger algunas evidencias demostradas en otros estudios, con el fin de conseguir protocolos de mayor utilidad. Una de las evidencias destacables es que la práctica masiva repetitiva de movimientos conduce a mejoras importantes en el control motor [8]. Por otro lado, la terapia de restricción-inducción del movimiento (CIMT), puede llegar a proporcionar beneficios mucho mayores que otras de menor intensidad, e incluso conducir a una reorganización en el área externa motora cortical: el área de los músculos en el hemisferio afectado es mucho menor de forma inicial que tras la terapia, gracias a la cual se consigue alcanzar un balance entre ambos hemisferios [9]. Otros estudios muestran que la reorganización plástica de redes neuronales juega un papel notable en la recuperación tras daños cerebrales, lesiones isquémicas después de un accidente cerebrovascular o procesos degenerativos [10].

Por tanto, de la literatura neurocientífica se desprende la idea de que es posible formar nuevas conexiones neuronales tras un ictus. Ello hace tener un punto de vista más optimista, y valorar la importancia de diseñar nuevas estrategias que tengan como objetivo las habilidades a largo plazo de los pacientes. De ahí que se comiencen a desarrollar estudios que incluyan la práctica musical, para valorar la contribución que dicha disciplina puede realizar en el proceso de rehabilitación.

### 3.1 Aportación propia de la música

La práctica musical puede inducir cambios en el sistema motor, incluso en pacientes no músicos. Tocar un instrumento conduce a una adaptación plástica relativamente rápida, que no sólo está restringida a áreas corticales, sino que incluye también circuitos auditivo-motores [11] [12]. Este proceso implica un procesamiento auditivo y motor rápido que hace que se activen varias áreas a la vez. Bangert realiza un estudio longitudinal, que permite afirmar que las modificaciones que se producen en el cerebro son gracias al entrenamiento musical. En su investigación, analiza los cambios en patrones de activación cortical producidos durante el proceso de aprender a tocar el piano, a corto y largo plazo, tanto en tareas motoras como auditivas, observando que la actividad auditiva-sensorio motora tiene lugar con tan sólo 20 minutos de práctica, y tras 5 semanas se potencia de forma notable. Se consigue plasticidad instantánea en la corteza, y esas áreas anteriores del hemisferio derecho proporcionan una interfaz auditivo-

motora para la representación mental del teclado. A través de Imagen por Resonancia Magnética funcional (fMRI), se ha podido observar cómo la actividad cerebral es mucho mayor en músicos que en no músicos al escuchar secuencias melódicas o presionar teclas en un piano sin sonido [12].

Del mismo modo, realiza una comparación de la estructura de las cortezas motoras primarias en músicos profesionales y no músicos mediante fMRI. Igualmente, observa las diferencias entre distintos instrumentistas: los pianistas presentan modificaciones estructurales en ambos hemisferios, y los violinistas sólo en el derecho (los primeros necesitan movimientos precisos y rápidos con ambas manos, mientras que los segundos las emplean de forma asimétrica, con movimientos precisos en la izquierda) [12]. Con ello se evidencia cómo practicando se inducen cambios estructurales cognitivos y motores, y se mejora el nivel de ejecución en áreas motoras.

Otro dato relevante es que el nivel de la práctica musical parece estar relacionado con el aumento de materia gris (GM) en regiones motoras [13]. La práctica musical puede modificar la fuerza de las conexiones en áreas distantes a través de modificaciones de la materia blanca. Comparando con no músicos, los pianistas tienen una porción anterior mayor del cuerpo caloso, la materia blanca mayor que conecta los dos hemisferios [14], y además, los músicos muestran una conexión de materia blanca mayor en las áreas motoras izquierda y derecha, en el tracto cortico espinal [15] y entre áreas motoras y auditivas [16]. Gracias a estudios de fMRI se ha confirmado la fuerte unión entre redes auditivas y motoras, aunque los no músicos también muestran co-activación motora y auditiva [17].

Y es que los músicos muestran un área de Broca mayor que los no músicos, y las representaciones de sonidos resultan más elaboradas y precisas [18]. Además, el beneficio derivado de la práctica musical durante la infancia, permanece en la edad adulta. El cerebro del músico es un excelente modelo de neuroplasticidad, específicamente en el sistema sensorio-motor.

Algunos hallazgos refuerzan el argumento de que la unión auditivo-motora es un mecanismo potente para reorganizar funciones motoras: la corteza motora contralateral se activa involuntariamente en pianistas cuando escuchan una buena interpretación [19], los violinistas expertos muestran activación en las regiones primarias auditivas cuando interpretan una pieza en silencio [20], pianistas novatos muestran regiones motoras corticales mayores tras 5 días de sesiones de 2 h [21], y los efectos de plasticidad ligados a la adquisición de habilidades motoras aparecen minutos después del inicio de la práctica [22]. Esta idea tiene paralelismo con el concepto de neurona en espejo, que se refiere a neuronas que descargan durante la ejecución de acciones manuales, la mera observación de esa actividad realizada por otras personas o por la escucha de sonidos relacionados con dicha acción [23].

La música real incrementa la activación en áreas del cerebelo específicas, mientras que la imaginada activa áreas motoras suplementarias y de los ganglios basales, por lo que ambos tipos de escucha presentan diferente base neuronal [24].

Por otro lado, Särkamo muestra que la exposición a la música potencia significativamente el funcionamiento cognitivo en dominios de la memoria verbal y

atención, focalizada en un grupo que sigue terapia musical. La audición activa una amplia red neuronal relacionada con tareas como la atención, procesos semánticos, memoria, funciones motoras y procesamiento emocional. Además, estos pacientes muestran un estado de ánimo menos depresivo y confuso [25]. Ferreri comprueba también mediante Espectroscopia funcional de Infrarrojo Cercano (fNIRS), cómo la escucha de música mejora la memoria episódica y puede modular la actividad de la corteza prefrontal durante la codificación de memoria en personas de edad avanzada [24].

Estudios como el de Thaut indican que seguir patrones rítmicos con un metrónomo mejora la precisión espacio temporal para realizar movimientos en pacientes que han sufrido un accidente de este tipo [26]. No está claro si el *feedback* auditivo con sonidos simples tiene el mismo efecto en la rehabilitación o si se necesita trabajar con elementos como altura y ritmo para que el tratamiento tenga efecto.

Por tanto, aprender a tocar un instrumento puede inducir cambios neuro-plásticos sustanciales en regiones corticales y subcorticales de redes de procesamiento motor, auditivo y del habla. Puede ser un método de bajo coste alternativo incluso para mejorar el aprendizaje de personas con problemas de lenguaje. Sus efectos positivos en déficits motores, emocionales y cognitivos de pacientes con enfermedades como un accidente cerebrovascular o Parkinson, hace que sea necesario diseñar nuevas estrategias en la rehabilitación. Los aspectos aquí descritos se toman como punto de partida para los estudios que siguen terapias con apoyo musical, con el fin de desarrollar un protocolo que permita alcanzar esos beneficios adicionales que la música aporta.

### 3.2 La música en la neuro-educación

La música es una rica, versátil y poderosa herramienta que estimula el cerebro. Las nuevas técnicas de neuroimagen permiten entender mejor lo que pasa en un cerebro sano cuando se escucha, toca, piensa y siente la música, y cómo la estructura y función del cerebro puede cambiar como resultado del entrenamiento y la habilidad musical. En el cerebro sano, hay una red bilateral de zonas temporales, frontales parietales, cerebelares, límbicas y para-límbicas, asociadas a la percepción auditiva, lenguaje, procesamiento sintáctico y semántico, memoria de atención y trabajo, memoria semántica y episódica, funciones rítmicas y motoras, y emociones y recompensas gracias al procesamiento sonoro [24]. Todas ellas pueden ser modeladas gracias a la práctica musical.

En los últimos años, la música ha comenzado a utilizarse como herramienta terapéutica en la rehabilitación neurológica, para mejorar déficits en personas que han sufrido accidentes que afectan a sus habilidades motoras, cognitivas, del habla, emocionales y sociales. La música y neurociencia tradicionalmente progresaban de forma separada, pero ahora se unen ofreciendo información sobre cómo se procesa la música en un cerebro dañado, cómo se puede favorecer la recuperación funcional, y qué mecanismos neuronales están debajo de los efectos terapéuticos de la música.

Existen diferencias fundamentales entre la práctica musical dirigida a la educación o la rehabilitación. En el primer caso, por lo general, todo está orientado a alcanzar una trayectoria determinada, mientras que para la rehabilitación el fin principal es

conseguir compensar ciertos déficits. Los mecanismos de plasticidad neuronal que induce la práctica musical durante la infancia o los provocados en personas con daños cerebrales pueden ser diferentes: un ictus implica la muerte de neuronas en una región específica, se rompen redes neuronales, algo que no ocurre en la otra situación. Gracias a la Terapia con Apoyo Musical (MST), se tiene constancia de que el entrenamiento musical en pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular, puede modelar de nuevo el cerebro, consiguiendo la reorganización funcional en mapas de la corteza motora [18].

En cuanto a las características del entrenamiento, también hay diferencias tanto cuantitativas como cualitativas. En la rehabilitación se trabaja a gran intensidad durante un periodo corto de tiempo, ya que la práctica repetitiva de movimientos es fundamental, y se intenta animar a que el paciente siga con la dinámica en casa, para que se mantengan activos. Por el contrario, en la educación lo habitual es trabajar en grupo con una intensidad menor durante un periodo de tiempo más amplio, alcanzando un nivel de complejidad musical mayor. Además, la mayor parte del tiempo los niños deben tocar de forma conjunta, e incluso se fomenta la creación de nuevas piezas [18].

A pesar de las diferencias en el planteamiento, existen aspectos similares comunes relacionados con la naturaleza emotiva, sensorial, motora, cognitiva y social de la música en sí misma. Es una buena actividad para desarrollar interacciones auditivas y motoras, para la estimulación cognitiva y la regulación del humor, además de resultar placentera [18]. El hecho de que los beneficios de hacer música permanezcan en el tiempo, es quizá uno de los principales motivos por lo que emplearla.

Aunque se desconocen todos los mecanismos neuronales de plasticidad provocados por la música, se tiene constancia del efecto positivo de la práctica musical y puede justificarse su uso en el contexto de la neuro educación y neuro rehabilitación: puede ser la herramienta perfecta para conseguir cambios plásticos deseados en el cerebro sano o enfermo.

### 3.3 Principios básicos en el diseño de protocolos de rehabilitación

El aprendizaje de la música es una de esas nuevas estrategias potenciales, debido a la extensa red neuronal envuelta en el proceso de audición y ejecución (se coordina información auditiva, visual y sensorio motora). Se trata de una práctica que puede producir cambios a largo plazo en el cerebro de niños y adultos, alterando ciertas áreas incluso de forma relativamente rápida.

A partir de los datos sobre la relación auditivo motora obtenidos por diferentes estudios, se diseña un programa basado en la creación activa de música durante la rehabilitación, siguiendo los siguientes principios:

- Repetición masiva: ejercicios de movimiento de dedos y brazos.
- *Feedback* auditivo: integración y unión auditivo-motora, reforzando el efecto del movimiento gracias al *feedback* auditivo.
- Modelado: adaptar la complejidad de los movimientos necesarios en función del progreso individual.
- Emoción: motivación creciente del paciente por la interpretación y el impacto emocional de crear música y adquirir una nueva destreza.

La plasticidad de la corteza cerebral se incrementa por la estimulación y el impacto en la motivación. Se pueden conseguir redes de aprendizaje que ayuden a consolidar nueva información, aumentando los recuerdos que se tienen como experiencia y la probabilidad de práctica voluntaria. En todos estos estudios, se observa menor depresión y confusión en las personas que reciben esta terapia que en los grupos de control.

Otro elemento común, es que en los estudios llevados a cabo con Terapia con Apoyo Musical, las funciones motoras son evaluadas con varios elementos:

- *Sistema de análisis computarizado (Zebris)*, basado en impulsos con ultrasonidos, aplicados a las falanges dorsales de los dedos índices, entre las uniones distal y proximal, sobre la unión metacarpiana y la dorsal de la muñeca. A través de software comercial se realiza el cálculo de las posiciones en 3 dimensiones de forma continua.
- *Test ARAT (Action Research Arm Test)*, que evalúa funciones de las extremidades con en sub-tests: alcance, agarre, y movimiento grueso.
- *Arm Paresis Score*, que consiste en 7 actividades sencillas para la mano afectada sola y acompañada de la otra (abrir un bote, dibujar una línea, coger y lanzar un pequeño cilindro, beber agua de un vaso, cepillar el propio cabello y abrir y cerrar una pinza de la ropa).
- *Box and Block Test (BBT)*, consistente en una caja con 2 compartimentos y 150 cubos que deben trasladarse de un compartimento a otro, con el fin de evaluar la destreza gruesa de la mano.
- *Nine Hole Pegboard Test (9HPT)*, donde el paciente debe coger 9 barras de 32 mm de largo y 9 mm de diámetro, para insertarlas en agujeros de 10 mm de diámetro, lo más rápido que le resulte posible.

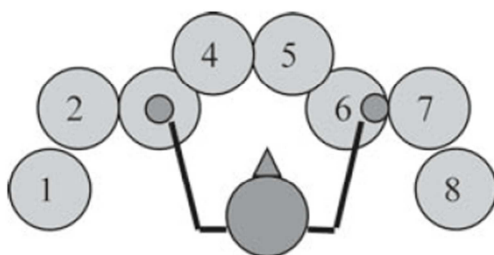
Los participantes en este tipo de investigación, por lo general, son evaluados previamente para saber si son capaces de entender las instrucciones durante el asesoramiento y entrenamiento, a través del test AAT (Aachener Aphasie Test).

### 3.4 Music Supported Training (MST)

En el protocolo desarrollado para esta técnica, se emplean 2 dispositivos: un teclado MIDI y una batería electrónica de 8 platos de 20 cm de diámetro. Los platos producen 8 sonidos correspondientes a una escala modal de sol (sol-la-si-do-re-mi-fa-sol'), y se encargan de testear movimientos con poca precisión del brazo. De forma similar, el teclado consta de 8 teclas blancas, asociadas a la misma escala de sol, para movimientos precisos de la mano.

No todos los pacientes pueden emplear ambos dispositivos, por lo que el entrenamiento es adaptable a las necesidades de los pacientes (número de sonidos que deben tocar, velocidad, orden y partes del cuerpo incluidas en los ejercicios), de modo que el grado de dificultad se incrementa sistemáticamente empleando 10 niveles. Todos los pacientes comienzan las sesiones partiendo del nivel más bajo, que consiste en tocar el mismo sonido repetidas veces. A medida que crece la complejidad, el paciente debe combinar un mayor número de sonidos en la ejecución, y en los niveles más complejos se puede llegar a incluir pequeñas canciones tradicionales que implican todos los sonidos disponibles.

Al tocar el piano los pacientes deben realizar movimientos precisos con la mano afectada para presionar la tecla del sonido que desean, proceso donde juega un papel esencial el *feedback*, ya que los pacientes deben reajustar sus movimientos en términos de espacio y tiempo, coordinación según el ritmo, fuerza y velocidad. Trabajar con escalas, sonidos y melodías permite tener un grado alto de variación en las tareas, que potencian la creación de modelos internos que pueden ser cruciales para generalizar el aprendizaje de habilidades motoras para otras situaciones. Por último, la música implica emoción, y su valor puede ser importante en la aceptación de la eficacia del programa [27]. La neuroplasticidad depende de la motivación de la actividad, y en este sentido, las tareas pueden ser más atractivas para los pacientes que con otro tipo de tratamiento.



**Figura 3-1.** Set de percusión de 8 platos, 4 para cada brazo, organizados en un semicírculo para facilitar el alcance del paciente [28].

### 3.5 Resultados de diferentes estudios

A partir de los principios establecidos en la experiencia dirigida por Schneider en 2007, se desarrollan una serie de estudios con naturaleza similar, en la que se observan mejoras importantes en los pacientes que reciben terapia con apoyo musical, frente a los que siguen otras convencionales.

La terapia con apoyo musical induce a mejoras en las destrezas motoras de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular, lo que no se sabe a priori es si todas las personas responden de igual forma ni si se pueden mantener los beneficios en el tiempo.

Los resultados publicados en los documentos que se pasan a describir entre 2009-2013, forman parte de un gran proyecto, del que se han publicado resultados de forma progresiva, cuyos objetivos eran los siguientes [29]:

- Evaluar los cambios plásticos inducidos por la MST en la corteza sensorio motora en pacientes con infarto cerebral (se incluyen por primera vez pacientes en fase crónica).
- Investigar los mecanismos neurofisiológicos implicados en la neurorehabilitación de pacientes con accidente cerebrovascular después de la MST: hipótesis del ensamblaje auditivo-motor.
- Comparar los efectos del tratamiento de la MST con otras técnicas de rehabilitación: terapia motora convencional y terapia con constricción del movimiento (CIT).
- Objetivos metodológicos de neuroimagen.
- Extensión de la MST en la terapia de la marcha: dado que el movimiento arrítmico es una característica importante en la alteración de la marcha tras un

ictus, se crean unos sensores para colocar en los zapatos de los pacientes, que producen tonos de la escala musical mientras caminan. La señal auditiva ofrece un *feedback* sobre el ritmo del patrón de la marcha, y el objetivo es conseguir uno más normal y simétrico.

En la tabla 2-1 se muestra un resumen de las principales aportaciones de los resultados de los diferentes proyectos.

**TABLA 3-1.** COMPARATIVA RESUMEN DE DIFERENTES ESTUDIOS BASADOS EN MST.

Estudio	Participantes	Programa MST	Resultado
Schneider 2007	Pacientes agudos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 Convencional</li> <li>• 20 MST</li> </ul>	15 sesiones de 30' durante 3 semanas. Piano y percusión	Mejoras MST: en frecuencia, velocidad y precisión de dedos y manos.  Mejoras en test: ARAT, BBR, 9HPT, test motor APS.  Mejoras en Convencional: no hay.
Altenmüller 2009	Pacientes agudos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 Convencional</li> <li>• 32 MST</li> </ul>	15 sesiones de 30' durante 3 semanas. Piano y percusión	Mejoras MST: en frecuencia, velocidad y precisión de dedos y manos, y alcanzando un blanco.  Reorganización neurológica.  Mejoras en test: ARAT, BBR, 9HPT, test motor APS.  Mejoras en Convencional: no hay.
Schneider 2010	Pacientes agudos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 Convencional (grupo de control)</li> <li>• 15 CIT</li> <li>• 15 MST</li> </ul>	15 sesiones de 30' durante 3 semanas. Piano y percusión	Mejoras MST: en frecuencia, velocidad y precisión de dedos y manos.  Mejoría mayor en MST que grupo CIT y Convencional.
Rojo 2011	Pacientes crónicos <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio de casos</li> </ul>	20 sesiones de 30' durante 4 semanas. Piano y percusión	Activación neuronal menor en el hemisferio no afectado durante tareas con la mano dañada. Activación funcional de regiones motoras en la audición pasiva de secuencias practicadas.
Rodríguez-Fornells 2012	Pacientes crónicos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 14 sanos (grupo control)</li> <li>• 20 MST</li> </ul>	Sesiones de 30' durante 1 mes de forma intensiva.	Mejora test ARAT inferior que en pacientes agudos. Aumento de conexión en circuitos auditivo-motores.

Estudio	Participantes	Programa MST	Resultado
Amengual 2013	Pacientes crónicos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 14 sanos (grupo control)</li> <li>• 20 MST</li> </ul>	20 sesiones de 30' durante 4 semanas. Piano y percusión	Mejora en la frecuencia de pulsación de dedos y de mano, y test ARAT. Mayor actividad en áreas corticales del hemisferio afectado.
Grau-Sánchez 2013	Pacientes agudos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 9 sanos (grupo control)</li> <li>• 9 MST</li> </ul>	20 sesiones de 30' durante 4 semanas. Piano y percusión	Mejoras en test ARAT, BBT y APS, así como en Escala de calidad de vida. Mayor actividad en áreas corticales del hemisferio afectado.
Van Vugt 2014	Pacientes agudos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 14 MST en turnos</li> <li>• 14 MST alternados</li> </ul>	10 sesiones de 30' durante un periodo de 3-4 semanas (3 individuales y 7 en parejas). Piano	Mejoras test 9HPT, pulsación sincronizada, y estado de ánimo (menor depresión y fatiga). Valoraciones más positivas en grupo por turnos, y mejoría superior en 9HPT.
Villeneuve 2014	Pacientes crónicos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 13 MST</li> </ul>	9 sesiones de 1 h guiadas y 3 de 30' en el hogar sin terapeuta (en total 15 sesiones durante 3 semanas). Piano	Mejores puntuaciones en BBT, 9HPT, FTN, FTT y test motor Jebsen. Se mantiene mejoría 3 semanas después de acabar el tratamiento.

### 3.5.1 Estudio de Schneider (2007)

El estudio descrito por Schneider evalúa un programa de entrenamiento basado en la música diseñado para inducir una representación de movimientos auditivo motores en 20 pacientes afectados por un accidente cerebrovascular (10 afectados en las extremidades superiores del lado derecho y 10 afectados en el lado izquierdo). Participan personas sin conocimientos musicales previos en un entrenamiento dirigido por pasos, primero en el lado afectado, y seguido por el uso de ambas extremidades. El entrenamiento musical se desarrolla a lo largo de 3 semanas junto con la terapia convencional. Además, se establece otro grupo de 20 personas con iguales características, que tan sólo recibe terapia convencional. Todos pacientes reciben 30 minutos de terapia convencional diaria, durante las 3 semanas del estudio. Además, aquellos que reciben entrenamiento MST, reciben 15 sesiones de 30 min individuales.

Cabe destacar que para el grupo con MST se observan mejoras desde la primera a la segunda sesión en el movimiento de dedos y de manos (frecuencia), velocidad (NIV, Inversions of Velocity), y máxima velocidad angular. Por otro lado, con el paso del tiempo, del mismo modo aparecen mejoras en otros test empleados:



Action Research Arm Test, Arm Paresis Score, Box and Block Test y Nine Hole Pegboard Test. Por tanto, estos pacientes muestran mejoras claras en el rango de posibles movimientos (Action Research Arm Test y Arm Paresis Score), velocidad de movimiento (Box and Block Test y Nine Hole Pegboard Test, parámetros de frecuencia y velocidad obtenidos con el análisis computarizado y calidad del movimiento (NIV).

Por un lado, el *feedback* auditivo (altura y ritmo) influye en la mejora de la calidad de movimiento (evaluado con NIV) y del movimiento de dedos, dado que para cada movimiento el paciente recibe información sobre cómo de bien está ejecutando una secuencia melódica. Para evaluar el papel de este aspecto, una opción es emplear un piano y una batería sin sonido, como se realiza en estudios posteriores. Es un *feedback* más útil en la organización de funciones motoras que por ejemplo si fuese visual [6].

Por otro lado, estudios como el de Bangert y Altenmüller [10] apuntaban a que la práctica de un instrumento musical conduce a una integración auditivo-motora. En este estudio las mejoras se analizan en tareas que no implican instrumentos musicales, por lo que esa integración, en realidad es extensible posteriormente para cualquier situación. Además, un factor determinante en el éxito del tratamiento es lo atractiva y divertida que resulta la actividad, que mejora la motivación de los pacientes.

### 3.5.2 Resultados de Altenmüller (2009)

En este segundo estudio con el protocolo MST, se observan mejoras en los índices de actividad motora y en medidas electrofisiológicas: en este caso se evalúa si el tratamiento conduce a una reorganización neurológica y una recuperación motora en enfermos que han sufrido un accidente cerebrovascular.

Se cuenta con 32 pacientes sin experiencia musical previa, con capacidad para mover el brazo o dedo índice afectado sin ayuda del lado sano, que durante 3 semanas reciben 15 sesiones de terapia musical equivalente a la descrita en el estudio anterior, como complemento a la convencional. Asimismo, participan 30 pacientes más como grupo de control.

Se analizan cambios en la actividad neuronal oscilatoria a través de la ERD/ERS (Desincronización /Sincronización Relacionada con Eventos). Los encefalogramas se obtienen mediante 26 electrodos insertos en una gorra elástica. De cada movimiento hay unas 100 respuestas para la extremidad afectada y la sana, con una duración de 5 min por ejecución, y de 1 h para el experimento completo. Para analizar la ERD, los ensayos individuales siguen un filtrado paso-banda en las bandas alfa y beta (9-11 Hz y 18-22 Hz, respectivamente), y a partir de ello se obtienen muestras en potencia.

Del mismo modo que en el primer estudio, se evalúan las funciones motoras con los elementos ya descritos, comenzando los ejercicios con la extremidad afectada, seguido de la ejecución con ambas juntas.

En la banda beta se observan importantes cambios en los pacientes que siguen la terapia musical, marcados por un descenso de la potencia en torno a la respuesta. Cabe destacar que las mejoras son importantes para este grupo salvo para el

movimiento de pronación/supinación. Se piensa que la ERD durante la preparación del movimiento y la ejecución está ligada a la activación cortical, y durante el movimiento posterior la ERS visible principalmente es una correlación del estado de reposo. Se interpreta como una actividad mayor para regiones motoras, por la mejora más pronunciada en las funciones motoras. Además, hay una mayor coherencia en la banda beta (ligada a funciones motoras) posterior a la terapia en estos pacientes, lo cual sugiere que se produce una reorganización neurológica mayor que en el resto de pacientes.

Estas conclusiones refuerzan los argumentos planteados por Pascual-Leone o Classen, de modo que la unión auditivo-motora, es una práctica que permite conseguir resultados realmente efectivos para la reorganización neurológica de los pacientes. El siguiente paso es poder comparar resultados con personas que sigan terapia CIMT [30].

### 3.5.3 Aportaciones de Schneider (2010)

En este estudio se extiende lo trabajado en 2009, incluyendo un grupo de control que recibe Terapia de Restricción Inducida (CIT). De forma aleatoria se asignan 30 pacientes para tratamiento convencional, 32 para tratamiento basado en la música más el convencional (la terapia MST supone 15 sesiones durante 3 semanas individuales de 30 min) y posteriormente se añade un tercer grupo de 15 personas que recibe CIT como grupo de control, que asiste a 15 sesiones de 30 min de entrenamiento motor funcional.

Todos reciben terapia estándar, física y ocupacional individual, de 30 min de duración. Sólo 8 personas no completan el programa, por no realizar el análisis de movimiento computarizado durante el post tratamiento. Se evalúan los resultados con los test de anteriores estudios, muy empleados en rehabilitación de extremidades superiores. Además, se realiza el análisis de movimiento computarizado.

Los resultados son mejores en el grupo de terapia CIT y musical, sin embargo la mejoría es superior para los de terapia musical en todos ejercicios destinados al entrenamiento motor. En cuanto a frecuencia y precisión, la ventaja en los resultados del grupo de entrenamiento musical respecto al de terapia CIT se restringe casi a movimiento de dedos. La terapia musical no sólo mejora las habilidades motoras, sino que parece más eficiente en términos de recuperación de funciones motoras más precisas en comparación a pacientes que siguen terapia CIT.

Este estudio muestra por primera vez que la terapia musical es más eficiente que la funcional en destreza de dedos y las cuatro baterías clínicas aplicadas [28]. Otros movimientos como supinación y pronación del antebrazo no se benefician tanto con la terapia musical, aspecto que puede ser debido a que dichos movimientos no se incluyen en el paradigma musical, mientras que los movimientos de dedos y de muñeca constituyen movimientos necesarios para tocar los dos instrumentos musicales utilizados, y llega a ser una técnica comparable en cuanto a eficacia con la CIMT (una técnica de oro en la rehabilitación motora).

Por otro lado, en la interpretación musical se requieren rápidos mecanismos para controlar patrones de movimiento complejos con un *feedback* auditivo continuo, y

se debe alcanzar una integración auditivo motora en niveles corticales y subcorticales. Esa unión se establece en el aprendizaje y las fases de entrenamiento, y son sin duda mecanismos que juegan un papel muy importante en el proceso de rehabilitación.

### 3.5.4 Plasticidad en el córtex sensoriomotor inducida por MST

#### *Aportaciones de Rojo (2011)*

A partir de los estudios anteriores, comienzan a realizarse otros con pacientes crónicos. En el que se pasa a detallar, se investigan los mecanismos neuronales que se desarrollan en una paciente con un daño cerebrovascular crónico, para mostrar cómo la MST también induce cambios importantes en este tipo de personas, evaluando los resultados con Resonancia Magnética Funcional y Estimulación Magnética Transcraneal (TMS).

La paciente es una mujer diestra de 43 años, que había sufrido un accidente subcortical en la región de la arteria media cerebral 20 meses antes, y carece de conocimientos musicales previos. La fMRI muestra lesiones en el tálamo izquierdo, la cápsula interna y la parte posterior del putamen. En el momento del estudio la mano y el brazo demuestran una paresia moderada. Recibe 20 sesiones individuales de 30 minutos de MST durante 4 semanas consecutivas, con las características de estudios anteriores. Se evalúan antes y tras la terapia las funciones motoras con los test habituales, al igual que se realiza un análisis en 3D de los movimientos (Zebris), junto con TMS y fMRI [31].

La TMS se desarrolla empleando una bobina focal de 8 figuras adjunta a un estimulador. Por otro lado, la fMRI comprende dos experimentos: una tarea motora, en la que el paciente realiza movimientos secuenciales con sus dedos índice y medio de cada mano durante 20 segundos, y la tarea musical, donde el paciente escucha de forma pasiva secuencias monódicas de un piano y pequeñas canciones de forma alternada, conocidas y desconocidas, sin pausas de estimulación, de 15 segundos cada una, en bloques de 6 minutos. Las imágenes se obtienen con un escáner MRI 3 T (Siemens Magnetom Trio).

Se definen 6 regiones de interés (ROIs) en las imágenes anatómicas del paciente para cuantificar la cantidad de píxeles activados en respuesta a la tarea.

En las tareas motoras se observa mejora tras la terapia en alcance, agarre y pinza, asimismo se mejora la frecuencia de movimiento de manos y la precisión de dedos. Los potenciales motores evocados (MEPs) se obtienen del primer músculo interóseo dorsal contralateral, en ambos hemisferios, y en la TMS se encuentran diferencias en su amplitud entre las mano afectada y sana. La fMRI revela activación extendida en la red primaria contralateral sensorio-pre-motora, y en la ipsilateral en la mano afectada. Tras el tratamiento se reducen ambas regiones de activación, pero no se observan cambios para la mano sana. En cuanto al efecto musical, la audición sólo provocaba activaciones en la corteza temporal antes del tratamiento, y se añade la bilateral pero lateralizada hacia la izquierda después, dado que se consigue una relación auditivo-motora.

En resumen, tanto con fMRI como TMS, tras la terapia se observan cambios en la corteza contralateral en pacientes crónicos. Antes del tratamiento además, el

periodo de silencio en el lado afectado era menor que en el sano, demostrando un incremento de excitabilidad en el lado afectado (pérdida de inhibición desde el hemisferio afectado al sano). Con la MRI funcional del movimiento de manos, se muestra un descenso de activación en las áreas contra e ipsilateral sensorio motoras, y regiones secundarias, tras la terapia, restaurando la inhibición transcallosa. Uno de los efectos de la MST, es que se produce una unión dependiente de la tarea entre áreas corticales auditivas y motoras.

### ***Datos aportados por Rodríguez-Fornells (2012)***

En este estudio se explican los mecanismos implicados en las mejoras motoras observadas, y se ofrecen datos sobre la unión motora-auditiva gracias a la MST empleando neuroimagen. Del mismo modo, se intenta comprender la dinámica en los circuitos que favorecen esa unión, y cómo la conectividad funcional puede ayudar a explicar los cambios neuroplásticos que se producen tras la terapia [32].

La interpretación musical es un proceso muy complejo que requiere en muchos casos la integración entre el sistema auditivo, el *feedback* propioceptivo, la información visual y el control motor. Al tocar un instrumento, se necesita una unión entre un sonido musical y el movimiento ejecutado para conseguirlo, de modo que esas acciones motoras pueden crear representaciones internas (copia eferente), que son enviadas de vuelta a las regiones auditivas para evaluar si son apropiadas para conseguir producir un sonido determinado. Estas conexiones hacia delante y hacia atrás entre los sistemas motor y auditivo permiten la ejecución y corrección de movimientos muy rápidos en la práctica musical.

El trabajo se enfoca en un grupo de 20 pacientes crónicos, que sufrieron un accidente con una anterioridad de unos 30 meses, y reciben MST en un programa de 30 min diarios. Se observan mejoras en cuanto a estado de ánimo, reducción de síntomas depresivos, y puntuación en el test ARAT. Se compara con un grupo de control de 14 personas.

Teniendo en cuenta resultados anteriores, se observa que los efectos de mejora en el test ARAT es la mitad para pacientes crónicos, respecto de la mejora obtenida en los agudos. Los crónicos tienen una puntuación inicial mejor, pero el rango de mejora es inferior. Sin embargo, se puede calificar como una técnica con gran potencial para mejorar las habilidades a largo plazo de esas personas.

Por otro lado, la activación motora y de la corteza pre-motora (PMC), puede ser provocada en músicos escuchando melodías o tocado piezas familiares (observable mediante fMRI). Es un hecho que no sólo ocurre en músicos: los programas cortos de entrenamiento también producen cambios funcionales plásticos. Lahav en 2007, explica cómo tras entrenar personas no músicos a tocar melodías de oído durante 5 días, se producen activaciones en regiones pre-motoras cuando escuchan dichas melodías de forma pasiva. Sin embargo, no ocurre con melodías no trabajadas que incluyan los mismos sonidos. Es posible observar reorganización funcional en el proceso de aprender a tocar el piano empleando Estimulación Magnética Transcraneal tras 4 semanas. Por tanto, existen cambios tras un proceso de corta duración, pero los debidos a periodos tan breves de entrenamiento desaparecen cuando el entrenamiento acaba. El entrenamiento a largo plazo puede conducir a patrones de activación más eficientes [33].

La MST provoca cambios neuronales en pacientes crónicos, que pueden ser observados gracias a la fMRI y la TMS. La activación tras la práctica musical es mayor en la parte caudal y ventral de la región PCM, IFG (circunvolución interior frontal) posterior y SMA (Área Suplementaria Motora). Es la primera evidencia de la implicación de la unión auditivo-motora. Es una terapia efectiva en pacientes crónicos y agudos, como ya se conocía, y tiene un impacto directo en la conexión funcional de las redes auditivo-motoras que soportan la percepción musical y el aprendizaje. La idea converge con la de la fuerte activación y conectividad observada en músicos en rutas dorsales y ventrales anteriores en el circuito establecido para el procesamiento de la música.

### ***Resultados por Amengual (2013)***

En este proyecto participan 20 pacientes diestros crónicos con paresia de suave a moderada, que reciben 20 sesiones de MST individuales de 30 min, durante 4 semanas. El grupo de control lo integran 14 pacientes diestros con similares edades, géneros y nivel de educación, sin antecedentes en este tipo de enfermedad. Se evalúan las funciones motoras con ARAT y un sistema de análisis de movimientos computarizados como en anteriores estudios, y además se realiza TMS.

Con la Estimulación Magnética Transcraneal se evalúan los cambios en las representaciones cortico motoras influenciadas por las intervenciones de la rehabilitación, y se obtienen estimaciones sobre la integridad de los caminos activados en las zonas intra-corticales y cortico espinales tras un accidente cerebrovascular [34].

Los resultados hablan de importantes mejoras motoras acompañadas de cambios plásticos en los pacientes crónicos que siguen MST. Los pacientes obtienen mejores puntuaciones en el test ARAT, la frecuencia de movimiento de dedos y calidad de movimiento NIV, como en estudios previos similares. Además se observa mayor actividad en áreas corticales del hemisferio afectado. Como hipótesis, los cambios en la plasticidad están relacionados con la práctica. La adquisición de nuevas habilidades motoras en la extremidad afectada conduce a una unión de áreas cerebrales en la corteza motora, y esa unión auditivo-motora a su vez, potencia la plasticidad de la corteza en pacientes crónicos.

### ***Resultados por Grau-Sánchez (2013)***

Los participantes en este estudio son 9 pacientes afectados en un brazo que han sufrido un ictus con una anterioridad igual o inferior a 6 meses, y presentan una paresia moderada (pacientes agudos). A estos participantes se les proporciona un programa de 20 sesiones individuales de 30 min de MST durante 4 semanas. Por otro lado, participa un grupo de control de 9 personas sanas, que no recibe ningún tipo de tratamiento entre las sesiones de evaluación (un intervalo de 30-40 días). Cada paciente se empareja con uno sano para la valoración, de modo que se considera el hemisferio afectado para ser comparado con el de su pareja en el estudio [27].

La evaluación de funciones motoras en los pacientes enfermos muestran mejoras en el test ARAT, el Arm Paresis Score y el BBT Score, mientras que no se observan cambios en el 9HPT Score. Otro aspecto evaluado es la calidad de vida con la

Stroke-specific Quality of Life Scale, que muestra una mejora de 160 a 194 (los valores min y máx en esta escala son 49/245, respectivamente). Sin embargo, no se observan cambios en los participantes sanos.

Como resultado, el programa MST mejora los aspectos arriba descritos, acompañados de cambios en la organización de la corteza sensorio motora. Las mejoras en los movimientos de la mano en cuanto a fuerza y destreza contribuyen a optimizar el uso funcional de la mano, pero sin embargo, esas mejoras motoras pueden no mostrar su presencia en tareas diarias hasta pasados meses, por ello en este estudio se evalúa un parámetro nuevo, que informa sobre la mejora en la calidad de vida del paciente.

### 3.5.5 Estudio de Van Vugt (2014)

La música tiene un carácter inherentemente social, ya que se puede interpretar una obra perteneciendo a un grupo. En este proyecto la principal novedad es que explora el potencial de la interpretación musical en conjunto durante la terapia, con el fin de saber si puede ayudar a mejorar la rehabilitación precisa motora y el estado de ánimo. Por ello, el protocolo sufre ciertas variaciones para adaptarlo a la consecución de sus objetivos: al querer contribuir a la rehabilitación motora de precisión, se trabaja tan sólo con el piano.

Se tiene como hipótesis de partida que la música puede ser una herramienta poderosa para promover la unión social en una sesión de rehabilitación, y es cierto que los participantes en este tipo de terapia parecen estar más implicados y son más cooperativos. La idea de partida es que el aspecto de la música que puede aumentar la participación social es la práctica musical en conjunto [35].

Participan 28 pacientes en rehabilitación neurológica temprana sin conocimientos previos de música. Aprenden a tocar ejercicios de dedos sencillos y canciones para niños en el piano durante 10 sesiones de media hora, que se reciben durante 3-4 semanas. Primero la terapia es individual y luego por parejas, que se organizan en dos grupos que siguen dos procedimientos diferentes: en el primero tocan de forma simultánea y en el otro de forma consecutiva (las primeras 3 sesiones son individuales, mientras que las 7 restantes por parejas). Cada participante utiliza su teclado MIDI individual conectado a un ordenador portátil por USB, y el sonido simulado es el perteneciente a un piano Steinway con un volumen elevado, independientemente de la fuerza con la que se presionan las teclas, ya que no es un parámetro que se esté analizando.

Los dos grupos de participantes interpretan la misma selección de ejercicios de dedos y canciones infantiles. Además, se realiza una batería de test antes y después del programa, para evaluar los cambios aportados por el trabajo realizado. Uno de los motivos de exclusión para participar es haber recibido formación musical durante más de 4 años. Al comienzo de cada sesión se tocan ejercicios simples de dedos como escalas ascendentes y descendentes de 5 sonidos y otros patrones sencillos, solamente con la mano afectada. Después se interpretan canciones infantiles, y si se alcanza un nivel suficiente se abordan canciones tradicionales. En las sesiones por parejas donde ambos tocan a la vez, cada uno toca una voz de la misma pieza. Los pacientes más afectados reciben inicialmente asistencia por el terapeuta, que les ayuda a mover sus dedos.

Para evaluar la recuperación se realizan test como el 9HPT, y medidas de velocidad y regularidad en la pulsación de dedos: ritmo en la pulsación de pulgar a índice (para lo que se debe teclear de forma regular a 69 bpm durante un minuto), y velocidad de pulsación máxima con el índice y el dedo corazón (medido durante 14 segundos). También se analiza el estado de ánimo con el Profile of Mood States (POMS), que los propios pacientes evalúan (tiene cuatro categorías: depresión/ansiedad, fatiga, energía y hostilidad), y con una escala de caras, que permite obtener una estimación rápida sobre el estado de ánimo de los pacientes tanto durante la terapia, como desde la última sesión.

Se hallan mejoras en la pulsación sincronizada de dedos, y en el control preciso motor en el 9HPT, siendo la puntuación para este último aspecto aún mayor para los pacientes que tocan en turnos, que parecen aprender de la observación, prestando atención a la ejecución del terapeuta en primer lugar y después a la de otros pacientes. Sin embargo, no se mejora la pulsación de los dedos índice y corazón, lo cual contrasta estudios anteriores: parece observarse una mejora en velocidad en la primera mitad de la terapia, pero se retrocede después.

Por otro lado, las sesiones en parejas pueden reducir el tiempo invertido por los terapeutas, y tienen efectos en el estado de ánimo, ya que los test revelan una disminución de fatiga y depresión. Además, durante el tratamiento, los pacientes que tocaban en el grupo de forma consecutiva evaluaban de forma visual con más empatía a sus compañeros. Por ello, la rehabilitación basada en música puede ayudar a la recuperación motora y mejora del estado de ánimo no sólo de forma individual, ya que la mera observación aporta importantes beneficios [35].

Otra explicación alternativa de por qué se mejora más en el grupo por turnos, es que los sonidos simultáneos confunden a los pacientes, hecho que podría solventarse proporcionando auriculares individuales para escuchar los sonidos propios más fuertes. Otro posible motivo es que en el grupo de práctica conjunta las tareas solicitadas abrumaban a los pacientes: tocar ciertos sonidos y además a la vez que el compañero (mucho más exigente que solo), siendo un objetivo demasiado complejo.

En cuanto a la premisa de que tocar en conjunto incrementaría la unión social entre participantes y que ese hecho conduciría a una mayor rehabilitación motora, no hay evidencias que lo constaten, pero en realidad en los grupos más homogéneos la unión social aumentó.

### 3.5.6 Aportaciones de Villeneuve (2014)

En este estudio se presenta un programa de entrenamiento al piano ligeramente diferente al del protocolo MST antes descrito, ya que combina sesiones estructuradas y supervisadas con práctica en el hogar. La terapia MST emplea un paradigma de aprendizaje para soportar la rehabilitación motora, partiendo de la premisa de que el *feedback* auditivo puede facilitar el aprendizaje y la ejecución, y la terapia resulta más atractiva gracias al contexto musical. Los estudios anteriores no demuestran si los efectos pueden mantenerse a largo plazo, y constan de protocolos de instrumentos mixtos (piano y percusión) en sesiones diarias supervisadas, difíciles de trasladar al hogar [36].

Participan 13 enfermos crónicos que sufrieron un ictus con una anterioridad de al menos 6 meses, que no presentan un grado moderado-alto de daño cognitivo. También se excluyen personas con experiencia profesional musical, o que han tocado algún instrumento al menos 1 hora diaria durante los últimos 10 años. El plan de trabajo implica 3 sesiones individuales de 1 hora durante 3 semanas, sumando en total 9 sesiones. Aquellas que son supervisadas se complementan con un programa de 2 días a la semana en casa (30 minutos/ sesión). Se evalúan las destrezas manuales finas y gruesas, la coordinación de movimientos, y el uso funcional de las extremidades superiores, antes y después de la terapia.

Las piezas requieren el movimiento de los 5 dedos de la mano afectada, sea la derecha o la izquierda, incluyendo el mismo número de repeticiones y secuencias similares. Están compuesta por un músico experimentado, con el deseo de que sean agradables siguiendo las leyes de armonía básica, de corta duración y fáciles de recordar. Las piezas se visualizan con Synthesia, un programa adaptado para personas que no saben leer una partitura: se muestra la secuencia de teclas a pulsar mostrando un punto azul bajando desde la parte superior de la pantalla hacia el lugar correcto en el teclado. El programa se pausa hasta que el participante pulsa la tecla correcta. Se utiliza un teclado Yamaha con pulsación, y se recibe *feedback* con Synthesia y gracias a la comunicación verbal del terapeuta, mientras que en casa se emplea un teclado enrollable y flexible (Hand Roll Piano, 61 K).

Se incluyen 9 piezas musicales en orden de dificultad creciente: el nivel 1 implica el movimiento de dedos consecutivos; el 2 incluye intervalos de tercera, cuarta y quinta, con movimientos no consecutivos de dedos; y el 3 incluye acordes, lo cual implica 2 dedos tocando a la vez. Con cada nivel, se incluyen 3 piezas musicales que incluyen un número mayor de teclas y cambios en la dirección de la melodía. Asimismo, la velocidad de ejecución crece de 30 golpes por minuto (bpm) a 60, incrementándose tras 3 intentos consecutivos en saltos de un 10%. En casa, se practican pequeñas secuencias y extractos de las mismas piezas empleadas en la sesión, así como 30 ejercicios escritos donde cada dedo representa un número (1=pulgar, 5=meñique). Los pacientes deben hacer un informe con la duración de su práctica y el contenido de la misma.

Sólo 5 participantes habían tocado un instrumento anteriormente durante 1-5 años antes de los 18, salvo uno de ellos que practicaba de forma ocasional. Cada pieza se ejecuta de media unas 25 veces antes de alcanzar el 80% de precisión a 60 bpm. En casa la media de práctica es de 28 min/ sesión.

Se toman medidas de la ejecución incluyendo el número de errores cometidos y el tiempo empleado. Se utilizan los test BBT y 9HPT para evaluar las destrezas manuales gruesas y de precisión, en ese orden. El uso funcional de la extremidad superior se evalúa con la versión de 6 ítems del test Jebsen, y para la coordinación de movimiento de brazo y dedos se utilizan el Finger to Nose Test (FTN) y el Finger Tapping Test (FTT), respectivamente. También se recoge *feedback* con un cuestionario posterior, donde se pudo conocer que todos disfrutaron del programa y se sintieron especialmente motivados en las sesiones supervisadas (el hecho de presentarse como un juego añade el sentido de éxito y resulta gratificante).

El programa estructurado tiene diferentes grados y criterios de progresión, y puede seguirse fácilmente por terapeutas que no tienen conocimientos musicales.



Las mejoras se mantienen 3 semanas tras el programa, por lo que se ofrecen resultados a largo plazo, además consistentes con los estudios de pacientes agudos. La mejora en la destreza puede ser debida al piano, que implica la práctica repetitiva y de diferentes dedos, promoviendo la velocidad y precisión. Además se establece una activación motora-auditiva, gracias al poder del *feedback* auditivo, y se manifiesta un aumento funcional de las extremidades. Hay diferencias importantes en puntuaciones y cambios de puntuación según el perfil del participante, y es importante el punto donde se localiza el accidente cerebral (en este caso sufren un accidente subcortical todos). Los que tienen un grado medio de daño muestran las mayores mejoras, pero se trata de una intervención factible para pacientes crónicos con diferentes niveles de recuperación motora. Es una técnica que implica pocos riesgos, aunque en algún caso se pueda provocar cierta fatiga y dolor en los brazos, y resulta esencial monitorizarla correctamente.



**Figura 3-2.** (A) Sistema para el entrenamiento supervisado; (B) pantalla con la interfaz de Synthesia; (C) piano enrollable para el uso en el hogar [36].

### 3.5.7 Otras terapias con música

Como ya se ha indicado con anterioridad, la música puede tener un papel importante en la regulación de ciertos aspectos como el humor, la atención o la propia identidad personal. En el proceso de la audición se activa una red de regiones temporales, parietales, frontales y límbicas, ligadas al procesamiento de la excitación, atención, semántica y sintáctica, la memoria y las emociones. Se trata de un proceso complejo que conduce a una experiencia subjetiva. Algunas terapias tan sólo han aprovechado los beneficios de la música desde un plano menos activo, es decir, desde la audición. No son terapias enfocadas hacia la rehabilitación de

pacientes que puedan haber sufrido daños motores, pero es importante tener en cuenta otros aspectos que pueden ayudar a mejorar e incluso moldear.

En el estudio conducido por Forsblom en 2009, participan 60 pacientes que han sufrido una isquemia cerebral media, que son repartidos de forma aleatoria en tres grupos: uno que escucha música, otro de lectura-escritura, y un último grupo de control. Se trata de pacientes agudos, que reciben terapia aproximadamente una semana tras su accidente cerebro vascular. Los participantes de los 2 primeros grupos reciben archivos de audio o audio-libros para escuchar durante 1 h diaria durante 2 meses, y realizan un test neuropsicológico, que incluye percepción verbal, espacial, percepción musical, memoria, atención y tareas de ejecución, junto con un cuestionario de estado de ánimo a los 3 y 6 meses tras el accidente. Además, se realizan entrevistas por un lado a 20 pacientes 2 meses después tras el comienzo del tratamiento, para analizar cómo valoraban la contribución de la tarea musical para el proceso de recuperación, y por el otro a los enfermeros, para saber qué valor creían que la tarea había aportado.

Tras un accidente de este tipo, podemos hablar de 3 fases [37]:

- *Fase de shock*: constituida por los primeros tres días. En este caso concreto, la mayoría de los pacientes remarca que la música les ayudó a calmarse, relajarse y dormir mejor.
- *Periodo de reacción*: se extiende entre 1-3 meses, tiempo en que el paciente desarrolla mecanismos de defensa y etapas de ansiedad. En este estudio, los pacientes remarcan la actitud positiva que les incitó la música, y que eso les permitió focalizar su energía en trabajo productivo y tener una buena actividad motora. Las enfermeras también resaltan una disminución de ansiedad y una mejor comunicación.
- *Fase de recuperación*: supone entre 2-12 meses tras la crisis. Los participantes indican que gracias a la música pudieron evocar muchos recuerdos y pensamientos sobre su pasado y futuro. Los enfermeros aseguran que de forma global, la música resultó ser una herramienta interdisciplinar, que les permitió conocer de forma más profunda los pensamientos y sentimientos de los pacientes.

Los resultados hacen visible cómo la música tiene una influencia muy importante en la regulación de las emociones. Se consigue un menor estado de depresión generalizado y mejor puntuación en el cuestionario de estado de ánimo Profile of Mood States, junto con una mejora significativa en la recuperación de memoria verbal y capacidad de atención, sobretodo en el grupo de escucha.

### 3.5.8 Una perspectiva global

Hacer música constituye un proceso de información multimodal. Las dinámicas descritas ofrecen una excelente oportunidad para adaptar diferentes actividades como tocar un instrumento, moverse en sincronía con un ritmo, o escuchar música con fines terapéuticos. A modo de conclusión, se hace un pequeño recorrido resumen sobre las aportaciones antes detalladas, destacando los puntos de mayor interés.

El objetivo de la MST es mejorar la destreza de las extremidades superiores, a partir de la práctica de algún instrumento [6], y uno de los principios básicos es

seguir un programa de alta intensidad. Por otro lado, la integración multimodal impulsa la unión entre lo auditivo y lo motor donde el sonido es el *feedback* para reforzar el movimiento, corregir los errores, ajustar la precisión y perfilar representaciones motoras. Las terapias son adaptables en función del cómo de afectado está el paciente, y la progresión que muestra.

Además de la discapacidad motora, los pacientes con daños neuronales tienen una alta probabilidad de sufrir consecuencias psicológicas, algo que puede tener un efecto negativo para la recuperación, y en ese sentido es importante destacar que la música funciona como una herramienta única para regular respuestas emocionales, ya que es una experiencia motivadora y gratificante, a la vez que permite aprender una nueva destreza. La música también resulta de ayuda para la relajación y dormir [37], y la MST puede reducir la depresión y la fatiga, y mejorar la calidad de vida en pacientes que han sufrido un ictus [27] [35].

La MST ha resultado de éxito mejorando las destrezas motoras de pacientes agudos que sufrieron un accidente cerebrovascular. Fueron Schneider en 2007 y Altenmüller en 2009, quienes compararon la efectividad frente al tratamiento convencional, observando que tan sólo los pacientes en el MST mejoraron en frecuencia, velocidad y suavidad de movimientos de dedos y manos, así como en sus puntuaciones en tiempo en los test de funciones motoras. Más adelante en 2011, Rojo ofrece datos sobre un paciente que escucha de forma pasiva melodías desconocidas y otras que practica, y el resultado es que antes de la MST sólo ciertas regiones se activaban y tras la terapia las regiones motoras también lo hacen. Rodríguez-Fornells en 2012 evidencia que el *feedback* auditivo es una parte esencial de la terapia y que contribuye a la activación de las ya mencionadas regiones motoras. Otros han hecho públicos resultados tras la evaluación con TMS, donde se observan cambios en la corteza sensorio motora, tras 4 semanas de trabajo en pacientes crónicos, como Amengual en 2013. Grau-Sánchez en 2013 observa lo mismo en pacientes agudos, por lo que uniendo ambos estudios, se puede afirmar que la MST puede inducir cambios funcionales asociados a procesos de reorganización cerebral.

Van Vugt en 2014 aplica la terapia por parejas en vez de en sesiones individuales, de modo que en un grupo la dinámica es tocar de forma conjunta y en el otro por turnos, observando una tendencia más favorable en segundo caso. Villeneuve en 2014 evalúa su programa en el hogar, mostrando que las mejoras en la paresia de pacientes crónicos se mantienen en el tiempo. Friedman en 2014 indica que el CyberGlove puede ser una herramienta alternativa para tratar la paresia en estados crónicos, y se revelan mejoras en funciones motoras en comparación con la terapia convencional.



# REHABILITACIÓN CON REALIDAD VIRTUAL

Las tecnologías de Realidad Virtual y Realidad Aumentada permiten crear entornos flexibles de desarrollo y entrenamiento con fines terapéuticos. Además, la información digital que recibe el usuario pasa a ser interactiva. Es importante tener clara la diferencia entre ambas vertientes. Por un lado, en Realidad Virtual, todos los elementos que observa el usuario son simulados. Por otro, el concepto de Realidad Aumentada extiende el de Realidad Virtual, ya que incluye tanto elementos simulados como reales, ofreciendo una realidad mixta en tiempo real.

Dicha terminología ya existía en los años 80, pero gracias a las tecnologías emergentes constituyen un asunto de actualidad en constante exploración. Las expectativas con dispositivos como Oculus Rift, Kinect, Leap Motion o los guantes inteligentes de datos comienzan a ser importantes, dado además el coste bajo y la facilidad de acceso para el usuario medio. Uno de los campos explorados con estas tecnologías es la rehabilitación de personas con problemas musculares.

En el momento de plantear el juego de Realidad Virtual con fines terapéuticos, hay que tener presentes una serie de objetivos a cumplir [38]:

- Ofrecer alta interactividad
- Que su naturaleza sea inmersiva y disponga de un alto componente para el entretenimiento.
- Presentar diferentes grados de dificultad para el paciente: poder almacenar la información relevante en el historial del participante y adaptar los ejercicios a las necesidades personales.
- Ofrecer una amplia diversidad.
- Que sea portable y fácilmente accesible para cualquier persona.
- Sencillez de uso (por ejemplo con un sistema inalámbrico).

Y es que uno de las cuestiones básicas en la rehabilitación es la repetición masiva, aspecto que puede resultar poco atractivo para los pacientes. La práctica y los elementos de *feedback* son requerimientos esenciales para conseguir una recuperación motora máxima en enfermos con déficits por lesiones del sistema nervioso. Sin embargo, si esa repetición pasa a ser imprescindible para conseguir determinados objetivos en un juego, el paciente puede llegar a olvidar que se trata de un proceso terapéutico. Muchos investigadores han demostrado que en la recuperación de tareas motoras es importante la cantidad, duración e intensidad del entrenamiento. Además, 3-4 semanas de entrenamiento intensivo hace que la zona cortical se extienda y se previene una pérdida mayor.

Jack destaca que el entrenamiento con Realidad Virtual permite incrementar la duración, frecuencia e intensidad de la terapia con programas semiautomáticos. Además, el acceso cada vez es más sencillo a dichos medios, y los datos entre terapeuta y paciente pueden transferirse rápidamente. En cuanto a motivación, los ejercicios pueden conseguir que el paciente se involucre, y se aportan beneficios en destreza, fuerza y función [39].

#### 4.1 Dispositivos hápticos

Uno de los objetivos básicos en los juegos de Realidad Virtual y Realidad Aumentada, por su propia naturaleza, es conseguir la interacción del paciente con el entorno que visualiza. Son numerosos los estudios que han incluido dispositivos hápticos para aumentar el *feedback* del paciente y mejorar esa sensación de inmersión. Ese hardware adicional a menudo se combina con otros elementos, como rastreadores de movimiento, sistemas que serán analizados en el siguiente apartado.

Los posibles dispositivos utilizados son muy diversos, y se puede incluir desde una simple pelota de goma o pantallas táctiles, hasta complejos guantes de datos. A modo de ejemplo, Hsian-Shen tenía como objetivo en su estudio conseguir la rehabilitación de la mano, para lo que diseñó un sistema consistente en una pelota de goma, a través de la cual se dirige el juego, variando la presión. Los 5 movimientos que se intentaban mejorar eran: gancho, agarre cilíndrico y esférico, y prensión lateral y de dedos. Es un sistema que consta de tres elementos principales: un dispositivo que detecta los cambios de presión que producen datos analógicos que llegan al terminal de procesamiento de señal (ICubeX), y el software Quest3D [38].

La mesa Microsoft Surface reconoce 3 contactos diferentes y sus respectivas orientaciones respecto de la superficie de la mesa, e identifica dedos por separado. Boulanger muestra un ejemplo de aplicación para mejorar el movimiento de la mano, que implica doblar y desdoblar dedos, ejercicios de flexión y extensión de muñeca [40]. Otros dispositivos utilizados en la rehabilitación son PointAssist o HandTutor (un guante que ofrece movimientos de flexión y extensión de dedos y muñeca de forma intensiva).

En cuanto a la integración conjunta de varios dispositivos, encontramos VirtualRehab, un producto VirtualWare para ordenador que emplea Microsoft Kinect para capturar el movimiento de pacientes y permitirles jugar. Lo que ofrece es un conjunto de juegos centrados en el balance, la coordinación y la posición de los usuarios, que emplean programas diseñados para tratar determinados problemas físicos. Además, se guarda un registro de los resultados. Otro ejemplo es RE-MOVIEM, un proyecto reciente utilizado en la Asociación de esclerosis múltiple de Castellón, que promueve el movimiento de diferentes partes del cuerpo.

Más complejos son los guantes como Rutgers Master II-ND (RMII) o el famoso CyberGlove. Subramanian desarrolla un protocolo experimental interactivo e inmersivo empleando la plataforma CAREN (Computer Assisted Rehabilitation Environment), que ofrece una integración en tiempo real en 3D de mano, brazo y cuerpo. El sistema incluye un head mounted display, un sistema Optotrak Notion

Capture, un CyberGlove y una tarjeta gráfica que da una representación estereoscópica de alta velocidad del entorno creado.

El objetivo es trabajar el movimiento repetitivo del brazo, para lo que se diseñan los botones de un ascensor simulado: el usuario debe alcanzar una serie de puntos en distintas áreas de trabajo y recibe un *feedback* con los resultados de la ejecución. Los botones están en 2 filas de 3, y son cuadrados de 6 cm de lado, colocados en una pared virtual, que requieren diferentes combinaciones de movimientos para ser señalados. El protocolo inicial incluye 72 intentos, 2 veces la cantidad para el aprendizaje motor, por ello considerado intensivo, y se reciben instrucciones verbales sobre los botones a alcanzar, al igual que por cambios en el color. Asimismo, se recibe un *feedback* positivo con sonido y color cuando el movimiento se ha realizado en tiempo y lugar, y otro negativo cuando el movimiento no es rápido o preciso [41].

En este punto, cabe mencionar otros dos test muy empleados para valorar la recuperación motora, que son empleados por Jack en su estudio [39]:

- *La Evaluación Fugl-Meyer*: está diseñada para valorar la capacidad motora, el balance, la sensación y unión de funcionamiento en pacientes que han sufrido un accidente cerebro vascular. Se aplica para describir la recuperación motora y planificar y asesorar un tratamiento.
- *Test de funciones Jebsen*: evalúa las habilidades motoras y la funcionalidad de la mano durante la ejecución de actividades de la vida diaria.

Jack desarrolla un sistema de rehabilitación empleando CyberGlove y RMII, dispositivos que deben ser calibrados cuidadosamente antes de su uso. Se incluyen 4 rutinas de rehabilitación para distintos parámetros de movimiento de la mano: rango, velocidad, fraccionamiento y fuerza. El primero es para mejorar la extensión y flexión de dedos; en el de velocidad el paciente debe abrir y cerrar la mano lo más rápido posible; en la rutina de fraccionamiento se debe flexionar un dedo lo más que se pueda con los otros extendidos, y se trabaja por separado en cada dedo; por otro lado, el de fuerza trabaja mejorar el agarre. El paciente es informado de los dedos implicados en cada rutina gracias a la iluminación de los mismos. Se utilizan distintos niveles de dificultad en función de la ejecución para incrementar la motivación del paciente e individualizar los ejercicios. Para todas rutinas, excluyendo la de fuerza, se emplea RMII. Las mejoras observadas pueden deberse a la naturaleza o la intensidad del entrenamiento o de las tareas del día a día, pero se desconoce si son transferibles a la vida diaria. Los resultados del dinamómetro muestran incremento de fuerza, y también hay cambios en el test de mano Jebsen [39].

Es interesante mencionar que en el ejercicio de individualización de dedos, Jack emplea un piano, en que el paciente debe mover el dedo activo para que descienda la tecla deseada, y solamente esa, que pasa a ponerse verde. Al final del movimiento se calcula el tiempo, y si es mayor o igual al objetivo sólo se mantiene esa tecla bajada. De otra forma, otras permanecen bajadas y se ponen rojas para mostrar qué dedos se han unido al movimiento. Estas terapias han comenzado a extender su campo de actuación, incluyendo otras disciplinas como la música. Algunos ejemplos de la aportación que esa unión realiza se pasan a detallar en el siguiente apartado.

### 4.1.1 Realidad Virtual con música

Antes de diseñar estos sistemas, hay que tener en cuenta la parte que la música puede aportar para la recuperación de los pacientes. Esta disciplina tiene otra visión de partida: las sesiones de musicoterapia incluyen improvisación, composición y reproducción, así como audición de sonido y melodías, imaginación y aprendizaje a través de la música y sus elementos (sonido, ritmo, melodía y armonía). Según la Asociación Americana de Musicoterapia, el objetivo de la terapia musical no es enseñar a los pacientes música, sino ofrecerles la oportunidad de comunicarse con personas, expandiendo las posibilidades físicas y el desarrollo de las capacidades cognitivas [42].

En estos proyectos se incluyen instrumentos musicales, como teclados, comparables a los reales o más sencillos, con características determinadas.

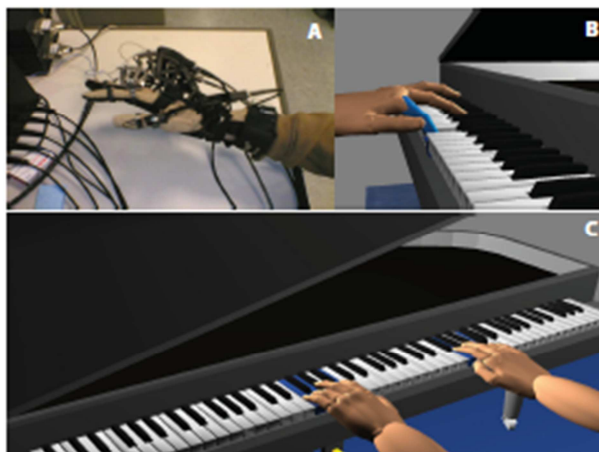
En el teclado musical que plantea Dionísio, las teclas se reemplazan con cartas de colores con símbolos gráficos, que representan una nota musical con un timbre determinado. Además, un cubo virtual coloreado se adjudica a cada carta. A diferencia del teclado convencional, que consta de teclas fijas y no intercambiables, en este sistema el terapeuta puede imprimir cartas de diferentes tamaños y colocarlas de diferentes formas, en función del ejercicio motor deseado. Las cartas son identificadas con procesamiento de imágenes, tras ser capturadas por una webcam. Los sonidos se escuchan cuando hay contacto con el instrumento (es suficiente con colocar la mano en el centro de la carta), y permite al usuario crear melodías, guardarlas y usarlas como parte de nuevas composiciones, a un bajo coste. Este prototipo se ha puesto en práctica con un niño con parálisis cerebral, sin problemas cognitivos.

Más complejo es el piano simulado que detalla Adamovich, como parte de un entorno robótico virtual de alta fidelidad diseñado para entrenar manos y brazos de personas con hemiparesia. Se trata de un piano simulado que ofrece *feedback* visual, auditivo y táctil comparable a un piano real, para poder entrenar tanto la mano (y el movimiento individual de dedos) como el brazo, integrando las fases de transporte y manipulación. Se presenta en perspectiva de primera persona, ya que es más fácil e intuitivo procesar la información observando las propias manos que desde un ángulo de tercera persona. Además, se cuenta con asistencia háptica adaptable para individuos más afectados, integrando el CyberGrasp, un exoesqueleto que facilita la extensión de dedos situándolo en el dorso de la mano, mientras se realiza fuerza en cada dedo de forma individual. El sistema soporta el uso de CyberGloves, que se combina con CyberGrasp, y para los brazos se emplea también el rastreador Ascension Flock of Birds (FOB). Los periféricos se conectan a un PC, y el entorno se desarrolla con Virtools.

En las pruebas con 4 participantes, se entrenaba 90 min al día durante 8-9 sesiones, con variaciones según el grado de los daños de cada paciente. Cada uno de ellos mostró mejoras en medidas cinemáticas durante sus actividades de entrenamiento, y en los test clínicos. El piano dispone de un teclado con un rango completo de notas sencillas, de modo que se precarga en un array una lista de ficheros .wav y al pulsar cada tecla suena el archivo correspondiente. Mediante un fichero se puede preestablecer la secuencia de teclas que define una melodía, y con otro se puede configurar el orden de las canciones y el tiempo de terapia. Incluye



melodías y escalas para ser interpretadas con una o dos manos, de 5-10 sonidos, que primero se escuchan y luego el usuario debe repetir, presionando la nota que se ilumina (con el dedo iluminado, en caso de emplear un guante de datos). Un algoritmo ajusta la dificultad de la tarea en función de la ejecución del sujeto, y gracias a esa variación, se consiguen mejoras en la adquisición de destrezas y la neuroplasticidad [43].



**Figura 4-1.** Piano virtual simulado presentado por Adamovich: **(A)** combinación de CyberGrasp con el guante CyberGlove; **(B)** aspecto visual del software; **(C)** perspectiva virtual en primera persona [43].

Los factores más importantes para recuperar la función motora son la práctica repetitiva de movimientos y la intensidad. El hecho de reforzarlo con música, hace que se mejoren las conexiones corticales, y por otro lado, gracias a las simulaciones de Realidad Virtual es posible transformar la dificultad de las tareas según la tasa de éxito de los participantes y la mejora que se registre en la ejecución.

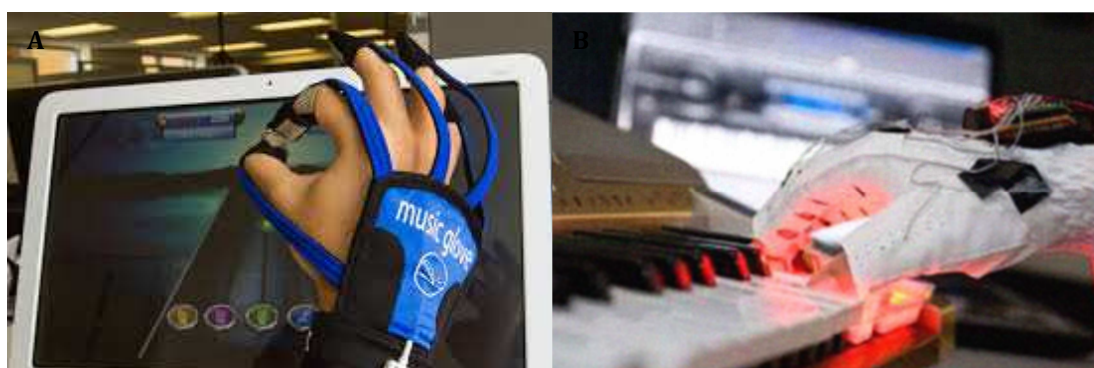
Friedman incluye en su estudio el MusicGlove, un guante de datos de bajo coste, similar a HandTutor, pensado para ser empleado en el hogar, ejecutando movimientos de manos. Contiene 6 LEDs, uno en cada dedo y otro en la unión proximal entre falanges en el lateral del dedo índice. Cuando el LED del pulgar toca uno de los otros cinco, se registra un evento. La interacción con el ordenador se realiza mediante puerto USB. La música es el medio para guiar los ejercicios y conseguir la recuperación cuantitativa de movimiento, y se requiere la ejecución de movimientos funcionales como agarre de pinza y oposición de dedos para tocar notas musicales. Se evalúa en 10 pacientes crónicos: es útil para personas con una descoordinación media-alta, y ofrece información sobre la destreza manual.

En este experimento se desarrolla un software que está basado en Frets on Fire, un juego de código abierto similar a Guitar Hero: en la ejecución se deslizan 5 bloques por la pantalla (asociados a 5 notas diferentes) de arriba a abajo. Cuando un bloque toca la parte baja, el usuario dispone de 300 ms para tocar el pulgar con el LED del dedo específico asociado a ese sonido. El movimiento de las notas se sincroniza con una canción (el listado de canciones está adaptado a la edad media de los pacientes) para dar la sensación de interpretar la melodía, y se configuran diferentes niveles de dificultad. Musicalmente, se trata de tocar una escala pentatónica, típica de la música de Rock y Blues. Al finalizar, se muestra el total de

notas correctas, el total por traste y la media de cómo de cerca se ha estado de conseguir una ejecución correcta en tiempo cuando se registran errores [44].

Otro ejemplo de estudio que incluye elementos hápticos es el detallado por Markow en 2010. El sistema empleado es Mobile Music Touch (MMT), un sistema de instrucciones musicales inalámbrico que se compone de unos guantes y un dispositivo móvil habilitado por Bluetooth, como por ejemplo un teléfono móvil. Originalmente, el MMT consistía de un guante inalámbrico con motores que vibran en cada dedo y un teclado conectado a un ordenador portátil mediante USB. Bajo cada tecla hay diodos LED que pueden iluminarse con un programa de control: el software envía datos por un lado al teclado para especificar qué tecla iluminar y por otro al guante vía Bluetooth, para indicar qué dedo debe vibrar. Los pasajes musicales a aprender se cargan en el dispositivo móvil y se ejecutan mientras el usuario desarrolla otras tareas, de modo que a la vez que se escucha cada sonido, se activa el vibrador correspondiente en el guante para saber qué dedo debe emplearse para conseguir tocar esa nota.

Este sistema se utiliza para la rehabilitación de manos de personas con tetraplejía como resultado de un daño en la médula espinal (Spinal Cord Injury, SCI). La práctica activa se extiende durante 4 semanas, con 3 sesiones de 30 min semanales, y se determinan mejoras en test clínicos como el Grasp and Release. Debido a la naturaleza del estudio piloto, no se pudo saber si las mejoras eran consecuencia de la estimulación por vibración, por el hecho de tocar el piano y la música, o por una combinación de dichas cuestiones [45].



**Figura 4-2.** (A) Guante de datos MusicGlove [44]; (B) sistema Mobile Music Touch [45].

Por último, no se puede perder de vista que para lograr que la rehabilitación sea efectiva, y se consiga realizar una práctica intensa y repetitiva, es importante tanto que el terapeuta anime al paciente como que los pacientes se sientan motivados. El sistema musical de Realidad Aumentada que desarrolla Viriyasaksathian parte de esa premisa: el efecto de la música es determinante en el tratamiento. Se utiliza una combinación entre el juego simulado, el *feedback* que ofrece la tecnología y los efectos que desprende la musicoterapia. Se emplean señales EMG (electromiografía), que se adquieren y procesan, y tras aplicar un filtro de predicción lineal, se puede afirmar que el efecto de la música ayuda a incrementar la atención [46].

## 4.2 Dispositivos para el control de gestos

Son numerosos los sistemas de rehabilitación utilizados hasta ahora para facilitar el acceso a la terapia de personas enfermas, donde destacan los que emplean rastreadores de movimiento y tecnologías robóticas avanzadas. alguna de las ventajas del uso de dispositivos para el control de gestos, es que los terapeutas no necesitan preocuparse sobre el daño físico durante el tratamiento, ya que siguiendo las instrucciones, las posibilidades de lesión son pequeñas, y que la motivación se potencia con el desarrollo de juegos divertidos.

En cuanto a los citados rastreadores, son utilizados para para el control de gestos, y aparecen en la industria de los videojuegos en torno al año 2000, con productos como EyeToy de PlayStation. Posteriormente crece el número de juegos donde el usuario requiere una interacción mayor con la consola que la de presionar botones, como mover su cuerpo para conseguir ciertos objetivos. Algunos ejemplos de uso llegan de la mano de dispositivos como WiiMote, Wii MotionPlus and Wii Balance Board de Nintendo, Kinect de Microsoft y PlayStation Move y Eye de Sony (vídeo cámaras, sensores de profundidad, acelerómetros, sensores de presión...) [47].

Las tecnologías que permiten el control de gestos son relativamente recientes, y conduce a nuevas formas de interacción que antes sólo eran imaginables en la ciencia ficción. Es necesario que se analicen muy bien las necesidades del usuario para poder gestionar dispositivos que hasta ahora se controlaban de forma más tradicional. Hoy día, están muy presentes en videojuegos y aplicaciones interactivas para el entretenimiento del usuario.

### 4.2.1 Comparación de dispositivos comerciales

Existen diferentes opciones comerciales en el mercado para diseñar proyectos donde el control de gestos es un elemento esencial para el control. Algunos de los más relevantes son Wii Remote, Microsoft Kinect, Asus Xtion Sensor, MYO Gesture Control, el sistema Intel Real Sense o el controlador Leap Motion, con el que se han desarrollado los juegos recogidos en esta memoria. A continuación se detallan las características más destacables de cada dispositivo, y se realiza una breve comparativa.

- *Wii Remote*: es un dispositivo cuyo uso resulta muy intuitivo, que permite detectar movimiento en el espacio y seleccionar objetos en la pantalla. Consiste en una barra de sensores de control remoto, similar a los mandos tradicionales para videojuegos, pensado para ser utilizado con una sola mano. A partir de los sensores ópticos y el acelerómetro se puede conocer la posición, velocidad y aceleración en los tres ejes.
- *Microsoft Kinect*: este dispositivo permite al usuario controlar e interactuar con la consola sin necesidad de mantener contacto físico con el controlador tradicional, a través de una interfaz de usuario que reconoce comandos tanto de gesto como de voz. Entre sus elementos característicos se puede encontrar una cámara RGB, un sensor de profundidad y un micrófono. La principal ventaja del dispositivo es su gran alcance, y que ofrece captación de movimiento del cuerpo entero en 3 dimensiones.

- *Asus Xtion Sensor*: inicialmente comercializado para juegos y aplicaciones interactivas. Incorpora un sensor de movimiento que permite detectar gestos y capturar el cuerpo humano en tiempo real. Entre sus elementos principales se incluye una cámara RGB, un sensor de infrarrojo, un detector de profundidad y un micrófono.
- *Controlador de gestos MYO*: es un dispositivo electrónico con forma de pulsera, que puede capturar la energía generada por los músculos y transformarlo en información. Incorpora un conjunto de sensores de electromiografía (EMG) que detectan la actividad eléctrica del antebrazo, un giroscopio y un acelerómetro.
- *IntelReal Sense 3D*: dispone de una cámara de profundidad, una cámara web en alta definición, un proyector láser de infrarrojo y micrófonos. El rango de profundidad es de 1.5 metros, y se pueden obtener tasas de hasta 60 tramas por segundo con la cámara de alta definición.
- *Controlador Leap Motion*: proporciona información sobre posiciones discretas, gestos y movimiento, con alta precisión en una proximidad cercana. Dispone de dos cámaras monocromo y 3 LED de infrarrojo. Puede llegar a capturar 200 tramas por segundo de datos y su campo de visión es en forma de pirámide invertida.

**TABLA 4-1.** CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE DIFERENTES DISPOSITIVOS COMERCIALES EMPLEADOS PARA LA DETECCIÓN DE GESTOS.

Dispositivo	Wii Remote	Microsoft Kinect	Asus Xtion Sensor
Aspecto			
Coste	34.90 €	147.07 €	182.68 €
Precisión	Pequeña	Media	Media
Arquitectura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acelerómetro</li> <li>• LED infrarrojo</li> <li>• Altavoz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámaras RGB y de infrarrojo</li> <li>• Sensor profundidad</li> <li>• Audio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámaras RGB y de infrarrojos</li> <li>• Audio</li> </ul>
Procesador	Broadcom BCH2042	XCPU Xenon Xbox360	Intel X86 y AMD
Área de operación	0.8- 6 m	0.5-4.5 m	0.35-3 m
Complejidad de uso	Sencillo	Sencillo	Sencillo
Peso	201 g	1.4 Kg	170 g
Dimensiones	14.6x3.5x3.1 cm	24.9x6.6x6.7 cm	18x3.5x5 cm

Dispositivo	Brazalete Control Gestos MYO	Cámara Intel RealSense 3D	Sensor Leap Motion
Aspecto			
Coste	239.49 €	137.53 €	71.50 €
Precisión	Media	Alta	Alta
Arquitectura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor EMG</li> <li>• Giroscopio</li> <li>• Acelerómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara web HD</li> <li>• Cámara de profundidad</li> <li>• Proyector láser infrarrojo</li> <li>• Micrófonos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 cámaras monocromo</li> <li>• 3 LED infrarrojo</li> </ul>
Procesador	ARM Cortex M4	--	--
Área de operación	--	0.2-1.5 m	0.025-0.6 m
Complejidad de uso	Media	Media	Sencillo
Peso	93 g	9.4 g	45 g
Dimensiones	Circunferencia extensible 19-34 cm	11x1.26x0.41 cm	7.5x2.5x1.1 cm

#### 4.2.2 Implementaciones: Kinect y gafas de visión estereoscópica

En algunos proyectos se han desarrollado sistemas que emplean tanto dispositivos para el control de gestos como otros hápticos, intentando combinar los principales beneficios que aporta cada uno de los citados elementos. Es el caso del desarrollado por Park, que se trata de un sistema que ofrece un tratamiento de rehabilitación empleando Kinect y un guante de datos: se combina un sistema de rastreo de movimiento sin marcadores, que proporciona *feedback* en tiempo real con vibración y de forma visual, en función de la música que se escucha, que puede ser bailada, ya que el *feedback* visual es importante, pero con la interacción y el movimiento de dedos se consigue un mejor progreso. Se muestra una secuencia de flechas generadas en relación a la música a bailar, y el paciente debe tocarlas en un tiempo determinado. El movimiento se captura con Kinect, es grabado y almacenado en una base de datos, y evaluado posteriormente para adaptar la

dificultad aplicada del programa a ese participante Si el paciente toca una flecha cuando se alcanza el punto deseado, se aplica la vibración en el guante que lleva puesto, y se puede medir el movimiento de los dedos.

Una de las principales ventajas de utilizar estos dispositivos es que colocar marcadores en el cuerpo del paciente no es algo deseable, y eso no es necesario con Kinect, aunque puede conllevar una peor precisión, pero gracias a su precio y portabilidad, el uso resulta prometedor [48].

Rubio analiza la fidelidad del uso de Microsoft Kinect en combinación con guantes de datos para evaluar funciones motoras, espasticidad y ejecución en actividades diarias, integrados en un sistema de rehabilitación a través de juegos denominado Rehabilitation Gaming System (RGS), perteneciente a un programa de rehabilitación para el hogar en el cual los enfermos seguían una terapia de 5 sesiones diarias durante 3 semanas. Este sistema, destinado a pacientes que han sufrido un accidente cerebro vascular, se testa en 18 personas, y se hallan fuertes correlaciones entre los parámetros obtenidos desde el escenario virtual (área de trabajo, distancia cubierta y excursión de dedos) y las escalas clínicas estandarizadas para funciones motoras, espasticidad y ejecución en tareas de la vida diaria. Está específicamente diseñado para promover y maximizar la recuperación motora de las extremidades superiores, obteniendo información cualitativa y cuantitativa del usuario durante el desarrollo de sus tareas.

El escenario de Realidad Virtual se divide en dos tareas separadas para evaluar las funciones motoras de brazo y dedos. En la primera los pacientes deben ejecutar movimientos circulares con la mano para limpiar una mesa cubierta de pequeños cubos. En la segunda, se debe exprimir un limón virtual flexionando los dedos, así como extendiéndolos para coger el siguiente. Ambos movimientos se realizan 3 veces consecutivas empleando cada mano. Antes de la primera y la última sesión del programa cada paciente es evaluado por un terapeuta ocupacional con escalas clínicas estándar (Fugl-Meyer, Chedoke-McMaster Stroke Assesment, Barthel Index, Ashworth Scale for distal and proximal upper limb, Medical Research Council Scale for distal and proximal upper limb). La medida cuantitativa de la cinemática de las extremidades se realiza con un modelo biomecánico virtual controlado por los ángulos de los hombros, codos y dedos de los pacientes. Esos valores se comparan con las puntuaciones en las cinco escalas clínicas, hallando significantes correlaciones, por lo que este sistema de bajo coste no invasivo, puede ser empleado de forma sencilla en el hogar para conocer los progresos de cada paciente [49].

La rehabilitación física también ha sido explorada en la Realidad Virtual con el uso de gafas de visión en 3 D, como Oculus Rift DK2 o StereoGraphics. A pesar de que los pacientes tienen pocas probabilidades de lesionarse practicando con estos dispositivos, es importante que el tratamiento a seguir en la rehabilitación física sea supervisado por un médico, y evitar realizar movimientos incorrectos durante los ejercicios, que pueden ocasionar daños y reducir su efectividad.

Baldominos emplea un sistema llamado Intel RealSense (en ese momento tan sólo disponible para desarrolladores), integrando Oculus Rift DK2. Se desarrolla un juego en que el paciente debe ejecutar un set de movimientos de brazo de abducción y aducción para conseguir la rehabilitación del hombro. Este prototipo

inmersivo desarrollado con Unity, muestra un juego de fútbol en que el paciente es el portero, y donde la frecuencia de disparo y los ángulos varían en función de la dificultad, que se determina en base a la puntuación obtenida. La sesión puede ser supervisada o autónoma, pero la primera de todas debería ser controlada, para comprobar que los movimientos son correctos. Según expertos, los movimientos corresponden con los deseables en un tratamiento activo, y con 20 min de sesión sería suficiente.



**Figura 4-3.** Oculus Rift DK2, utilizado en el estudio de Baldominos.

Este autor introduce un término denominado “propiocepción”, refiriéndose a la habilidad para sentir la posición de los músculos y la relativa entre partes contiguas del cuerpo. Como en este juego la visión se bloquea cuando el paciente lleva las gafas virtuales y no puede ver su movimiento superior, algunas tareas de coordinación de movimientos se vuelven más complicadas y es más difícil tener conciencia de la propia posición en el espacio (extender un brazo es más complejo). Como resultado, se debe realizar un esfuerzo extra, lo cual según expertos puede acelerar el tratamiento e incrementar su efectividad [47].

Stewart emplea las gafas de visión en 3D StereoGraphics, junto con un rastreador magnético con 6 grados de libertad (Flock of Birds), que se sitúa en la mano del usuario o en un objeto que debe sujetar, para realizar tres de las tareas. Para otra de actividades (“Pinch”, para el movimiento de pellizcar), se combinan las gafas con dos dispositivos PHANTOM reconfigurados para trabajar juntos. Todo se visualiza en un ordenador personal. Las cuatro actividades que se proponen tienen como fin mejorar el movimiento de mano y brazo en pacientes con hemiparesia: dos de ellas (“Reaching” y “Ball Shooting”), se presentan como estímulos en relación a la posición del hombro del participante; “Rotation” sirve para trabajar la pronación y la supinación del antebrazo, y “Pinch” trabaja el agarre con precisión de los dedos índice y pulgar.

Participan 2 personas con paresia crónica tras un ictus con diferente grado de daño motor, que asisten a 12 sesiones de 1-2 horas durante 3 semanas, y un terapeuta ocupacional está presente en las sesiones para los test de diagnóstico y seleccionar los bloques y parámetros de las tareas para mantener un nivel moderado de dificultad, e incluso, para proporcionar asistencia con el fin de poder completar las tareas. Se consigue una mejora en la ejecución de las actividades durante las sesiones: el participante menos afectado emplea más tiempo de media en las tareas, practica más bloques por sesión y progresa a una tasa mayor que el otro (mayor número de bloques desplazados en el BBT). El grado de los problemas motores no disminuye pero ambos pacientes mejoran su habilidad funcional tras el

entrenamiento [50]. Por tanto, se puede diseñar un protocolo individualizado adecuado y progresivo según la capacidad de movimiento y la tasa de mejora con dispositivos combinados accesibles, de bajo coste y de uso sencillo incluso en el hogar. Esto permite que los tratamientos de rehabilitación estén al alcance de una cifra mucho más importante de personas.

### 4.3 El controlador Leap Motion

Son numerosas las aplicaciones desarrolladas desde el lanzamiento de Leap Motion. Las más conocidas y fáciles de utilizar son las que permiten tareas sencillas, como controlar un ordenador personal con movimientos simples de la mano. Es interesante conocer las limitaciones y ventajas del terminal, sus principios básicos de funcionamiento y las diferencias más remarcables respecto a otros dispositivos para el seguimiento de gestos.

#### 4.3.1 Características

Este dispositivo ofrece información sobre posiciones discretas, gestos y movimiento, con alta precisión en una proximidad cercana y una tasa de tramas de seguimiento elevada. Dispone de dos cámaras monocromo, y 3 LED de infrarrojo, a través de lo que genera un patrón de puntos en 3 dimensiones. Esa luz de seguimiento de infrarrojo tiene una longitud de onda de 850 nanómetros (fuera del espectro de la luz visible). Puede llegar a capturar 200 tramas por segundo de datos y proporcionar una precisión de 0.2  $\mu\text{m}$ .

El origen está centrado en la parte superior del sensor: los ejes x y z están sobre el plano horizontal, siendo el x paralelo a borde largo del dispositivo. El eje y es vertical, con valores crecientes positivos hacia arriba, mientras que el eje z tiene valores positivos que se incrementan en dirección hacia el usuario.

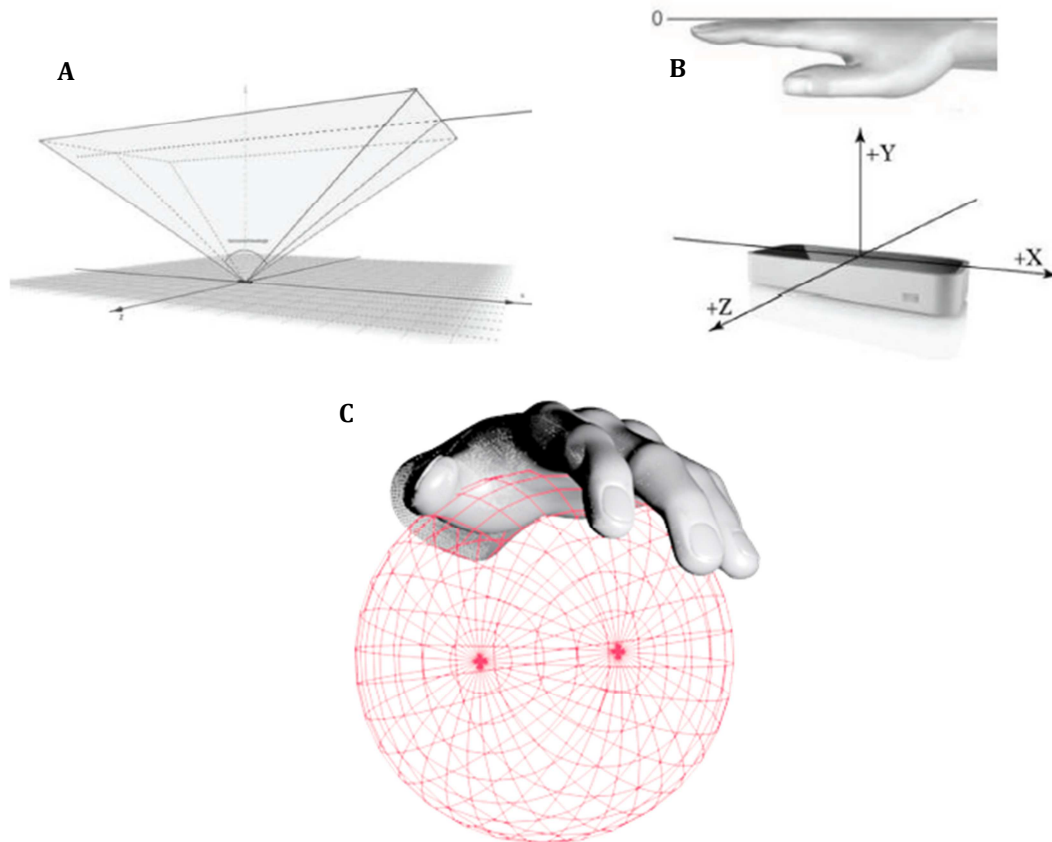
El campo de visión es de 150° (aproximadamente unos 0.25 metros cúbicos de espacio en 3 dimensiones), con forma de pirámide invertida centrada en el dispositivo, que es la intersección de los campos de observación de cámaras binoculares. Por otro lado, el rango de visión sobre el dispositivo es de 60 cm, limitado por la propagación de la luz de los LEDs en el espacio (resulta mucho más difícil inferir la posición de la mano en 3D a partir de cierta distancia). La intensidad de la luz de cada LED está limitada en última instancia por la corriente máxima que puede dibujarse debido a la conexión USB.

La información se envía al ordenador a través de un puerto USB, mediante el cual también se recibe la alimentación, para que gracias al software se pueda realizar un análisis más exhaustivo utilizando diferentes algoritmos.

Leap Motion ha abierto nuevos caminos en el reconocimiento de gestos: está destinado a trabajar con los gestos de las manos y dedos, en una proximidad cercana con una precisión elevada. Sin embargo, presenta algunas limitaciones: la información que obtiene es mucho más restringida que la que proporcionan cámaras de profundidad como Kinect (unos pocos puntos clave, no un mapa de profundidad completo), pero resulta más precisa y no es necesario realizar procesamiento de imagen para extraer los puntos relevantes. Incluso aunque los datos ofrecidos por Leap Motion no son completamente fiables, ya que algunos



dedos pueden no ser detectados siempre, en general permite obtener una buena aproximación.



**Figura 4-4.** (A) Área de interacción del sensor Leap Motion; (B) sistema de ejes sobre el controlador; (C) esfera virtual generada por la curvatura de la mano.

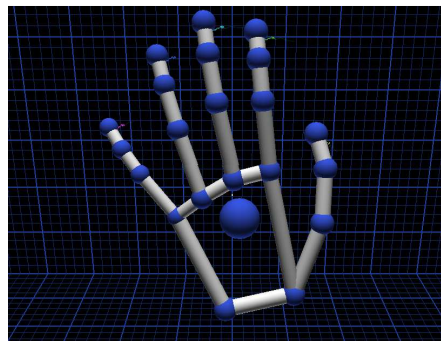
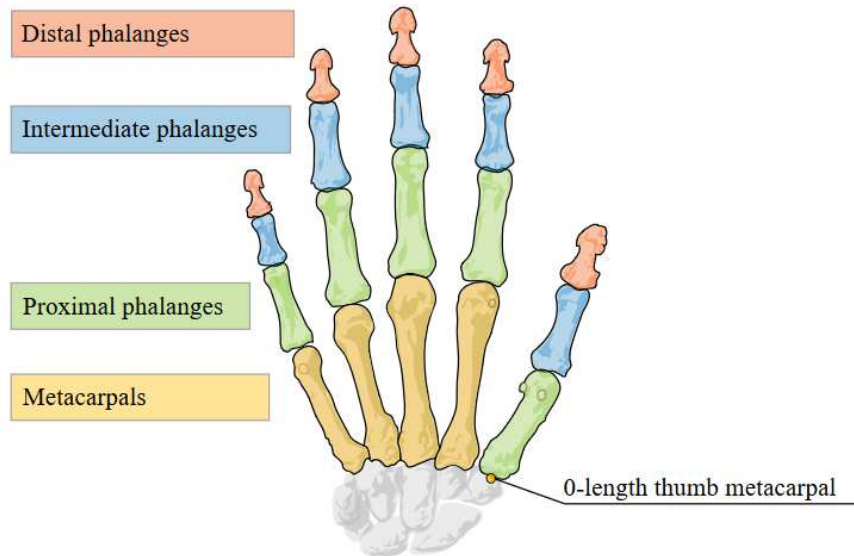
Las posiciones 3D que permite computar son bastante precisas, pero el sensor no siempre puede reconocer todos los dedos (si se tocan entre sí, dedos doblados sobre la mano o escondidos no se capturan, y en muchas configuraciones algunos dedos visibles se pueden perder si la mano no es perpendicular a la cámara). Es un aspecto bastante crítico, ya que el número de dedos capturados en el mismo gesto puede variar en diferentes ejecuciones. Además, como ya se indicaba antes, no existe una concordancia entre puntos adquiridos y los dedos correspondientes, y los valores se ordenan de forma aleatoria. Lo interesante es poder combinar la información complementaria que proporcionan diferentes dispositivos [51].

#### 4.3.2 Funcionamiento

El procesamiento de la información se efectúa gracias al SDK (Kit de Desarrollo de Software) que puede descargarse desde la propia web. Este software permite transformar las señales que envía el sensor Leap Motion datos como dedos, manos, posiciones o gestos, para facilitar el trabajo del programador. Dicho software detecta el movimiento de la mano observando las posiciones en tres dimensiones, teniendo en cuenta la trama anterior y la actual. Se pueden reconocer movimientos de traslación, rotación y factores de escala. Asimismo, se pueden desarrollar pequeñas aplicaciones en diferentes lenguajes de programación como C++, C#,

Java, Python o JavaScript. Además, existen muchos recursos disponibles en la comunidad del usuario.

El controlador contiene las APIs (Interfaz de Programación de Aplicaciones) soportadas por el fabricante. Es a través del software como pueden enviarse a los programas diseñados por los usuarios los datos correspondientes a las manos y los dedos (en su mayoría se trata de juegos de entretenimiento y creación musical).



**Figura 4-5.** Puntos de referencia en la mano y renderizado en 3D.

### 4.3.3 Ejemplos de aplicación de Leap Motion

Los estudios que han empleado este dispositivo tienen fines diversos, desde la educación musical para niños hasta la rehabilitación de personas con daños motores. Algunos de ellos extraen conclusiones interesantes, sobre los problemas derivados del uso del controlador, y son consideradas para el desarrollo de los juegos que se detallan más adelante.

Perdana desarrolla un software para la educación musical en una escuela elemental, ya que considera que la práctica en primera persona ayuda a afianzar destrezas, basándose en lo que indica Fauth (1990): retenemos un noventa por ciento de lo que escuchamos, vemos, decimos y hacemos (a través de nuestra actuación, dramatización, bailando, pintando, etc.).

Uno de los juegos consistía en interpretar música monódica, en base al funcionamiento del instrumento musical Theremin: empleando ambas manos, se toca una melodía colocando las manos encima del dispositivo Leap Motion. La mano derecha controla la altura del sonido, que puede variarse de forma vertical, y una pantalla muestra el que se está emitiendo. La mano izquierda controla la emisión o no de cada sonido: apretando el puño de la mano, el dispositivo interpreta que ha de comenzar el sonido determinado por la altura de la otra mano y cuando el puño se abre, el mensaje significa que debe dejar de sonar. La información visual complementa la auditiva y sensorial, puesto que en pantalla se indica si se está emitiendo sonido, y el estudiante puede aprender, memorizar y asimilar mejor los sonidos que produce. El segundo juego toma como referencia los ya existentes Rock Band y Guitar Hero: aparecen series de sonidos desde los lados derecho e izquierdo de la pantalla, y el estudiante debe situar su mano en la posición vertical adecuada para seleccionar la nota que es. Si se toca una nota incorrecta, la melodía no suena, y cuando se selecciona la nota correcta, el sonido se escucha, y en la pantalla se muestra el nombre, ofreciendo información visual y auditiva, e incorporando el movimiento asociado [52].

Lo interesante son las conclusiones extraídas del empleo de Leap Motion [52]:

- La tecnología que reconoce el movimiento es bastante nueva y aún ineficiente para el uso diario.
- El hecho de tener que situar ambas manos sobre el dispositivo hace que los niños se cansen, sobre todo con melodías de duraciones en torno a los 3-4 min, por lo que no deberían superar ese valor.
- La coordinación entre ambas manos para generar melodías es complicada.
- El interés resulta mayor para el software basado en juegos conocidos, ya que estaban acostumbrados a esa dinámica.
- La precisión no es tan buena, y a menudo los sensores no detectan las manos de forma correcta. No tener ningún dispositivo físico con el que interactuar resulta extraño para el usuario.

Estas ideas deben tenerse en cuenta en el contexto en que se extraen: en 2014 el controlador apenas ha sido utilizado con anterioridad, y además, los usuarios son niños sanos. Por otro lado, es especialmente importante tener en cuenta el desconcierto que puede provocar en personas de edad más avanzada y con cierto daño cognitivo, el hecho de no interactuar físicamente con ningún dispositivo, así como el cansancio derivado de la repetición masiva de movimientos.

Tras un ictus, una consecuencia habitual es la hemiparesia (parálisis parcial de un lado del cuerpo). Lo habitual es que cause falta de coordinación en las extremidades superiores más que en las inferiores, limitando el control motor, la fuerza y el rango de movimiento. El uso de diferentes sensores, incluso al mismo tiempo, permite la rehabilitación de partes específicas del cuerpo: los videojuegos con dispositivos de entrada basados en el movimiento pueden suponer una vía motivadora para la terapia de personas con hemiparesia. El hecho de que estos sistemas puedan monitorizar y medir las habilidades motoras del usuario, permite detectar las mejoras que tienen lugar y adecuar las tareas a las necesidades. Es otro de los aspectos deseables en el desarrollo de estas aplicaciones.

Muy sencillo es el juego que desarrolla Khademi para mejorar la destreza de dedos, manos y brazos de pacientes que han sufrido un ictus, basado en el conocido Fruit Ninja. El estudio se testa con 14 pacientes, que habían sufrido el accidente con una anterioridad de al menos 6 meses. En este caso, los eventos de ratón propios del juego son reemplazados por movimientos de mano, y el objetivo del juego es modificado, introduciendo una restricción de un minuto. Cuatro de los pacientes presentaban problemas para mover los dedos, y emplearon una barra sujeta con una correa a dorso de su mano, de modo que para jugar realizaban movimientos de muñeca. Se observa una alta correlación entre los resultados del juego y los resultados de los test clínicos (sobre todo el Fugl-Meyer y el BBT, por los movimientos de dedos y mano precisos). Por ello, Leap Motion, gracias a que puede rastrear dedos y manos con alta velocidad y precisión (ofreciendo información en tiempo real), puede ser utilizado como un buen indicador informativo a lo largo del proceso de rehabilitación [53].

Otra aplicación que promueve la interacción libre de las manos es la que desarrolla Liu [54], pensada para que un médico pueda prescribir al paciente ejercicio motor y que reciba *feedback* automático a partir de la puntuación, en función de la similitud de los movimientos, para potenciar el efecto de la rehabilitación. El primer prototipo muestra que Leap Motion puede ser efectivo para mejorar el entrenamiento independiente. En el estudio piloto participan 4 doctores y 8 pacientes, con el fin de hallar los requerimientos clave y desarrollar el sistema en base a las expectativas. Es importante destacar que los médicos señalan como más importante la recuperación de flexibilidad que de fuerza, y que, por otro lado, los pacientes no consideran el ejercicio útil en casa, y desearían poder recibir regularmente las instrucciones del doctor, para tener una rutina regular (lo habitual es pasar unas pocas semanas en el hospital con un entrenamiento diario supervisado, y tras alcanzar cierta mejoría ser trasladado al hogar y visitar una o dos veces por semana el hospital).

Son interesantes las expectativas respecto al programa por parte de los usuarios [54]:

- Facilidad de uso y de arranque.
- Que permita gestos para poder interaccionar con el ordenador, ya que el uso de los dedos es limitado.
- Que disponga de ejercicios adecuados y precisos para que sean efectivos, pero con una duración limitada.
- Conseguir que los diferentes movimientos puedan ejercitar distintas partes de la mano, como los dedos.
- Que anime al paciente a mantener una rutina.
- Claridad en el *feedback* para corregir y mejorar gestos.
- Podría facilitar el contacto social con otros pacientes.
- Debería permitir que los doctores comprobasen la evolución de los pacientes, y darles instrucciones de forma fácil y síncrona.
- Accesibilidad para los médicos con el fin de monitorizar a sus pacientes.

El primer intento de detección de gestos a partir de la información recogida por Leap Motion lo describe Marin en su artículo de 2014. En ese momento se trataba de un campo inexplorado, partiendo de la idea de que el software reconoce tan sólo unos pocos patrones de movimiento como golpe y toque. Se extrae una parte

de los datos proporcionados por el sensor, y se clasifica con un SVM (Support Vector Machine), con el fin de reconocer los movimientos ejecutados. Esos mismos gestos se adquieren también con Kinect, se realiza una comparación de los dos dispositivos en la ejecución y se busca cómo combinar ambos para mejorar la precisión en el reconocimiento. A diferencia de Kinect, Leap Motion solamente devuelve un conjunto de puntos de la mano relevantes y algunas características del gesto, pero no un mapa de profundidad completo [51].

En el estudio que detalla Chophuk en 2015, se emplea el sensor de movimiento 3D Leap Motion para estimar posiciones y direcciones de dedos y huesos de la mano. La principal motivación es poder evaluar la condición denominada dedo en gatillo, que afecta a los tendones porque se inflaman, pudiendo afectar a uno o más dedos. Se emplean cuatro posiciones para evaluar el movimiento anormal de dedos (se dispone de una serie de valores de ángulos de referencia con los que comparar resultados): flexión de la unión IP del pulgar, posición neutra de la unión PIP de dedos, flexión de la unión MP de dedos y abducción radial del pulgar. El goniómetro es la herramienta de empleada para hallar cuánto puede doblarse cada dedo [55].

Un paso más da Artal-Sevil en 2016, presentando el diseño y la construcción de un prototipo de brazo articulado destinado a ser el chasis de un robot móvil autónomo. La filosofía es la reutilización y el reciclaje de materiales obsoletos para desarrollar un modelo con capacidad para operar en 3 dimensiones, simulando los grados de libertad (DOF) del antebrazo humano. Para el reconocimiento de los diferentes gestos de la mano se emplea Leap Motion y un periférico equipado con sensores infrarrojos (IR), que reconocen el movimiento del antebrazo, mano y dedos a la vez. Esas variables son procesadas en un ordenador para su descomposición en movimientos simples y básicos, y esa información es enviada a un brazo robótico articulado. Los distintos comandos del ordenador los recibe un controlador Arduino, que se encarga de transmitir la información a cada uno de los servomotores involucrados en el movimiento. Se emplea Leap Motion dado que su precisión es superior a la de otros dispositivos comerciales, y porque, aunque el área de operación es pequeña, cumple las expectativas para poder realizar el control con el movimiento de la mano y del antebrazo (rango de movimientos soportados por el dispositivo) [56].

Por último, también se han desarrollado sistemas que emplean dispositivos como Kinect junto a Leap Motion. Es el caso de Kinteract, cuyo servidor inicialmente soportaba solamente Kinect, pero que posteriormente ofrece soporte para sensores como Leap Motion y Orbotix Sphero (la denominada “pelota robótica” de tamaño de una pelota de tenis que se comunica por Bluetooth, y que puede ser controlada por un dispositivo móvil). Este sistema consta de un servidor que recibe el movimiento, y un cliente, donde se ejecuta el juego de rehabilitación y que procesa los datos del sensor de entrada. De este modo se puede expandir el servidor sin afectar a la parte del cliente, y además varios clientes pueden ser soportados a la vez.

Este cliente que describe Matos, consta de una aplicación Android sobre Google TV que ofrece una plataforma para juegos de rehabilitación física de diferentes niveles de complejidad. El juego que se ejecuta con Leap Motion tiene como objetivo la mejora en el uso de la mano, intentado incrementar su rango de apertura: la tarea

consiste en levantar una manzana situada en una posición específica de la pantalla, abriendo la mano hasta un extremo determinado, arrastrar la manzana a una cesta y arrojarla cerrando la mano. Se utiliza con 5 pacientes con hemiparesia superior, y el nivel de dificultad es proporcional al radio mínimo de la esfera necesario para abrir la mano (el radio que puede ofrecer Leap Motion es el de una esfera virtual que se ajusta a la curvatura de la mano) [57].

En todos estos sistemas, cabe mencionar tres elementos en común: al no llevar puesto ningún dispositivo, el paciente no se hace daño en la mano; por otro lado, el *feedback* es constante para el participante; y por último, gracias a que se intercambia información entre las diferentes partes de forma online, la comunicación puede ser más frecuente entre médico y paciente.

# REHABILITACIÓN MOTORA CON LEAP MOTION

En este capítulo se describen los dos juegos musicales desarrollados para la rehabilitación con Leap Motion, así como los aspectos clave considerados y el motivo de elección de los diferentes elementos que integran cada videojuego.

## 5.1 Aspectos generales

Con el fin de conseguir explotar los beneficios derivados de la práctica musical para la rehabilitación de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular, es necesario tener un conocimiento previo sobre las técnicas relacionadas que hasta el momento se han utilizado en estudios anteriores. En capítulos previos se mencionaba cómo el ritmo puede ayudar a mejorar la precisión espacio-temporal [26], o las diferentes conexiones activadas en el cerebro gracias a la exposición a la música [24]. El proceso asociado a la práctica musical implica llegar a controlar patrones complicados, ya que es necesario reajustar los movimientos en términos de espacio, tiempo ritmo, fuerza y velocidad para reproducir una secuencia determinada. El *feedback* auditivo constante, junto con la información visual y el control motor configuran un proceso complejo, que puede resultar muy valioso para acelerar la recuperación de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular [28] [32].

Al igual que en la Terapia con Apoyo Musical (MST), se ha optado por incluir actividades con instrumentos mixtos: un teclado y un set de percusión, en concreto, un conjunto de timbales. Los videojuegos permiten que el usuario interactúe con ese entorno musical simulado, a través del dispositivo Leap Motion.

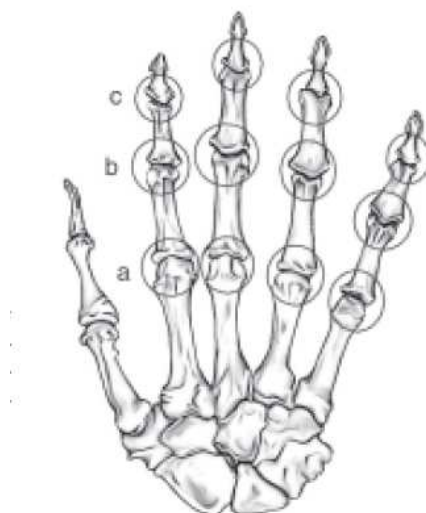
La herramienta de desarrollo utilizada ha sido Unity, que permite crear software para ser ejecutado en diferentes plataformas, trabajar con el lenguaje de programación C#, empleado para la creación de los diferentes scripts, e interactuar con el dispositivo Leap Motion. La integración con el dispositivo se realiza a través de un *plugin* que se instala desde la aplicación principal. En la versión empleada (VR), el *Leap Motion Core Unity Assets* ofrece modelos de controlador de mano que pueden ser empleados en el juego, para representar las manos del usuario. La versión de *Assets* empleada es la 3.0.0.

## 5.2 Ejercicio motor para la rehabilitación

Uno de los aspectos clave en la rehabilitación motora es la repetición intensiva de los movimientos que se necesita mejorar. A menudo puede resultar una tarea costosa y poco motivadora, por lo que la música puede hacer olvidar esa rutina, y

conseguir que el paciente llegue a querer realizar la tarea incluso para su disfrute personal, teniendo como reto conseguir interpretar una melodía sin errores, y olvidando que en realidad está siguiendo la terapia que tiene marcada por el especialista.

El esqueleto de la mano contiene 27 huesos. Los huesos de los dedos se clasifican en cuatro partes: falange distal, falange intermedio, falange proximal y metacarpiana. Asimismo, podemos hacer referencia a las articulaciones metacarpofalángica e interfalángicas proximal y distal. La primera de ellas presenta movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción, mientras que las dos últimas solamente muestran movimientos de flexión.



**Figura 5-1.** Articulaciones de los dedos de la mano: **a)** metacarpofalángica; **b)** interfalángica proximal, y **c)** interfalángica distal [58].

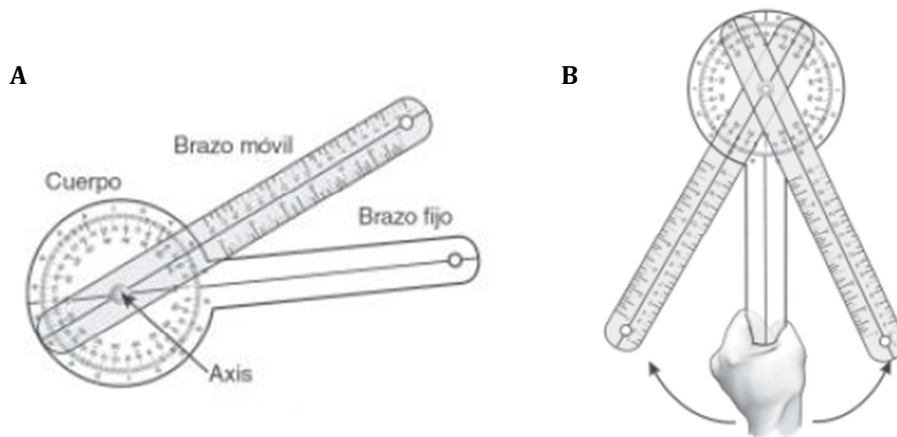
En los juegos diseñados, se van a realizar ejercicios motores de flexión y extensión de dedos, y flexión y extensión de muñeca. Dichos movimientos se van a registrar tomando medida de ángulos obtenidos entre los correspondientes huesos de la mano o muñeca, ya que Leap Motion permite trabajar con las articulaciones de ese modo.

### 5.2.1 Instrumentos de medida

El término goniómetro deriva de dos palabras griegas, *Gonia* que significa ángulo y *Metron* que significa medida, luego se trata de un instrumento para medir ángulos, que es empleado para el sistema osteoarticular. En el campo de la terapia física, se utiliza para medir la cantidad total de movimiento disponible en una unión específica, bien se trate de rangos de movimiento activos o pasivos. Es un instrumento práctico, económico y de fácil utilización, que se presenta en gran variedad de tamaños y formas, y habitualmente se construye en plástico (generalmente transparente) o metal (acero inoxidable).

Disponen de un cuerpo y dos brazos, uno de ellos fijo y otro móvil. El cuerpo en realidad es un transportador de  $180^\circ$  o  $360^\circ$ , y la escala puede estar dividida en incrementos de 1, 5 o  $10^\circ$ . El brazo fijo está unido al cuerpo, y el móvil es el que gira alrededor del eje del cuerpo para señalar sobre la escala del transportador la medición [58].





**Figura 5-2.** (A) Goniómetro universal para grandes articulaciones con un transportador de 360°; (B) ejemplo de uso: se sostiene la parte fija mientras la parte móvil se desplaza sobre su eje [58].

Los dos tipos de instrumentos más comunes utilizados para medir ángulos en uniones son el inclinómetro burbuja y el goniómetro tradicional. En este caso, el dispositivo se emplea para medir el ángulo de la unión como referencia con la medida del sensor Leap Motion.

### 5.3 Elementos comunes de los juegos

Los juegos diseñados pretenden ser un complemento para la rehabilitación motora, desde un enfoque basado en la música, ya que no sólo ayuda a mejorar las conexiones entre diferentes áreas del cerebro: además tiene una gran influencia en la regulación de emociones [37], algo que puede resultar relevante especialmente en fases depresivas.

Uno de los autores citados con anterioridad, extraía interesantes conclusiones tras emplear Leap Motion en un estudio con un grupo de niños sanos, como que la coordinación de manos puede resultar complicada para conseguir melodías, que los juegos conocidos resultan más atractivos para los usuarios y que colocar las manos sobre el dispositivo durante largos periodos (en torno a 4 minutos) llega a provocar fatiga [52]. Por este motivo, en ambos módulos se han ajustado las piezas a interpretar para que su duración no sea demasiado larga, intentando además que resultaran familiares para el usuario en función de sus características. Por último, de forma inicial tan sólo se incluyen piezas que involucran una mano, para evitar crear más confusión, aunque se podrían utilizar ambas.

#### 5.3.1 Sistema completo

Como se indicaba en la *Introducción*, los videojuegos desarrollados se integran como módulos dentro del sistema TELEKIN, destinado a la tele-rehabilitación para discapacidades motoras y cognitivas. El propósito principal es que este proyecto sea un estímulo para que los pacientes realicen la terapia, y que además, sea adecuada para sus patologías.

Los módulos diferenciados permiten que los nuevos se incorporen de forma sencilla sin tener que realizar cambios en los antiguos. El sistema consta de dos partes principales, la parte web desde la que se envían los detalles de configuración, y los módulos de juego, con los que interactúa el paciente.

- *Módulo Web del Administrador*, consiste en una interfaz web donde el administrador puede gestionar la configuración de todo el sistema, los usuarios del centro médico, los pacientes de un especialista o modificar las terapias asociadas a un paciente.
- *Módulo Web del Terapeuta*, es equivalente al anterior, y permite al terapeuta crear sesiones para sus pacientes, la configuración de parámetros para los diferentes módulos y analizar los resultados obtenidos.
- *Módulo Web de Familiares*, en el que pueden consultarse los principales datos del paciente y la evolución entre sesiones.
- *Módulo de Juego*, contiene las actividades de rehabilitación para los pacientes. De forma inicial se selecciona la cuenta de usuario, y a partir de ese momento pueden realizarse las tareas asignadas previamente por el terapeuta. Para capturar los movimientos, se utilizan dos dispositivos: Microsoft Kinect v2 (para actividades donde es necesario hacer un seguimiento del cuerpo completo), y Leap Motion (para movimientos específicos de manos).

### 5.3.2 Principios comunes

Una vez situados los juegos a desarrollar, se recogen una serie de elementos comunes que se han buscado alcanzar en ambos juegos:

- Conseguir contar con un sistema de fácil acceso para cualquier persona, y que pueda utilizarse incluso en el hogar.
- Interactividad elevada, y capacidad de entretenimiento, para que el paciente se sienta incitado a mantener una rutina.
- Permitir trabajar la repetición masiva de ejercicios de dedos y muñeca con un apoyo musical, para que el paciente olvide que se trata de una terapia de recuperación.
- Claridad en las actividades a realizar, dado que es posible que estas personas sufran también algún daño cognitivo.
- Adaptar el repertorio musical al perfil del usuario para que no le resulte desconocido, y establecer ejercicios de duración adecuada, con el fin de evitar provocar fatiga.
- Reforzar el efecto de la acción motora gracias al *feedback* auditivo, de modo que el sonido asociado a un movimiento en concreto ayude a recordarlo con mayor facilidad.
- Mostrar diversidad mediante diferentes niveles de dificultad, para que cada vez el reto sea más elevado, y se consiga la progresión creciente del usuario.
- Mejorar la motivación del paciente, que puede perfeccionar sus interpretaciones, y tener la sensación de haber adquirido la capacidad de tocar un instrumento.
- No frustrar al usuario siendo muy exigente con los resultados.
- Ofrecer información continua al paciente de forma clara sobre su desempeño en la tarea, para que pueda corregir progresivamente los errores que comete.
- Mostrar datos sobre cómo se han desarrollado las actividades, y permitir almacenar la información relevante para que el terapeuta la analice, y tome decisiones en el momento de diseñar los programas de entrenamiento.

## 5.4 Módulo Música

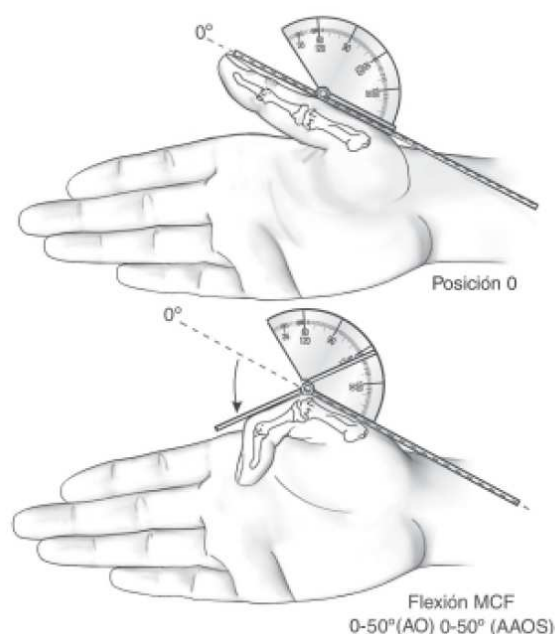
La dinámica de este juego musical es muy sencilla: se debe conseguir interpretar la melodía propuesta con el menor número de fallos posibles en un teclado virtual con el que el usuario no tiene contacto físico, sino que interactúa a través del dispositivo Leap Motion.

Desde la parte web del sistema es posible enviar la configuración deseada de los diferentes parámetros, para que el paciente pueda trabajar directamente con un juego adaptado a sus necesidades.

### 5.4.1 Movimientos a trabajar

El objetivo es conseguir mejorar el rango de movimiento entre distintas falanges de los dedos de la mano afectada. Con Leap Motion, se pueden identificar los huesos de cada dedo (metacarpiano, proximal, intermedio y distal, salvo para el pulgar que es proximal, intermedio y distal), así como los cambios de movimiento asociados.

Se han realizado numerosas pruebas para conseguir que el juego funcione de forma sencilla y que los movimientos no tengan que ser demasiado exagerados por el usuario, ya que la premisa principal es que esa persona tiene dificultad para conseguirlo. Por ello, se han modificado los ángulos calculados en varias ocasiones hasta que el resultado ha sido adecuado. Finalmente, se ha optado por considerar medidas entre articulaciones no contiguas en el caso de metacarpiano y distal para todos los dedos, con excepción del pulgar, para la que se utilizan las articulaciones metacarpiana y proximal.



**Figura 5-3.** Flexión del dedo pulgar a partir de la posición 0 [58].

### 5.4.2 Elección del instrumento musical

En el Módulo Música, el usuario debe interpretar melodías y/o sus escalas asociadas en un piano. Se trata de un teclado de que abarca dos octavas (de  $fa_2$  a

fa<sub>4</sub>), cuyas teclas están vinculadas a sonidos reales de un piano en formato mp3. En el protocolo MST utilizado en los estudios descritos en el capítulo tercero, se contaba con un teclado midi de tan sólo 8 teclas blancas. Se ha optado por incluir teclas tanto blancas como negras, para mostrar la imagen de un piano real, pero tan sólo funcionan de forma activa en cada ejecución las teclas que no se sombrean en color gris, asociadas cada una a un dedo en concreto, para que no se trate de algo demasiado complejo para el usuario. De este modo, el ejercicio no sólo resulta más real, sino que además las posibles combinaciones de distancias entre sonidos para componer las piezas resultan mayores, y se amplía la gama de potenciales melodías.

### 5.4.3 Elección de las piezas a interpretar

Se incluyen de forma inicial diez melodías, seleccionadas teniendo en cuenta la posible edad de los usuarios (más de 50 años). Todas ellas han sido adaptadas para poder ser interpretadas incluyendo como máximo cinco sonidos diferentes (uno para cada dedo de la mano). Además se incorpora un acompañamiento armónico también con piano, para que la interpretación resulte más realista: como el piano es un instrumento polifónico en el que pueden escucharse varios sonidos a la vez, melodías de un solo sonido resultan pobres y poco habituales. Friedman en su estudio con CyberGlove también establece la limitación a cinco sonidos como máximo de las piezas (de este modo es posible establecer una relación directa dedo-sonido), y del mismo modo, consideraba fundamental que las melodías estuvieran adaptadas a la edad de los pacientes [44]. Este aspecto puede resultar clave para mantener la motivación del usuario durante el proceso de rehabilitación.

**TABLA 5-1.** MELODÍAS INTRODUCIDAS EN LA ESCENA MÚSICA.

Título de la canción	Año	Autor	Sonidos
<i>Every breath you take</i>	1983	The Police	Sol <sub>3</sub> , La <sub>3</sub> , Si <sub>3</sub> y Do <sub>4</sub>
<i>Pretty Woman</i>	1990	Roy Orbison	Fa <sub>3</sub> , Sol <sub>3</sub> , La <sub>3</sub> , Do <sub>4</sub> y Re <sub>4</sub>
<i>Sweet home Alabama</i>	1974	Lynyrd Skynyrd	Si <sub>2</sub> , Re <sub>3</sub> , Mi <sub>3</sub> y Fa <sub>3</sub>
<i>The hey song</i>	1972	Gary Glitter	Sol <sub>3</sub> , La <sub>3</sub> , Si <sub> b 3</sub> , Si <sub>3</sub> y Do <sub>4</sub>
<i>Time of my life</i>	1987	Franke Previte	Do <sub>3</sub> , Fa <sub>3</sub> , Sol <sub>3</sub> , La <sub>3</sub> y Si <sub> b 3</sub>
<i>We don't need no education</i>	1979	Pink Floyd	Re <sub>3</sub> , Mi <sub>3</sub> , Fa <sub>3</sub> , Sol <sub>3</sub> y La <sub>3</sub>
<i>You are the one that I want</i>	1977	John Farrar	Sol <sub>3</sub> , La <sub>3</sub> , Do <sub>4</sub> , Re <sub>4</sub> y Mi <sub>4</sub>
<i>Stand by me</i>	1962	Ben E. King	Do <sub>3</sub> , Re <sub>3</sub> Mi <sub>3</sub> , Sol <sub>3</sub> y La <sub>3</sub>
<i>What a feeling</i>	1983	Giorgio Moroder, Keith Forsey e Irene Cara	Sol <sub>3</sub> , La <sub>3</sub> , Si <sub>3</sub> , Do <sub>4</sub> y Re <sub>4</sub>
<i>Jailhouse Rock</i>	1957	Elvis Presley	Re <sub>3</sub> , Mi <sub> b 3</sub> , Fa <sub>3</sub> , Sol <sub>3</sub> y Sol# <sub>3</sub>

El terapeuta puede elegir entre los parámetros configurables que más adelante se detallan, si desea que el participante realice antes de su interpretación un pequeño calentamiento, consistente en reproducir los sonidos incluidos en la melodía a interpretar en orden, como primera toma de contacto con el juego, a modo de escala. Dado que tocar el piano se trata de un ejercicio de precisión, ya que mover los dedos de este modo es una actividad que tan sólo van a poder realizar pacientes poco afectados, esta práctica resulta recomendable y habitual. Otros autores como Van Vugt también lo incluyen en su protocolo diseñado para la rehabilitación [35].

Las melodías adaptadas corresponden a célebres canciones de la música Rock o melodías popularizadas gracias a famosas películas de los años 70-90: *Pretty Woman* aparece en la película del mismo nombre, *Sweet home Alabama* puede escucharse en *Forrest Gump*, *The hey song* suena en *The Full Monty*, el tema *Time of my life* es famoso por la película *Dirty Dancing*, *You are the one that I want* aparece en el musical *Grease* y *What a feeling* en *Flashdance*. En la Tabla 5-1 se recogen los datos más relevantes sobre cada una de las melodías utilizadas.

#### 5.4.4 Funcionamiento

La lectura de una partitura es la primera dificultad que una persona se encuentra para poder hacer música siguiendo unas pautas marcadas: los videojuegos musicales existentes, guían al usuario con el fin de que esa barrera sea eliminada, y la persona sienta que es capaz de tocar con facilidad un instrumento. No sólo se ha intentado conseguir eso, sino además hay que tener en cuenta que el terapeuta, independientemente de si tiene o no formación musical, debe ser capaz de seguir la evolución de su paciente a través del juego, sin que los elementos musicales se conviertan en un obstáculo.

Por ello, el método seleccionado para guiar al paciente y advertirle sobre sus aciertos o fallos, tiene semejanzas con lo utilizado por Jack en su proyecto, donde se informaba al usuario a través de diferentes colores [39]: las teclas a presionar se sombrean en azul. Cuando una tecla se pulsa de forma correcta, pasa a parpadear brevemente en verde, mientras que si no es presionada en un intervalo de tiempo determinado, calculado en función de la velocidad a la que debería interpretarse la melodía (relacionado con el nivel de dificultad establecido), la tecla se pulsa automáticamente por el juego y se muestra como error con un parpadeo en rojo. El código de colores elegido pretende que su comprensión resulte sencilla e intuitiva.

TABLA 5-2. CÓDIGO DE COLORES EN EL MÓDULO MÚSICA.

<b>Color</b>			
<b>Significado</b>	Pulsar	Erróneo	Correcto

#### 5.4.5 Parámetros

El médico puede gestionar desde la parte web la configuración asociada al juego, en función de las tareas que desee programar para el paciente. Algunos de los parámetros resultan muy básicos, como la mano a utilizar, o en caso de seleccionar

melodías que no implican el uso de los cinco dedos (contienen menos de 5 sonidos por tanto), la configuración de dedos a utilizar.

El posible incluir un calentamiento previo a la interpretación de la pieza seleccionada, para que primero el jugador identifique bien cada sonido y dedo con los movimientos que realiza. Esta parte no se valora en la puntuación final. Los parámetros más interesantes son la pieza a interpretar y el nivel de dificultad con el que se realizará.

**TABLA 5-3.** PARÁMETROS CONFIGURABLES EN EL MÓDULO MÚSICA

Parámetro	Descripción
<b>Selección de mano</b>	Permite que el terapeuta elija la mano a utilizar en el juego.
<b>Configuración de dedos</b>	En las melodías de cuatro sonidos, puede escogerse entre la configuración que contiene los dedos pulgar, índice, corazón y anular, o bien la que incluye índice, corazón, anular y meñique.
<b>Calentamiento</b>	Habilita la opción de incluir un pequeño calentamiento previo a interpretar la melodía, consistente en una escala que recoge todos los sonidos a utilizar en orden ascendente y descendente.
<b>Seleccionar canción</b>	Permite que se pueda elegir la melodía a trabajar, o bien, que se seleccione una de forma aleatoria.
<b>Nivel del juego</b>	El terapeuta puede elegir entre 8 niveles, en función de su criterio para establecer la dificultad del juego.

Asimismo, se recogen una serie de datos de salida que ofrecen información de utilidad para realizar una valoración sobre el progreso con el programa de entrenamiento: es posible conocer el rango de movimiento de cada dedo, así como el número de fallos individualizado. A partir de esos errores de ejecución, se calcula la puntuación final en el juego. Estos datos, junto con el tiempo empleado durante la sesión, son de interés para conocer la evolución del paciente.

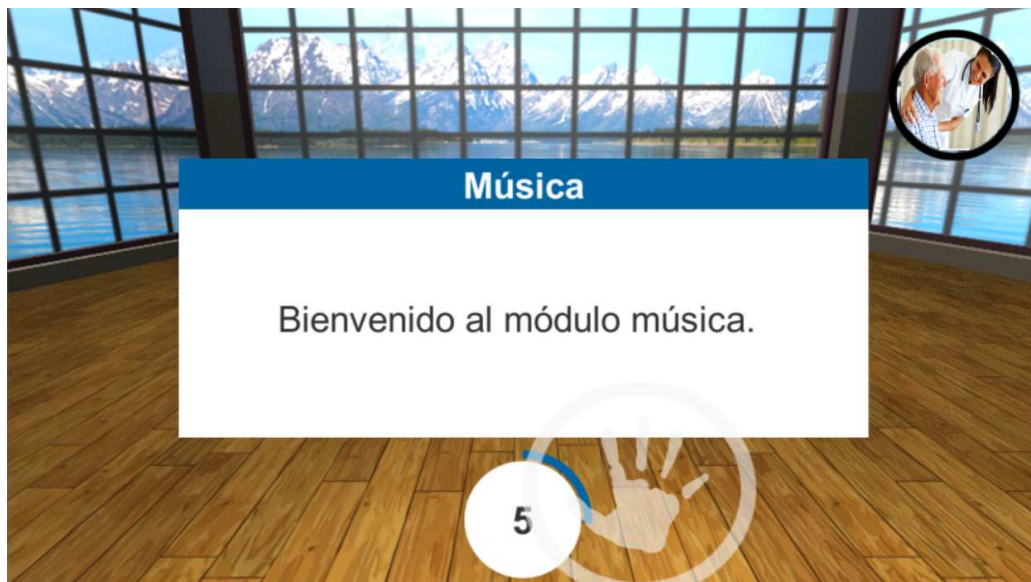
**TABLA 5-4.** PARÁMETROS DE SALIDA EN EL MÓDULO MÚSICA.

Parámetro	Información
<b>Tiempo</b>	Periodo temporal transcurrido durante el desarrollo del juego.
<b>Rango de movimiento</b>	Ángulos medidos durante la calibración de los dedos.
<b>Errores por dedo</b>	Cantidad de fallos cometidos por dedo.
<b>Puntuación</b>	Nota final calculada teniendo en consideración los errores producidos.

Los ángulos medidos en la calibración pueden ser conocidos tanto por el médico como por el usuario, así como el tiempo y la puntuación. La cantidad de errores cometidos por dedo tan sólo se recoge para que el terapeuta realice su valoración.

#### 5.4.6 Pantallas y desarrollo del juego

Una vez seleccionado el Módulo Música aparece una pantalla de bienvenida y observamos que nuestra mano está integrada en el juego, representada con una mano semitransparente dentro de una circunferencia.



**Figura 5-4.** Pantalla inicial del Módulo Música.

La primera tarea a desarrollar es la calibración de cada dedo, para lo cual se solicita al usuario que imite los movimientos de los vídeos que visualiza en la parte izquierda de la pantalla. Como *feedback*, se puede conocer el ángulo máximo y el alcanzado en ese instante para la articulación con la que se está trabajando.

Esta actividad es la única en la cual se incluye la representación de la mano a través de una mano real simulada, ya que se ha optado por desarrollar el juego en 2D, y se incluyen otros indicadores para conocer su posición: para la selección de paneles se emplea la mano semitransparente antes indicada, y durante el juego, puede conocerse la situación de cada dedo a partir de la imagen de una huella dactilar, que a modo de puntero señala el dedo que se ha flexionado lo suficiente como para considerar que ha pulsado una tecla.

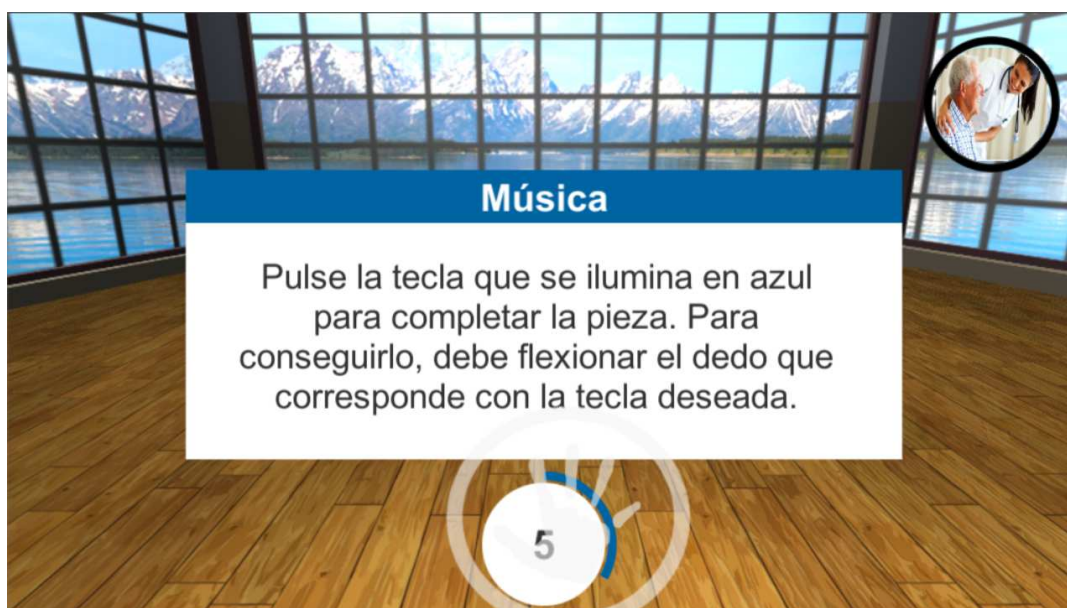


**Figura 5-5.** Marcadores de mano y dedos en el Módulo Música.



**Figura 5-6.** Calibración de los dedos de la mano.

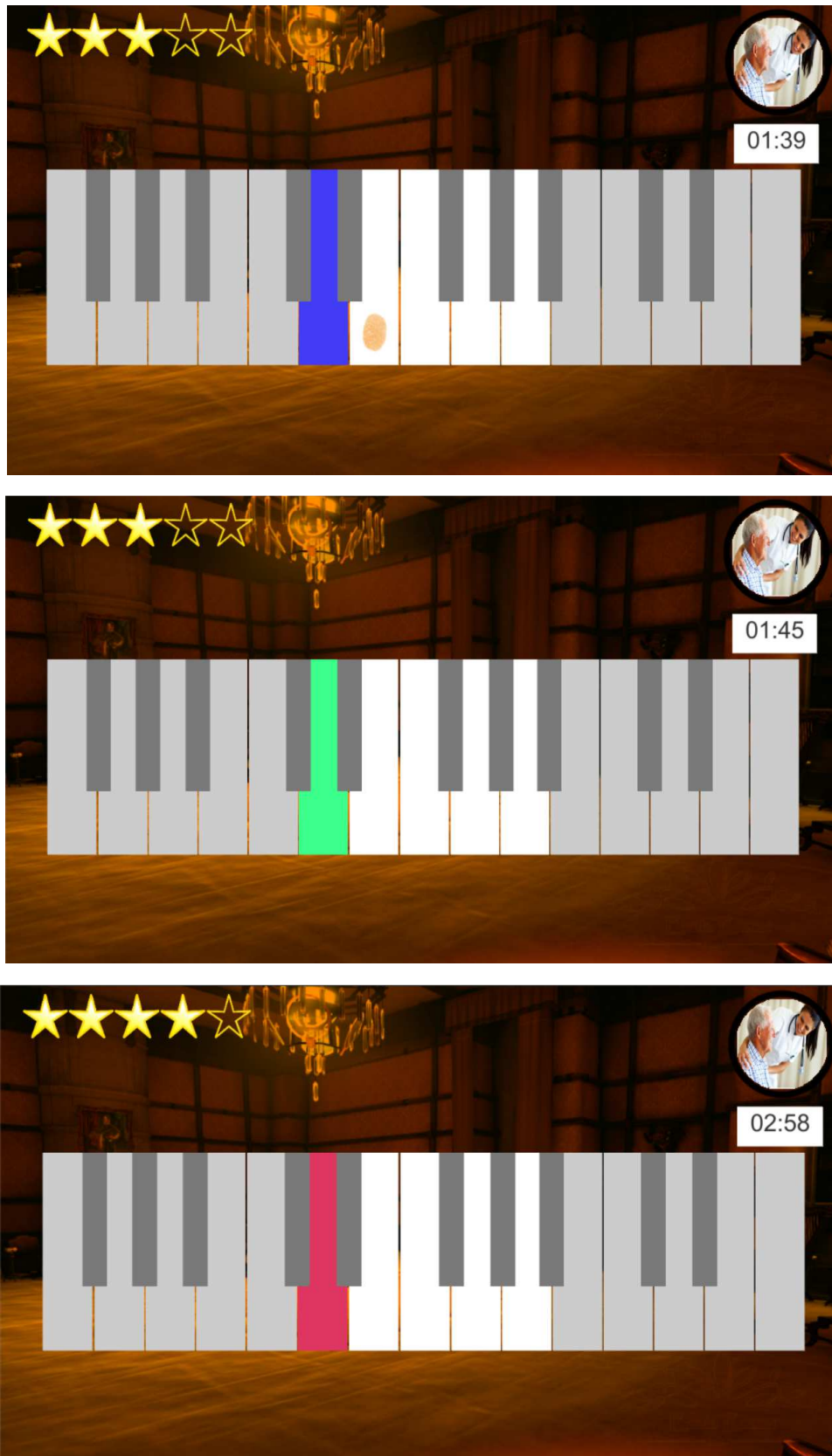
Antes de comenzar el juego, el usuario recibe las instrucciones, que en este caso indican que para conseguir completar la pieza, es necesario presionar las teclas que se iluminan en azul en el teclado. Como aparecen tan sólo como máximo cinco teclas en su color real, cada una estará asociada a un dedo, que es el que debe flexionarse para que esa tecla se considere pulsada.



**Figura 5-7.** Instrucciones del juego contenido en el Módulo Música.

El código de colores se ha explicado anteriormente: el usuario debe presionar las teclas en azul. Si un dedo se ha flexionado lo suficiente como para considerar que esa tecla se ha pulsado, aparece como indicador a modo de puntero, una huella dactilar.



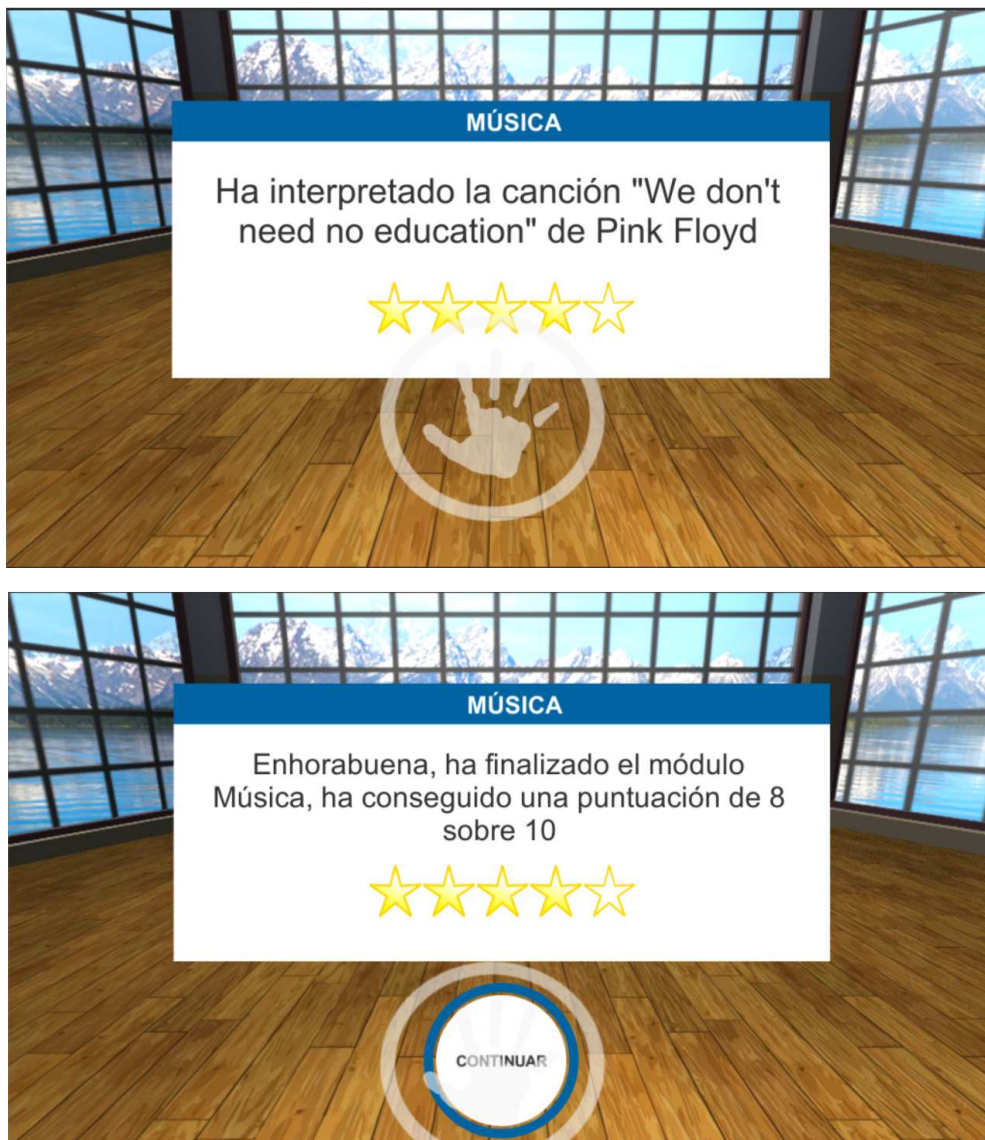


**Figura 5-8.** Código de colores empleado en el teclado.

Si una tecla se pulsa correctamente parpadea brevemente en verde, y si transcurre un umbral de tiempo superior al permitido para presionar una tecla, se contabiliza

como error, y se escucha el sonido de la tecla junto con una señal de error, a la vez que parpadea brevemente en rojo.

Al finalizar se visualizan las dos últimas pantallas: en la primera se indica al usuario el nombre de la melodía que ha interpretado, y en la siguiente la puntuación obtenida.



**Figura 5-9.** Pantallas finales donde aparece el título de la canción y la puntuación alcanzada.

Por último, existen otras dos pantallas que pueden aparecer durante el desarrollo del juego: una de pausa, si no se detecta actividad de la mano transcurrido un tiempo superior al establecido (fuera del alcance del dispositivo Leap Motion), de la cual el usuario debe salir voluntariamente; y otra de error, cuando el dispositivo descubre que se está utilizando la otra mano para realizar los ejercicios. De esta última se sale automáticamente superado un pequeño contador temporal descendente.



**Figura 5-10.** Pantallas de pausa y error.

## 5.5 Módulo Percusión

En este juego el usuario visualiza una sala de conciertos en la que debe conseguir imitar secuencias rítmico-melódicas con timbales, cometiendo la menor cantidad de fallos posible, interactuando a través del dispositivo Leap Motion. Los detalles de configuración pueden establecerse previamente a partir de la parte web con la que conecta el juego, para que la terapia esté adaptada a las necesidades individuales del usuario.

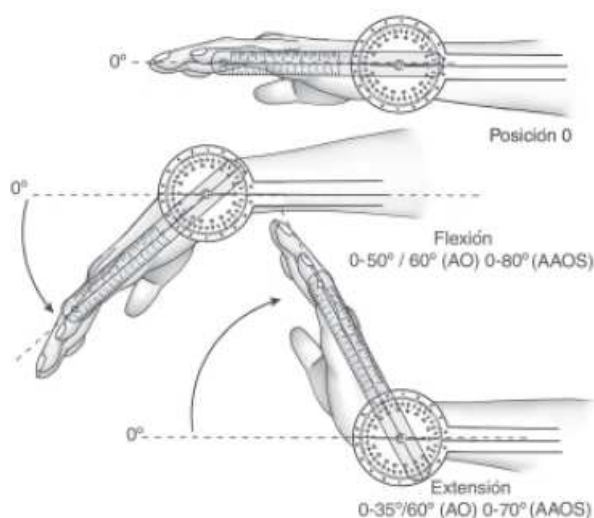
Se pretende trabajar movimientos repetitivos que son necesarios durante el desarrollo juego, de modo que se conviertan en un gesto semiautomático para el paciente. De este modo, la intensidad de la terapia puede incrementarse de forma sencilla y progresiva, en la misma línea de lo que recogía Jack en su trabajo [39].

### 5.5.1 Movimientos a trabajar

En este juego el objetivo es reforzar la rehabilitación de muñeca, en concreto el movimiento de flexión-extensión. Además, para poder golpear los diferentes

timbales, es necesario realizar un movimiento de desplazamiento sobre el dispositivo Leap Motion (de izquierda a derecha). Para determinar los ángulos con un goniómetro, el brazo móvil acompaña el movimiento, de modo que se registra el ángulo alcanzado entre la posición 0 y la final derivada del movimiento de flexión o extensión. Existen valores de referencia tabulados, como los determinados por la Asociación para el Estudio de la Osteosíntesis (AO) y la Academia Americana de Cirujanos Ortopédicos (AAOS). En el caso particular descrito, los valores normales recogidos son los siguientes [58]:

- Flexión: 0-50°/60° (AO) y 0-80° (AAOS)
- Extensión: 0-35°/60° (AO) y 0-70° (AAOS).



**Figura 5-11.** Flexión-extensión de muñeca partiendo desde la posición 0 [58].

### 5.5.2 Elección del instrumento musical

En el Módulo Percusión, el usuario debe imitar secuencias que primero escucha y luego debe reproducir en un conjunto de percusión. Habitualmente, los conjuntos instrumentales de este tipo suelen contener cuatro timbales, lo cual permite cubrir las necesidades del repertorio orquestal. Sin embargo existen excepciones en que es necesario incorporar un quinto instrumento más pequeño para alcanzar sonidos más agudos, llegando a cubrir aproximadamente tres octavas. En este caso, los sonidos utilizados abarcan desde un  $si_1$  hasta  $la_3$ . Un timbal tiene un rango de afinación de hasta una octava, y en este juego se utilizan dos conjuntos de sonidos reales en mp3: por un lado a distancia de cuartas y segunda en el caso del último intervalo (desde  $si_1$  hasta  $la_3$ ), y por otro, sonidos que abarcan una octava desde  $fa_2$  hasta  $fa_3$ , de forma cromática (por semitono).

En los estudios que emplean MST se utilizaba una batería electrónica de 8 platos que abarcaba una octava modal de sol a sol. Se ha optado por seleccionar cinco timbales por semejanza con el juego del piano, y por si más adelante se decide realizar la adaptación para utilizarlo con los cinco dedos de la mano. Además, se considera que cinco sonidos son suficientes para construir secuencias musicales por una persona con daños motores, y posiblemente también cognitivos.

El hecho de incorporar sonidos separados por intervalos de cuarta, es para conseguir que la discriminación auditiva entre timbales sea más sencilla para el

usuario, y se parezca más a lo que se podría interpretar con timbales reales. Por otro lado, el conjunto de sonidos cromáticos permite combinaciones más complicadas de sonidos, incluso para configurar melodías. En este segundo caso, el resultado es menos semejante al que se obtendría con instrumentos reales, pero la secuencia de golpes puede resultar más sencilla de recordar para el paciente si conforma una melodía sencilla.

### 5.5.3 Elección de las piezas a interpretar

Se han creado secuencias sencillas, divididas en varias secciones, ya que en el juego se alternan episodios de escucha con otros de imitación. La estructura de las secuencias incluye dos frases cortas, y una frase final más larga con carácter conclusivo, con el fin de que el juego tenga una duración adecuada y no provoque fatiga. En este módulo no se introduce la opción de realizar un calentamiento, ya que al tratarse de movimientos de menor precisión que la requerida para articular un dedo, no se considera imprescindible ese contacto inicial previo con el juego para poder desarrollar la actividad sin problemas.

En un ejercicio de percusión sería estrictamente necesario evaluar la calidad en el ritmo, pero no es el objetivo principal de estos ejercicios, y lo que se considera para que el ejercicio sea correcto es que se golpee el timbal correspondiente en el momento preciso de la secuencia, con un margen de tiempo suficiente, en función de la velocidad de la interpretación.

### 5.5.4 Funcionamiento

El planteamiento es equivalente al utilizado en el módulo anterior: el usuario debe ser capaz de imitar una secuencia musical, independientemente de si sabe o no leer una partitura. En el estudio de Thaut se comprobaba que seguir un patrón rítmico con metrónomo ayudaba a mejorar la precisión temporal de movimientos [26]. Sin embargo, no se ha considerado tampoco incluir una indicación de metrónomo en este juego, ya que no se requiere tal precisión y puede provocar una situación de ansiedad al usuario.

La dinámica consiste en, en primer lugar, escuchar una secuencia que se reproduce de forma automática, de modo que los timbales se somborean en amarillo cuando suenan. En segundo lugar, el usuario debe interactuar con el juego, y a modo de guía, el timbal a golpear se somborea en azul. Cuando un timbal se golpea de forma correcta, pasa a parpadear brevemente en verde, mientras que si no se hace en un intervalo de tiempo determinado, establecido según la velocidad a la que debería reproducirse la secuencia (en función del nivel de dificultad establecido), el timbal se pulsa de forma automática y el error se marca con un parpadeo en rojo. El código de colores es equivalente al del módulo anterior, junto con el color amarillo para la fase de escucha. Las secciones de escucha e interpretación se repiten varias veces de forma alternada.

**TABLA 5-5.** CÓDIGO DE COLORES EN EL MÓDULO PERCUSIÓN.

Color				
Significado	Secuencia	Golpear	Erróneo	Correcto

### 5.5.5 Parámetros

Del mismo modo que en el módulo anterior, desde la parte web el especialista puede establecer la configuración del juego. Entre los parámetros a indicar se encuentra la mano con la que se va a trabajar, la secuencia que desea interpretarse y el nivel de dificultad. Asimismo, se puede indicar si se quiere emplear el conjunto de valores límite capturados durante la calibración para establecer los umbrales de flexión y extensión de muñeca, y si es así, en qué porcentaje se desea ser estricto con esas medidas.

**TABLA 5-6.** PARÁMETROS CONFIGURABLES EN EL MÓDULO PERCUSIÓN.

Parámetro	Descripción
<b>Selección de mano</b>	Permite que el terapeuta marque la mano a utilizar en el juego.
<b>Uso de calibración</b>	Se pueden establecer los umbrales para los movimientos de flexión y extensión en el juego a partir de los valores capturados en la calibración, o bien utilizar la configuración por defecto.
<b>Porcentaje de calibración</b>	El terapeuta puede seleccionar un porcentaje entre el rango de valores calibrados para establecer los umbrales del juego.
<b>Seleccionar secuencia</b>	Permite que se pueda establecer la secuencia a trabajar, o bien, que se seleccione una de forma aleatoria.
<b>Nivel del juego</b>	Se puede elegir entre 8 niveles, en función de la dificultad deseada para el módulo.

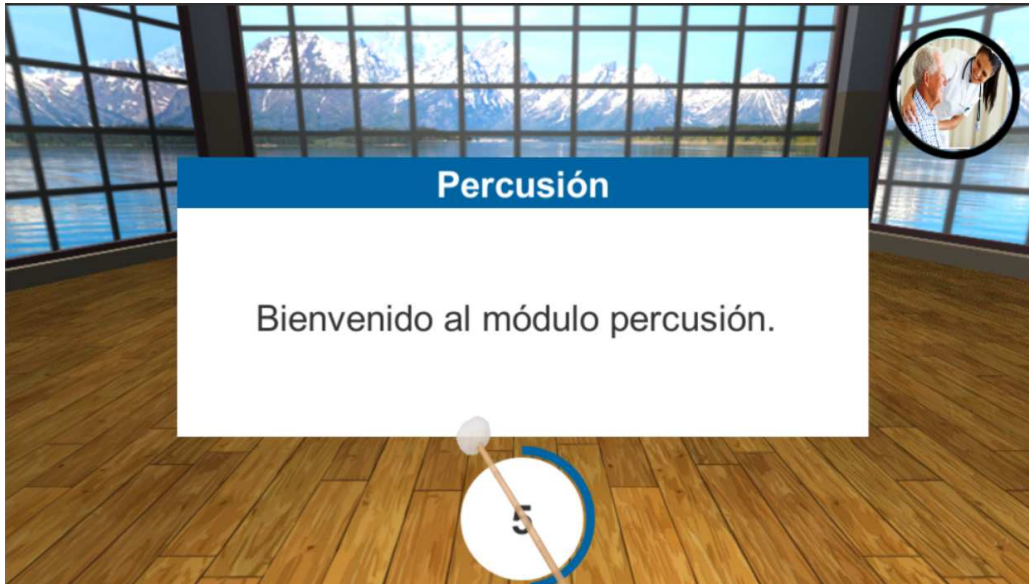
Respecto a la información obtenida a la salida, cabe mencionar que tanto el paciente como el terapeuta pueden conocer datos sobre el tiempo empleado en la sesión, los ángulos máximo y mínimo conseguidos en el rango articular y la puntuación obtenida tras la ejecución del juego. El terapeuta además recibe información sobre la cantidad de errores que se han producido en cada timbal. A partir de dichos errores, se calcula la puntuación final del juego.

**TABLA 5-7.** PARÁMETROS CONFIGURABLES EN EL MÓDULO PERCUSIÓN.

Parámetro	Información
<b>Tiempo</b>	Periodo temporal transcurrido durante el desarrollo del juego.
<b>Rango de movimiento</b>	Ángulos medidos en la calibración de los movimientos de flexión y extensión de muñeca.
<b>Errores por timbal</b>	Cantidad de errores cometidos por timbal durante la interpretación.
<b>Puntuación</b>	Nota final obtenida, calculada considerando los errores producidos.

### 5.5.6 Pantallas y desarrollo del juego

Inicialmente se visualiza la pantalla de bienvenida al módulo, y se observa la integración de la mano en el juego representada con una baqueta, herramienta empleada para golpear los timbales.



**Figura 5-12.** Pantalla inicial del Módulo Percusión.

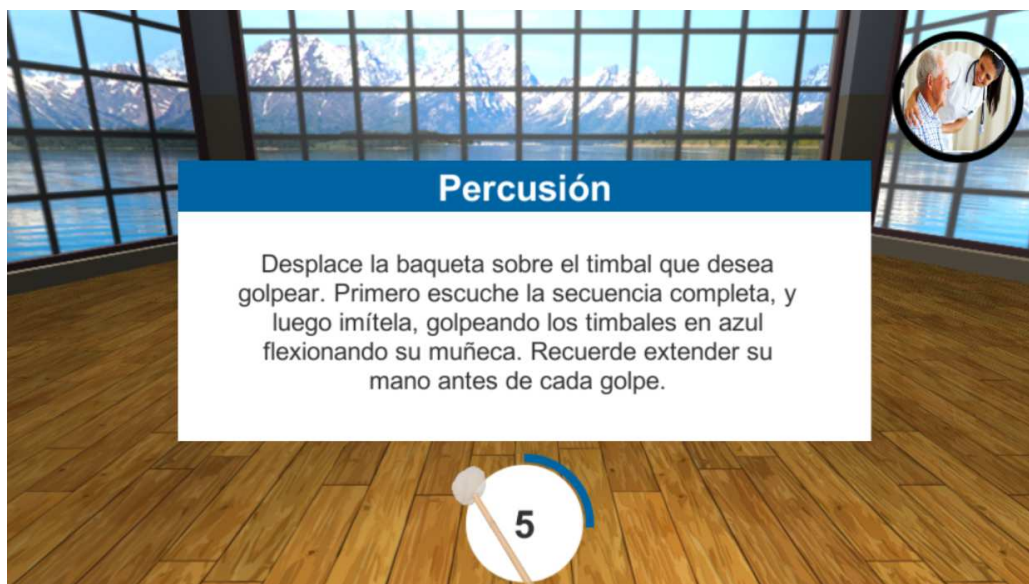
En primer lugar se realiza la calibración de los movimientos de muñeca. Para ello, se requiere que el usuario imite los movimientos que se muestran en los vídeos de la parte izquierda de la pantalla: flexión y extensión de muñeca. Se puede observar el movimiento que se realiza en la mano simulada, así como conocer los valores mínimo (conseguido con la flexión), máximo (alcanzado con la extensión) y actual de los ángulos realizados con la muñeca.



**Figura 5-13.** Calibración de los movimientos de muñeca.

Las instrucciones se muestran antes de iniciarse el juego: en este escenario, para golpear un timbal, debe realizarse un movimiento de flexión cuando la mano se ha

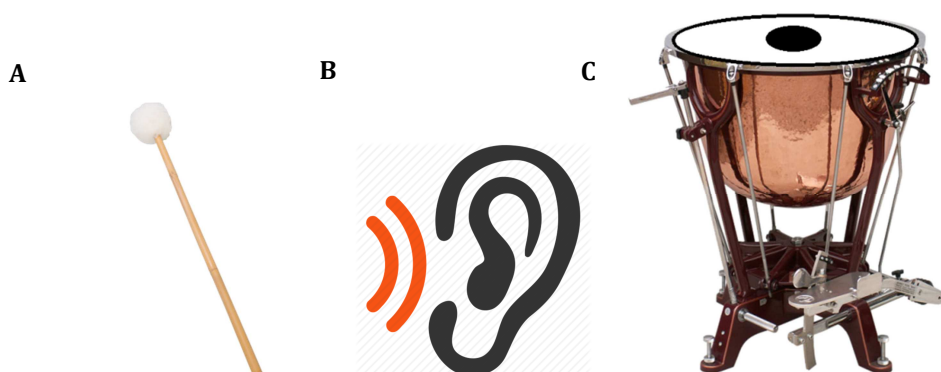
desplazado sobre el timbal que se desea golpear. Inmediatamente después, debe extenderse para iniciar el siguiente golpe, o bien, el juego no capturará un nuevo movimiento de flexión.



**Figura 5-14.** Instrucciones del Módulo Percusión.

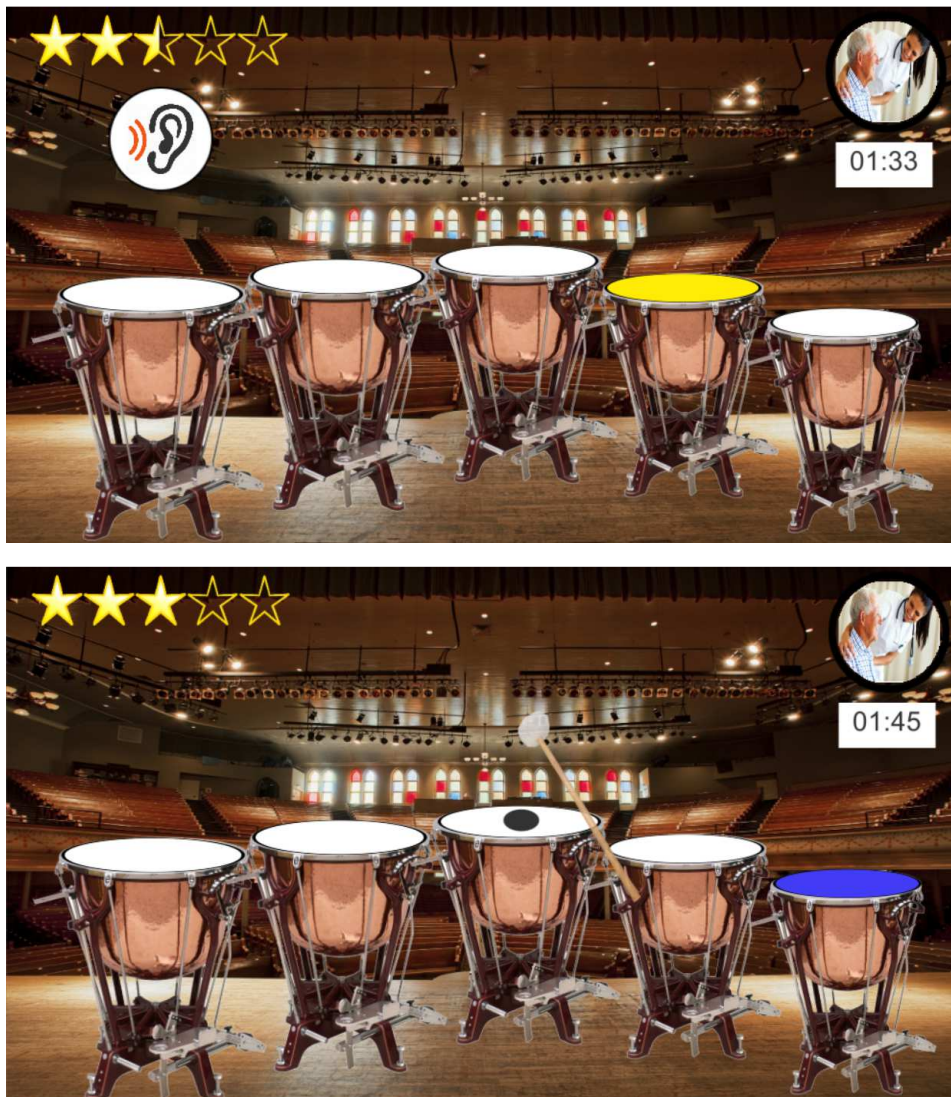
Durante la fase de escucha, aparece un icono en la pantalla que indica que se trata de un periodo dedicado tan sólo a la audición. La secuencia suena a la vez que los timbales correspondientes se somborean en amarillo, y aunque el usuario intente golpear algún instrumento durante este espacio temporal no podrá, ya que la interacción se encuentra bloqueada.

Cuando el juego comienza, el icono anteriormente señalado desaparece. Ahora, el participante debe golpear los timbales en azul, flexionando su muñeca en el momento en que su mano se ha desplazado sobre el instrumento deseado. Como referencia para el usuario, ya que no se visualiza una mano virtual, en el momento de la interacción, se representa el golpe de la baqueta con un círculo negro en el centro del timbal.



**Figura 5-15.** Elementos visuales del Módulo Percusión: (A) baqueta empleada como marcador de manos; (B) icono que simboliza que se trata de una fase de escucha; (C) aspecto de un timbal en el instante en que es golpeado.





**Figura 5-16.** Muestra de desarrollo del juego: arriba, en la fase de escucha, los timbales incluidos en la secuencia se somborean en amarillo. Abajo, durante la ejecución los timbales a golpear se visualizan en azul.

Cuando se golpea un timbal correcto parpadea en verde, y si se supera un periodo temporal superior al establecido para hacerlo, se anota el error en el instrumento correspondiente, que pasa a parpadear en rojo, a la vez que se escucha el sonido asociado junto con una señal de error.

La última pantalla que se visualiza indica el final del módulo, felicita al usuario por su trabajo y le informa sobre la puntuación obtenida, para la que se valoran los errores cometidos durante la ejecución.

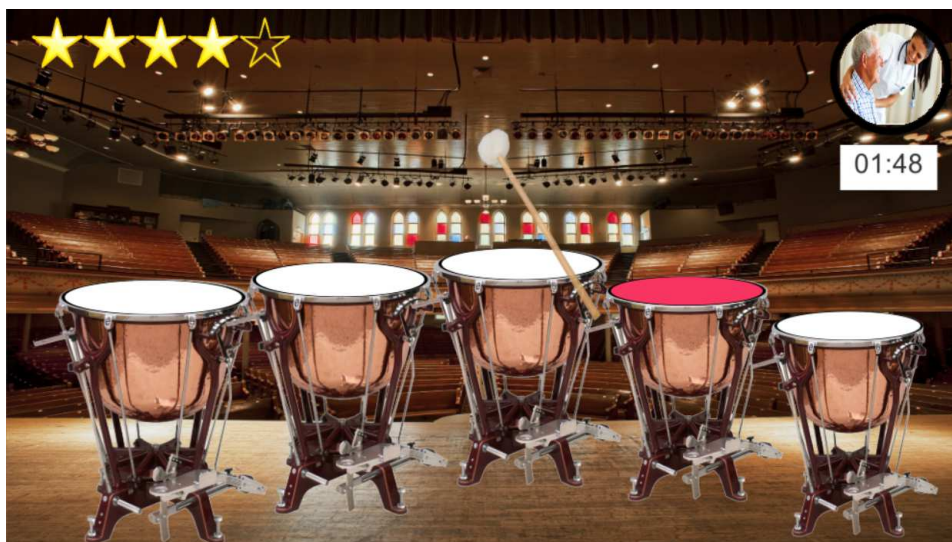
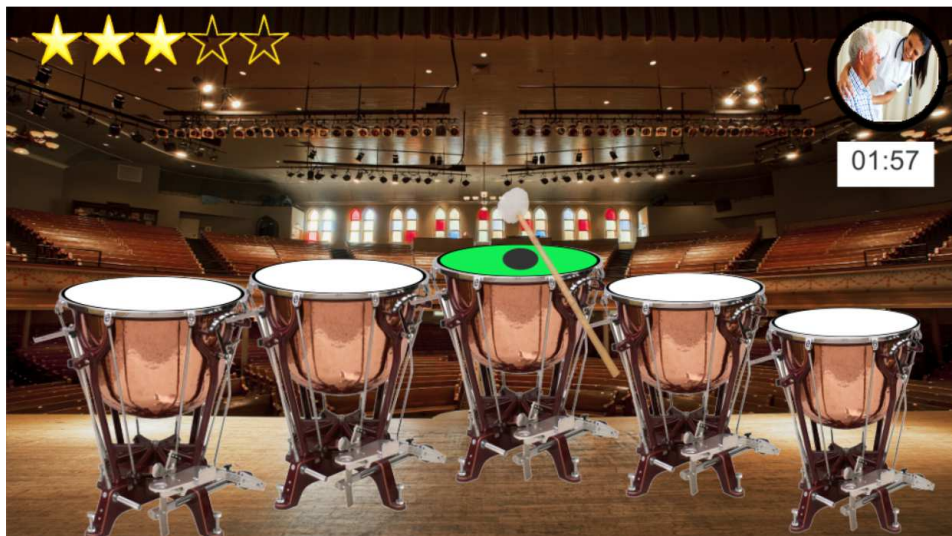


Figura 5-17. Muestra del código de colores empleado en los timbales.



Figura 5-18. Pantalla final del módulo, donde se informa sobre la puntuación alcanzada.

Durante el juego pueden aparecer las pantallas de pausa y error, la primera de ellas en caso de que la mano no muestre actividad en un periodo de tiempo establecido, y la segunda si el dispositivo Leap Motion detecta que no se está empleando la mano correcta para la actividad.

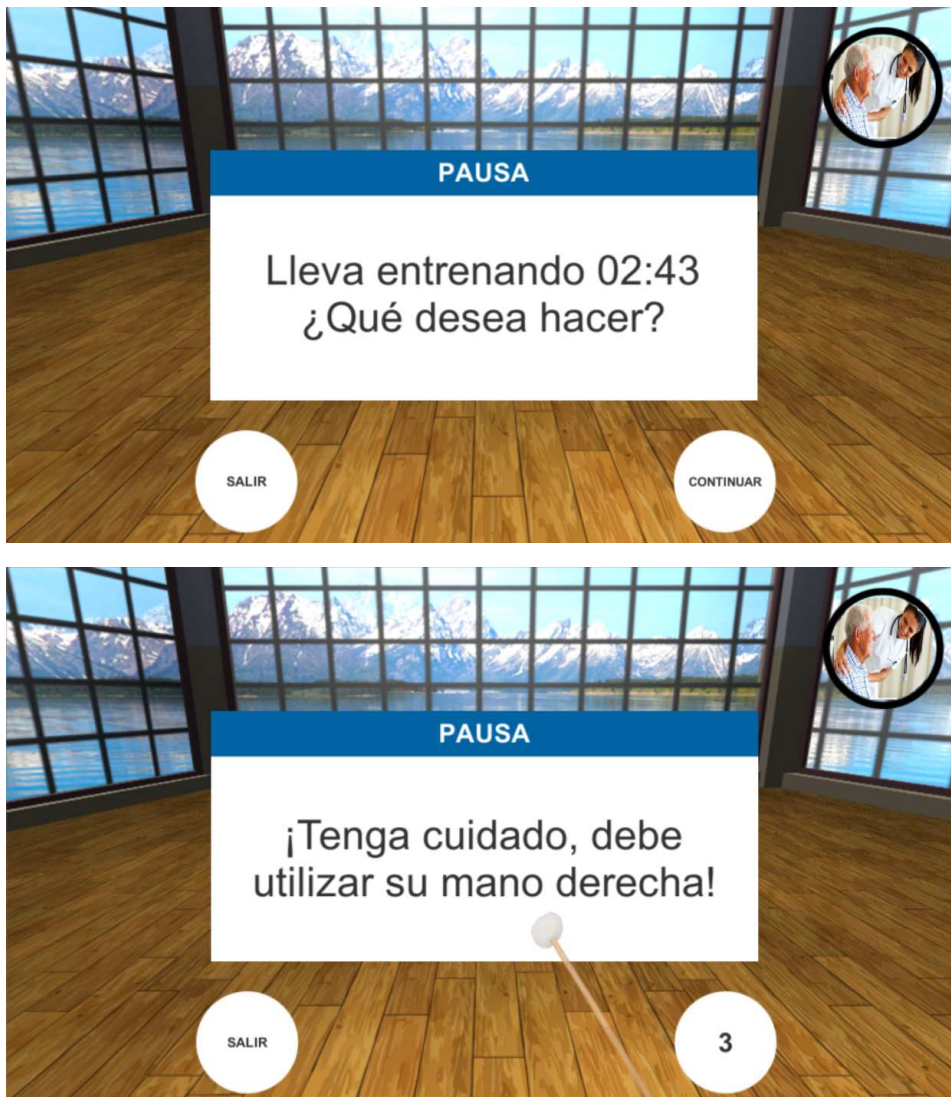


Figura 5-19. Pantallas de pausa y error.

## 5.6 Estimación presupuestaria

Para el desarrollo de los módulos descritos ha sido preciso realizar una inversión económica en ciertos elementos materiales. Por un lado, el dispositivo Leap Motion, valorado aproximadamente en 70 €, y por otro, un equipo que contara con suficiente capacidad para ejecutar las aplicaciones de forma regular: se ha utilizado un portátil con tarjeta gráfica NVIDIA, con un precio estimado de 1.200 €. Por último, cabe señalar que no ha sido necesario adquirir una licencia profesional del software, ya que el trabajo se ha podido realizar sin inconvenientes con una licencia de Unity Personal gratuita.



# CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A lo largo de este trabajo, se han analizado las necesidades que presentan las personas que sufren una enfermedad cerebrovascular, y las terapias de neurorehabilitación más extendidas: es posible dar un enfoque diferente al tradicional para conseguir nuevos avances, por ejemplo, de la mano de la música y nuevas tecnologías emergentes.

## 6.1 Conclusiones generales

La Realidad Virtual se presenta hoy día como una alternativa viable y accesible para completar programas de rehabilitación con fines terapéuticos. El proceso que se inicia tras un accidente cerebrovascular determina de forma muy importante la recuperación del paciente, y no siempre se cuenta con un programa de entrenamiento adecuado.

Como primera conclusión, no se puede perder de vista que resulta fundamental que el paciente realice de forma regular y con la intensidad necesaria los ejercicios que tiene programados. Sin embargo, es frecuente que la motivación no sea suficiente, y por ello con módulos de juego como los desarrollados, se puede conseguir que se complete un programa diseñado a medida sin que se convierta en una rutina poco atractiva.

En segundo lugar, como se indicaba en el párrafo anterior, el conjunto de ejercicios debe estar adaptado a cada paciente en particular. Esto es muy sencillo de realizar a través de un sistema como el descrito, y además, es tan sólo el especialista quien gestiona esa parte de forma personalizada.

En tercer lugar, para que se pueda realizar un seguimiento adecuado del paciente debe facilitarse el trabajo mediante un buen sistema de recogida de datos. A partir de este tipo de herramientas se convierte en una tarea sencilla, y que permite reaccionar a tiempo para readaptar el programa de entrenamiento en caso de que la evolución de la persona sea diferente a la esperada.

Por otro lado, el apoyo proporcionado por la música permite reforzar la acción motora y que se aprendan antes las tareas. Además, se recuperan antes ciertas conexiones cerebrales, por lo que incorporar la música en una tarea tan tediosa, resulta un acierto.

Por tanto, el sistema desarrollado cumple con los objetivos propuestos de forma inicial, y se presenta como una alternativa atractiva para el tratamiento y seguimiento de personas con dificultades motoras en fase de recuperación,

afectadas por parestias leves en sus extremidades superiores. Las dos actividades musicales diseñadas dan respuesta a las necesidades de dichos posibles usuarios, y permiten acercar una terapia ligada a la música al paciente sin necesidad de disponer de grandes medios materiales ni personales.

## 6.2 Líneas futuras

Para que los módulos desarrollados resulten perfectamente validados, sería necesario realizar pruebas suficientes con pacientes. De este modo se podrían realizar los ajustes necesarios, e incluir respuestas a posibles nuevas necesidades no consideradas.

Asimismo, manteniendo la dualidad planteada en el proyecto TELEKIN, sería deseable que los juegos desarrollados con Leap Motion pudieran utilizarse para trabajar nuevos movimientos, capturados con Kinect.

Finalmente, no puede olvidarse que las posibilidades de mano de la música son inmensas: reorganización neurológica, cambios estructurales y en las conexiones entre áreas distantes, co-activación motora y auditiva, actividad cerebral creciente al escuchar melodías, mejoras cognitivas en el dominio de la memoria verbal y la atención, procesamiento y control emocional... La música, sirve para algo más.

## REFERENCIAS

- [1] R. Caminero, L. Méndez-Herrero, F. Díaz-Pernas *et al.*, “Telekin: Tele-rehabilitation System for Musculoskeletal and Cognitive Disorders using Natural Movement Interface Devices, *ICT4AWE 2017*, pp. 198-203, 2017.
- [2] E. Martínez-Vila, M. Murie-Fernández, I. Pagola y P. Irimia, “Enfermedades cerebrovasculares”, *Medicine*, vol. 10 (72), pp. 4871-4881, 2011.
- [3] M. Murie-Fernández, P. Irimia, E. Martínez-Vila *et al.*, “Neurorehabilitación tras el ictus”, *Neurología*, vol. 25 (3), pp. 189-196, 2010.
- [4] M. Bayón y J. Martínez, “Plasticidad cerebral inducida por algunas terapias aplicadas en el paciente con ictus”, *Rehabilitación*, vol. 42, pp. 86-91, 2008.
- [5] M. Bayón-Calatayud, A. Gil-Agudo, A.M. Benavente-Valdepeñas *et al.*, “Eficacia de nuevas terapias en la neurorehabilitación del miembro superior en pacientes con ictus”, *Rehabilitación*, vol. 48, pp. 232-240, 2013.
- [6] S. Schneider, P.W. Schönle, E. Altenmüller y T.F. Münte, “Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke”, *Journal of Neurology*, no 254, pp 1339-1346, 2007.
- [7] M. Bayón y J. Martínez, “Rehabilitación del ictus mediante realidad virtual”, *Rehabilitación*, vol. 44, pp. 256-260, 2010.
- [8] A. Sterr, T. Elbert, I. Berthold, *et al.*, “Longer versus shorter daily constraint-induced movement therapy of chronic hemiparesis: an exploratory study”, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, no 83, pp.1374-1377, 2002.
- [9] J. Liepert, H. Bauder *et al.*, “Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans”, *Stroke*, no 31, pp. 1210-1216, 2000.
- [10] T. Kujala, K. Alho *et al.*, “Cross-modal reorganization of human cortical functions”, *Trends in Neuroscience*, no 23, pp. 115-120, 2000.
- [11] M. Bangert y E. Altenmüller, “Mapping perception to action in piano practice: A longitudinal DC-EEG-study”, *BMC Neuroscience*, no 4, pp. 26-36, 2003.
- [12] M. Bangert, T. Peschel, G. Schlaug *et al.*, “Shared networks for auditory and motor processing in professional pianist: evidence form fMRI conjunction”, *NeuroImage*, vol. 30, pp. 917-926, 2006.
- [13] C. Gaser y G. Schlaug, “Brain structures differ between musicians and non-musicians”, *Journal of Neuroscience*, no. 23, pp.9240-9245, 2003.
- [14] G. Schlaug, L. Jänckem L. Huang *et al.*, “Increased corpus callosum size in musicians”, *Neuropsychologia*, vol. 33, no. 8, pp. 1047-1055, 1995.
- [15] A. Imfeld, M. Oechslin, M. Meyer *et al.*, “White matter plasticity in the corticospinal tract of musicians: a diffusion tensor imaging study”, *Neuroimage*, vol. 46, pp. 600-607, 2009.

- [16] M. Oechslin, A. Imfeld, T. Loenneker, *et al.*, "The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a function of musical expertise: a diffusion tensor imaging study", *Frontiers in Human Neuroscience*, no. 3:76, 2009.
- [17] S. Baumann, S. Koeneke, C.F. Schmidt *et al.*, "A network for audio-motor coordination in skilled pianist and non-musicians", *Brain Research*, vol. 1161, pp. 65-78, 2007.
- [18] C. François, J. Grau-Sánchez, E. Duarte y A. Rodríguez-Fornells, "Musical training as an alternative and effective method for neuro-education and neuro-rehabilitation", *Frontiers in Psychology*, vol. 6, 2015.
- [19] J. Haueisen y T.R. Knosche, "Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception", *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13:6, pp. 786-792, 2001.
- [20] G. Scheler, M. Lotze, V. Braitenberg *et al.*, "Musician's brain: balance of sensorimotor economy and frontal creativity", *Society of Neuroscience Abstracts*, 27, 76.14, 2001.
- [21] A. Pascual-Leone, D. Nguyet, L.G. Cohen *et al.*, "Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills", *Journal of Neurophysiology*, vol. 74, pp. 1037-1045, 1995.
- [22] J. Classen, J. Liepert, S.P. Wise *et al.*, "Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice", *Journal of Neurophysiology*, vol. 79, pp. 1117-1123, 1998.
- [23] A. Wohlschläger y H. Bekkering, "Is human imitation based on a mirror-neurone system? Some behavioural evidence", *Experimental Brain Research*, vol. 143, pp. 335-341, 2002.
- [24] T. Särkämö, E. Altenmüller, A. Rodríguez-Fornells e I. Peretz, "Editorial: Music, brain and rehabilitation: Emerging Therapeutic applications and potential neural mechanisms", *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 10, 2016.
- [25] T. Särkamo, M. Terveniemi, S. Laitinen *et al.*, "Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke", *Brain*, no. 131, pp. 866-876, 2008.
- [26] M. Thaut, G.P. Kenyon, C.P. Hurt *et al.*, "Kinematic optimization of spatiotemporal patterns in pare training with stroke patients", *Neuropsychologia*, no. 40, pp. 1073-1081, 2002.
- [27] J. Grau-Sánchez, J. Amengual *et al.* "Plasticity in the sensorimotor cortex induced by music-supported therapy in stroke patients: a TMS study", *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, 2013.
- [28] S. Schneider, T. Münte *et al.* , "Music-Supported Training is more efficient than Functional Motor Training for recovery of fine motor skills in stroke patients", *Music Perception*, vol. 27, no 4, pp. 271-280, 2010.



- [29] A. Rodríguez-Fornells, T. Münte y C. Grau, "Plasticidad en el córtex sensoriomotor inducida por terapia musical en pacientes con accidente cerebrovascular", *XII Simposio Fundació La Marató TV3: Alzheimer y otras enfermedades del cerebro*, 2011.
- [30] E. Altenmüller, S. Schneider, P.W. Marco-Pallares y T.F. Münte, "Neural reorganization underlies improvement in stroke induced motor dysfunction by music supported therapy", *Annals of the New York academy of Sciences*, no 1169, pp. 395-405, 2009.
- [31] N. Rojo, J. Amengual, M. Juncadella *et al.*, "Music-supported therapy induces plasticity in the sensorimotor cortex in chronic stroke: A single case study using multimodal imaging (fMRI-TMS)", *Brain Injury*, no 25, pp. 787-793, 2011.
- [32] A. Rodríguez-Fornells, N. Rojo *et al.*, "The involvement of audio-motor coupling in the music-supported therapy applied to stroke patients", *Annals of the New York Academy of Sciences*, no 1252, pp. 282-293, 2012.
- [33] A. Lahav, E. Saltzman y G. Schlaug, "Action representation of sound: audiomotor recognition network while listening to newly acquired actions", *Journal of Neuroscience*, no. 27, pp. 308-314, 2007.
- [34] J. Amengual, N. Rojo *et al.*, "Sensorimotor plasticity after music-supported therapy in chronic stroke patients revealed by transcranial magnetic stimulation", *Plos One*, vol. 8, 2013.
- [35] F.T. Van Vugt, J. Ritter *et al.*, "Music-supported motor training after stroke reveals no superiority of synchronization in group therapy", *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 8, 2014.
- [36] M. Villeneuve, V. Penhune y Anouk Lamontagne, "A piano training program to improve manual dexterity and upper extremity function in chronic stroke survivors", *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 8, 2014.
- [37] A. Forsblom, S. Laitinen, T. Särkämö y M. Tervaniemi, "Therapeutic Role of music listening in stroke rehabilitation", *The Neurosciences and Music III: Disorders and plasticity*, no 1169, pp. 426-430, 2009.
- [38] W. Hsian-Shen, H. Chaoli, D. Chiu and T. Sung-Nan, "Using augmented reality gaming system to enhance hand rehabilitation", *Proc.2nd IEEE Conf. on Education Technology and Computer (ICETC)*, pp. V3/243-V3/246, 2010.
- [39] D. Jack, R. Boian, A. S. Merians, "Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation", *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 308-318, 2001.
- [40] C. Boulanger, A. Boulanger, L. de Greef *et al.*, "Stroke rehabilitation with a sensing Surface", *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1243-1246, 2013.
- [41] S. Subramanian, L. A. Knaut, Ch. Beaudoin *et al.*, "Virtual reality environments for post-stroke arm rehabilitation", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4:20, 2007.

- [42] A. G. Dionísio Corrêa, I. Karaguilla Ficheman, M. do Nascimento y R. Lopes, "Computed Assisted Music Therapy: a Case Study of an Augmented Reality Musical System for children with cerebral palsy rehabilitation", *Ninth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*, pp. 218-220, 2009.
- [43] S. V. Adamovich, G. G. Fluet, A. Mathai *et al.*, "Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 6:28, 2009.
- [44] N. Friedman, V. Chan, D. Zondervan *et al.*, "MusicGlove: motivating and quantifying hand movement rehabilitation by using functional grips to play music", *33<sup>rd</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2359-2363, 2011.
- [45] T. Markow, N. Ramakrishnan, K. Huang, *et al.*, "Mobile Music Touch: Vibration Stimulus in hand rehabilitation", *4<sup>th</sup> International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, pp. 1-8, 2010.
- [46] B. Viriyasaksathian, S. Khemmachotikun, P. Kaimuk y Y. Wongsawat, "EMG-Based Upper-Limb rehabilitation via music synchronization with Augmented Reality", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 2856-2859, 2011.
- [47] A. Baldominos, Y. Saez y C. García del Pozo, "An approach to physical rehabilitation using state-of-the-art virtual reality and motion tracking technologies", *Procedia Computer Science*, vol. 64, pp. 10-16, 2015.
- [48] H. Park, J. Lee y J. Bae, "Development of a dance rehabilitation system using Kinect and a Vibration Feedback Glove", *15<sup>th</sup> International Conference on Control, automation and systems (ICCAS)*, pp. 1878-1880, 2015.
- [49] B. Rubio, J. Nirme, E. Duarte *et al.*, "Virtual reality based tool for motor function assessment in stroke survivors", *Converging clinical and engineering research on neurorehabilitation*, vol. 1, pp. 1037-1041, 2013.
- [50] J. C. Stewart, S-C. Y, Y. Jung *et al.*, "Intervention to enhance skilled arm and hand movements after stroke: a feasibility study using a new virtual reality system", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4:21, 2007.
- [51] G. Marin, F. Dominio y P. Zanuttigh, "Hand gesture recognition with Leap Motion and Kinect devices", *IEEE International Conference on Image Processing (ICP)*, 2014.
- [52] I. Perdana, "Teaching elementary school students new method of music performance with Leap Motion", *International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM)*, pp. 273-277, 2014.
- [53] M. Khademi, H. M. Hondori, A. McKenzie *et al.*, "Free-hand interaction with Leap Motion controller for stroke rehabilitation", *CHI '14 Extended abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1663-1668, 2014.

- 
- [54] Z. Liu, Y. Zhang, P-L. P. rau, *et al.*, “Leap-Motion based online interactive system for hand rehabilitation”, en *Cross-Cultural Design Applications in Mobile Interaction, Education, Health, Transport and Cultural Heritage*, Switzerland: Springer International Publishing, 2015, vol. 9181 de la serie *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 338-347.
- [55] P. Chophuk, S. Chumpen, S Tungjitkusolmun y P. Phasukkit, “Hand postures for evaluation trigger finger using Leap Motion controller”, *8<sup>th</sup> Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, 2015.
- [56] J. S. Artal-Sevil y J. L. Montañés, “Development of a robotic arm and implementation of a control strategy for gesture recognition through Leap Motion device”, *IEEE Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEET)*, 2016.
- [57] N. Matos, A. Santos y A. Vasconcelos, “Kinteract: a multi-sensor physical rehabilitation solution based on interactive games”, *Proceedings of the 8th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, pp. 350-353, 2014.
- [58] C. H. Taboadela, *Goniometría: Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*, 1<sup>a</sup> ed. Buenos Aires: Asociart ART, 2007.