

Escuela de Doctorado

Universidad Jaume I



UNIVERSITAT  
JAUME•I

TESIS DOCTORAL

SISTEMA INTERACTIVO DE REALIDAD AUMENTADA Y  
GAMIFICACIÓN PARA LA REHABILITACIÓN Y MEJORA FÍSICA  
ASISTIDA EN ENTORNOS NO SUPERVISADOS BASADO EN  
CÁMARAS RGB-D

Autor:

GABRIEL FUERTES MUÑOZ

Directores:

DR. FILIBERTO PLA BAÑÓN

DR. RAMÓN A. MOLLINEDA CÁRDENAS

Castellón de la Plana, diciembre 2022





Programa de doctorado en Informática

Línea de Ingeniería Visual

Escuela de Doctorado de la Universidad Jaume I

SISTEMA INTERACTIVO DE REALIDAD AUMENTADA Y  
GAMIFICACIÓN PARA LA REHABILITACIÓN Y MEJORA FÍSICA  
ASISTIDA EN ENTORNOS NO SUPERVISADOS BASADO EN  
CÁMARAS RGB-D

Memoria presentada por Gabriel Fuertes Muñoz para optar al  
grado de doctor por la Universidad Jaume I

Doctorando: Gabriel Fuertes Muñoz	Director: Dr. Filiberto Pla Bañón	Director: Dr. Ramón A. Mollineda Cárdenas
Firma	Firma	Firma

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS**

**La presente tesis no ha recibido financiación por parte de ninguna entidad, no obstante, ha sido desarrollada dentro del ámbito industrial en la empresa Edison Desarrollos S.L.U., a la cual agradecemos su colaboración y entrega en todo el proceso.**

---

*Siempre que enseñes; enseña también, a la vez, a dudar de lo que enseñas.*

*José Ortega y Gasset.*

---



*A mi familia. Mi hermana y mi tía.*

*A los que ojalá hubieran podido estar porque  
su recuerdo me impulsa a alcanzar nuevas  
metas y seguir trabajando.*



## Agradecimientos

*Debemos encontrar tiempo para detenernos y agradecer a las personas que hacen la diferencia en nuestras vidas. (John F. Kennedy)*

Ha sido un largo camino el que nos ha llevado hasta este punto y seguido, que no final, pues el camino siempre continúa y sin duda, es el momento de detenerme y agradecer a las personas que con su apoyo y determinación me han acompañado hasta aquí. Siempre he oído en mi casa la frase de “es de bien nacidos el ser agradecidos” y yo tengo que hacer honor a esta frase, pues son muchas las personas que me han ayudado a culminar esta tesis.

En primer lugar, a mis directores, D. Filiberto Pla y D. Ramón A. Mollineda, pues sin su acompañamiento y consejo, sin olvidar la paciencia y trabajo aportado a través de sus correcciones y puntos de vista distintos a los míos, no habría sido posible haber terminado este largo trabajo. No puedo olvidar a D. Jesús Gallardo, mi compañero de departamento, que ha dejado de ser un compañero para convertirse en un amigo. Quiero agradecer también a mi amigo desde niños, Raúl León, quien me puso en contacto con mis directores y que me animó a seguir este camino.

También quiero agradecer a mi equipo de Starglob Soluciones Informáticas y Edison Desarrollos, pues juntos hemos hecho posible el desarrollo de una idea, un tanto alocada, que tuve de ayudar a las personas a través de la tecnología en su proceso de rehabilitación. Han sido muchos años de duro trabajo, cambios, adaptaciones, giros inesperados, momentos difíciles y pruebas que nos hacían evolucionar para finalmente obtener los resultados que buscábamos. No habría sido posible sin vosotros.

Me siendo afortunado del trayecto de este camino, pues me ha permitido conocer grupos de investigación, personas, asociaciones y empresas que de otra manera habría sido imposible. Gracias a la Universidad de Zaragoza, por todo lo que me ha brindado a lo largo del tiempo. A la Universidad Jaime I y a Cuatroochenta, que me han permitido colaborar con su cátedra y descubrir nuevas posibles colaboraciones.

Finalmente, a mi familia, pues ha tenido que sufrir los momentos difíciles que todos experimentamos a lo largo de este duro trabajo. En especial a mi tía Mari Carmen, pues siempre ha estado a nuestro lado en todos los momentos de nuestra vida, buenos y malos. A mi hermana María, lo único que tengo, es decir, mi todo, desde que nació. No olvidaré nunca a los miembros que me faltan, tan importantes, tan irremplazables, que ojalá hubieran podido estar en este momento. Creo que, aunque no los pueda ver, me acompañan, me observan y me guían a lo largo del camino y espero que se sientan orgullosos de mi trabajo, pues ha sido su cariño, sus enseñanzas y su memoria las bases que han hecho que haya llegado hasta aquí.



## Resumen

En esta memoria se presenta KineActiv. KineActiv es un sistema que permite llevar a cabo, en primera instancia, la rehabilitación de miembros superiores e inferiores de manera autónoma, no supervisada por un fisioterapeuta o médico rehabilitador. Esto se consigue a través de un entorno de realidad aumentada, el uso cámaras 3D, que capturan el movimiento en tiempo real, y la implementación de interfaces avanzadas de usuario. A esta tecnología, se añade un entorno gamificado, que controla y supervisa en tiempo real todos los movimientos del usuario. Este entorno permite la ejecución supervisada de ejercicios prescritos previamente por un profesional de la salud, dentro de un programa de rehabilitación específico para cada paciente. Posteriormente, con los resultados de la captación de movimientos, el sanitario, puede analizar los resultados y es capaz de obtener un informe en tiempo real de lo que ha realizado el paciente. Así pues, todo el proceso de ejecución de ejercicios realizados por cada paciente ocurre de manera autónoma y con la única supervisión por parte del sistema KineActiv, que controla, guía y supervisa todas las acciones en tiempo real. De esta manera es posible controlar y adaptar la rehabilitación de una forma personalizada. Hasta ahora no se podía conseguir este control si el fisioterapeuta o médico rehabilitador no supervisaba todo el proceso de ejecución de los ejercicios de manera presencial.

La segunda parte que se presenta es la adaptación del sistema inicial de rehabilitación hacia las personas de la tercera edad. Debido a la aparición de la pandemia del virus SARS-COVID-19, se detectó un incremento de la degeneración física y cognitiva de las personas mayores por la inactividad y el aislamiento al que fueron sometidos. Esto provocó que su calidad de vida se viera seriamente mermada, ya no sólo por los efectos de la pandemia y por tener un sistema inmune más deprimido, sino porque la inactividad hace que los músculos se debiliten de una manera notable. Si una persona, con un estado de salud normal, que realiza una actividad física moderada en su día a día con una cierta regularidad, se ve privada repentinamente de esas acciones, es posible que su condición física y mental se vean afectados de manera notable. La situación podría agravarse hasta el punto de que la persona acabe necesitando la ayuda de un andador o silla de ruedas y, en el peor de los casos, acabe postrado en una cama o incluso falleciendo. Con este sistema se pretende que las personas mayores realicen actividades que les permitan mejorar su condición física y cognitiva con el fin de que sean autosuficientes el máximo tiempo posible.



## Abstract

In this report KineActiv is presented. KineActiv is a system that allows to carry out, in the first instance, the rehabilitation of upper and lower limbs autonomously, not supervised by a physiotherapist or rehabilitation doctor. This is achieved through an augmented reality environment, the use of 3D cameras that capture movement in real time, and the implementation of advanced user interfaces. To this technology, a gamified environment is added, which controls and supervises all the user's movements in real time. This environment allows the supervised execution of exercises previously prescribed by a health professional, within a specific rehabilitation program for each patient. Subsequently, with the results of the movement capture, the healthcare provider can analyze the results and is able to obtain a real-time report of what the patient has done. Thus, the entire process of executing exercises performed by each patient occurs autonomously and with the sole supervision of the KineActiv system, which controls, guides and supervises all actions in real time. In this way it is possible to control and adapt the rehabilitation in a personalized way. Until now, this control could not be achieved if the physiotherapist or rehabilitation doctor did not supervise the entire process of carrying out the exercises in person.

The second part that is presented is the adaptation of the initial rehabilitation system towards the elderly. Due to the appearance of the SARS-COVID-19 virus pandemic, an increase in the physical and cognitive degeneration of the elderly was detected due to inactivity and the isolation to which they were subjected. This caused their quality of life to be seriously diminished, not only because of the pandemic and due to having a more depressed immune system, but also because inactivity causes the muscles to weaken significantly. If a person, with a normal health condition, who performs moderate physical activity in their day-to-day with a certain regularity, is suddenly deprived of these actions, it is possible that their physical and mental condition will be significantly affected. The situation could worsen to the point that the person ends up needing the help of a walker or wheelchair and, in the worst case, ends up bedridden or even dying. With this system it is intended that the elderly carry out activities that allow them to improve their physical and cognitive condition to be self-sufficient for as long as possible.



## Índice

1	Introducción .....	23
1.1	Contexto y motivación .....	23
1.2	Objetivos .....	26
1.3	Aportaciones y beneficios esperados.....	27
1.4	Estructura de la memoria.....	28
2	Fundamentos .....	31
2.1	Realidad aumentada .....	31
2.2	Gamificación.....	37
2.3	Cámaras RGB-D .....	39
2.4	Interfaces de usuario avanzadas .....	41
2.5	Fundamentos de la biomecánica .....	42
2.6	Tipos de contracción muscular.....	43
2.7	Roles o funciones musculares .....	43
2.8	Planos y ejes anatómicos .....	44
2.9	Clasificación de las articulaciones .....	46
2.10	Kinect: tecnología para la detección y rastreo del movimiento .....	47
3	KineActiv: concepción, diseño y desarrollo.....	57
3.1	Introducción .....	57
3.2	Alcance funcional .....	60
3.3	Alcance tecnológico .....	61
4	KineActiv: rehabilitación con supervisión automática .....	67
4.1	Introducción .....	67
4.2	Usabilidad.....	69
4.3	Control y evaluación del movimiento – diseño.....	73
4.4	Calibración de los pacientes.....	76
4.5	Márgenes de tolerancia .....	76
4.6	Evaluación del movimiento .....	77
5	KineActiv: adaptación al envejecimiento activo .....	79
5.1	Introducción .....	80
5.2	Estado del arte .....	84
5.3	Objetivos funcionales.....	86
5.4	Usabilidad.....	88
5.5	Control y evaluación del movimiento – diseño.....	93
5.6	Adaptación de los márgenes de tolerancia.....	95

5.7	Adaptación de los sistemas gráficos (interfaz, elementos de los juegos).....	96
5.8	Evaluación del movimiento .....	103
6	Evaluación experimental de KineActiv para rehabilitación.....	105
6.1	Diseño experimental .....	105
6.2	Estudio de usabilidad .....	106
6.3	Estudio de rendimiento.....	107
6.4	Resultados .....	108
7	Evaluación experimental de KineActiv para envejecimiento activo .....	113
7.1	Diseño experimental .....	113
7.2	Usabilidad.....	114
7.3	Rendimiento .....	115
7.4	Resultados .....	116
8	Conclusiones.....	123
8.1	Principales contribuciones .....	123
8.2	Conclusiones finales .....	124
8.3	Líneas de trabajo futuro .....	125
9	Acciones de difusión de resultados.....	128
10	Bibliografía .....	130

## Índice de imágenes.

Ilustración 1 - Uso de wearable en EEUU (Partners, 2013).....	25
Ilustración 2 - Ejemplo de realidad aumentada con imágenes (Rigueros Bello, 2017).....	32
Ilustración 3 - Ejemplo de realidad aumentada en el Coliseo Romano (Fritz, 2005). ....	33
Ilustración 4 - Información adicional en los alrededores del Coliseo Romano (Fritz, 2005).....	34
Ilustración 5 - Ejemplo de realidad aumentada en arqueología (Vlahakis, 2002). ....	34
Ilustración 6 - Ejemplo de zapatilla Nike siendo probada por un usuario a través de realidad aumentada (Mccluskey, 2022). ....	35
Ilustración 7 - Ejemplo de realidad aumentada en un vehículo del Grupo VW (Volkswagen, s.f.). .....	36
Ilustración 8 - Ejemplo de realidad aumentada en medicina (Kamphuis, 2014). ....	36
Ilustración 9 - Ejemplo de gamificación con el sistema KineActiv. El objetivo es cortar las frutas con las manos, provocando así el movimiento de las articulaciones superiores e incrementar la coordinación y las funciones cognitivas.....	38
Ilustración 10 - Ejemplos de sensores 3D.....	39
Ilustración 11 - Intel RealSense - <a href="http://www.intel.com">www.intel.com</a> . ....	40
Ilustración 12 - Planos anatómicos (movements, s.f.). ....	45
Ilustración 13 - Movimientos articulares (movements, s.f.). ....	45
Ilustración 14 - Clasificación de las articulaciones (Hurtado, s.f.).....	47
Ilustración 15 - Dispositivo Kinect v2. ....	48
Ilustración 16 - Dispositivo Kinect v1. ....	49
Ilustración 17 - Interferencia líneas. ....	50
Ilustración 18 - Modelo esquelético proporcionado por el Kit de desarrollo de software (SDK) que consiste en las ubicaciones 3D de 25 articulaciones (Wiedemann, Planinc, Nemeč, & Kampel, 2015). ....	52
Ilustración 19 - Un ejemplo de seguimiento del movimiento corporal a través del modelo esquelético incorporado. ....	53
Ilustración 20 - Algoritmo Kinect v2 ( <a href="http://www.microsoft.com/docs/KinectV2/">www.microsoft.com/docs/KinectV2/</a> ). ....	54
Ilustración 21 - Arquitectura del sistema KineActiv (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	62
Ilustración 22 - Conjunto de ejercicios implementados (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	62
Ilustración 23 - Diagrama de flujo de ejecución de ejercicios. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	63
Ilustración 24 - Diseño de Base de Datos.....	65
Ilustración 25 - Pantalla de Login de usuario del sistema KineActiv. ....	70
Ilustración 26 - Pantalla de información de ejercicios a realizar. ....	70
Ilustración 27 - Explicación del juego a realizar. ....	71
Ilustración 28 - Pantalla previa al inicio del ejercicio. ....	71
Ilustración 29 - Pantalla donde se realizan los juegos. ....	72
Ilustración 30 - Pantalla abandonar ejercicio.....	72
Ilustración 31 - Resultado de la ejecución. ....	73
Ilustración 32 - El sistema indica al paciente cómo corregir la posición en la escena (a) y la postura corporal (b). ....	74
Ilustración 33 - Ambiente gamificado diseñado para fomentar ejercicios concéntricos.....	75

Ilustración 34 - Márgenes de tolerancia para la abducción (a) y la flexión (b). .....	77
Ilustración 35 - Gráfico de barras evolución de población (Statista, s.f.). .....	81
Ilustración 36 - Mapa de población (Estadística, s.f.). .....	82
Ilustración 37 - Persona de la tercera edad realizando un ejercicio de KineActiv. ....	83
Ilustración 38 - El sistema ilustra la acción (un gesto con la mano) necesaria para iniciar el ejercicio. ....	88
Ilustración 39 - Un avatar 3D que ilustra cómo realizar el ejercicio de sentadilla. En la parte superior, la pantalla con el ejercicio programado. En la parte inferior, algunas tomas de la secuencia de movimiento del avatar. ....	89
Ilustración 40 - Interfaz gráfica de usuario – Aplicación backoffice.....	89
Ilustración 41 - Un elemento de realidad aumentada incrustado en un entorno gamificado: meter al ave en la jaula. ....	90
Ilustración 42 - Articulaciones y vectores involucrados en un paso de calibración para un ejercicio de hombro (izquierda) y un ejercicio de rodilla (derecha). ....	91
Ilustración 43 - La marca (un círculo que encierra el logotipo del sistema) se coloca en la posición estimada para la articulación SPINE_MID, que se encuentra alrededor de la quinta vértebra torácica (T5).....	92
Ilustración 44 - Reconocimiento de gestos: de izquierda a derecha, el círculo representa el seguimiento de la mano de un lado a otro. El círculo gris indica que la interacción ha sido correctamente identificada.....	93
Ilustración 45 - Retracción escapular ( <a href="https://workoutsprograms.com/ejercicios/retracción-escapular">https://workoutsprograms.com/ejercicios/retracción-escapular</a> ). ....	94
Ilustración 46 - Triángulo definido por las articulaciones SHOULDER_RIGHT, SPINE_SHOULDER y SHOULDER_LEFT (desde una vista superior). ....	94
Ilustración 47 - Entorno de gamificación diseñado para la retracción escapular isométrica. ....	95
Ilustración 48 - Corrección de la posición de las rodillas durante la ejecución del ejercicio de sentadilla. ....	96
Ilustración 49 - Nueva pantalla inicial KineActiv. ....	97
Ilustración 50 - Pantalla de instrucciones de uso de KineActiv.....	98
Ilustración 51 - Diseño de avatares. ....	98
Ilustración 52 - Conjunto de ejercicios a realizar por el usuario de la tercera edad.....	99
Ilustración 53 - Pantalla de preejercicio y ejercicio.....	100
Ilustración 54 - Sistema de puntuación del ejercicio. ....	100
Ilustración 55 - Conjunto donde se muestran los ejercicios realizados correctamente y los que no. ....	101
Ilustración 56 - Explicación previa al juego de la rayuela y el propio juego. ....	102
Ilustración 57 - Pantalla previa al juego del dominó y el propio juego.....	102
Ilustración 58 - Diagramas de caja a partir de distribuciones de las desviaciones estándar del Índice de Abducción Concéntrica (a) y el Índice de Flexión Concéntrica (b) entre los pacientes durante las seis sesiones. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	109
Ilustración 59 - Diagramas de caja a partir de distribuciones de los valores medios del Índice de Abducción Isométrica (a) y el Índice de Flexión Isométrica (b) entre los pacientes durante las seis sesiones. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	110
Ilustración 60 - Diagramas de caja a partir de distribuciones de los valores medios del Índice de Abducción Concéntrica (a) y el Índice de Flexión Concéntrica (b) entre los pacientes durante las seis sesiones. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	110
Ilustración 61 - Distribución de los participantes por rango de edad (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	114

Ilustración 62 - Distribuciones de las respuestas a la encuesta por sesión desde una perspectiva de edad (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).....	117
Ilustración 63 - Distribuciones de las respuestas a las encuestas por sesión desde una perspectiva de género (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).....	118
Ilustración 64 - Distribuciones de los resultados del ejercicio por sesión desde una perspectiva de edad (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).....	119
Ilustración 65 - Distribución de los resultados del ejercicio por sesión desde una perspectiva de género (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). ....	121



## Índice de tablas

Tabla 1 - Diferencias entre Kinect v1 y Kinect v2. ....	50
Tabla 2 - Resultados de la búsqueda para la revisión de la literatura: número de artículos relacionados. ....	55
Tabla 3 - Comparación de publicaciones recientes sobre envejecimiento activo y este trabajo, considerando tanto las características de los sistemas como los métodos para evaluar su efectividad. ....	86
Tabla 4 - Perfiles de los pacientes. ....	106
Tabla 5 - Resultados del estudio de usabilidad. ....	107
Tabla 6 - Los modelos de la escala de usabilidad del sistema (SUS). ....	115
Tabla 7 - Cuestionario diseñado para el estudio de aceptabilidad. Cada pregunta se clasifica en categorías de usabilidad y está relacionada con los elementos del SUS. ....	115
Tabla 8 - Pruebas estadísticas ( <i>U</i> de Mann-Whitney/Wilcoxon) para evaluar los cambios en las respuestas de la encuesta a lo largo del tiempo (sesiones 2, 4 y 6). Los valores de <i>p</i> en negrita representan diferencias significativas para $\alpha = 0,05$ . ....	117
Tabla 9 - Pruebas estadísticas ( <i>U</i> de Mann-Whitney/Wilcoxon) para evaluar los cambios en las respuestas de la encuesta a lo largo del tiempo (sesiones 2, 4, 6). Los valores de <i>p</i> en negrita representan diferencias significativas para $\alpha = 0,05$ . ....	118
Tabla 10 - Coeficientes de correlación de rango de Spearman (valores <i>p</i> ) para evaluar la dependencia estadística entre las puntuaciones de las respuestas a la encuesta y los logros físicos por rango de edad. ....	122
Tabla 11 - Coeficientes de correlación de rango de Spearman (valores <i>p</i> ) para evaluar la dependencia estadística entre las clasificaciones de las respuestas a la encuesta y los logros físicos por género. ....	122



# 1 Introducción

En esta primera sección se explica la motivación y el contexto que me ha llevado a realizar una tesis doctoral y sobre todo la creación del sistema KineActiv. Su desarrollo no ha sido sólo por el hecho de que sirva para mis investigaciones científicas, sino que creo firmemente en su valor social. El fin de intentar introducirlo en la sociedad es el de mejorar en la medida de lo posible la calidad de vida de las personas a las que va dirigido. Además, otro objetivo que me propuse es intentar que todo el mundo, independientemente de dónde viva o se encuentre, tenga las mismas posibilidades de mejorar su salud. Esta idea está muy vinculada dentro del concepto que se ha generalizado en los últimos tiempos de la “*España vaciada*” y de los “*territorios demográficamente deprimidos*”. Es más que evidente, que los grandes núcleos de población tienen muchos más servicios que las zonas más despobladas. KineActiv pretende ayudar a los habitantes de estas zonas a que tengan acceso a unos determinados servicios que de otra manera no es posible.

También establezco los objetivos que intento cubrir dentro del diseño y desarrollo del sistema presentado en esta tesis, y que sirven como base del trabajo presentado en los siguientes capítulos, así como las aportaciones logradas y los beneficios esperados dentro de la investigación realizada. Finalmente, presento la estructura de toda la memoria, y una breve descripción del contenido de cada capítulo.

## 1.1 Contexto y motivación

Una de las principales razones para hacer una tesis doctoral es la observación de una necesidad en la sociedad, y una hipótesis de investigación aplicada que permitiría satisfacerla y ofrecer una mayor calidad de vida para las personas.

Por un lado, tengo la enorme convicción de que todas las investigaciones que se lleven a cabo deben producir una mejora en la sociedad, de una manera plausible, tangible y aceptable. Por otro lado, la investigación en el campo de la salud, que permite un mayor bienestar de la sociedad y su forma de vida, es un campo que, además de ser interesante, tiene el componente añadido de producir una gran satisfacción personal, sabiendo que mi investigación tiene un impacto en la salud de las personas.

En particular, se pretende abordar necesidades sociales que hoy en día no están resueltas, como la rehabilitación a distancia o el llamado *envejecimiento activo*. Se define “*envejecimiento activo*” al hecho de mantener una actividad física y mental saludable en edades más avanzadas. En cuanto a la rehabilitación a distancia, es una necesidad que cada vez está más presente, ya que el uso de las nuevas tecnologías hace que más personas tengan acceso a servicios que de otra manera, no podían o implicaban un esfuerzo y coste demasiado elevado para poder mantenerlo de forma correcta y constante en el tiempo. Esto provoca que muchas personas, especialmente aquellas ubicadas en entornos rurales o zonas demográficamente deprimidas, perdieran la posibilidad y el derecho a ser tratadas con las mismas oportunidades que las personas que viven dentro de una ciudad más grande con todos los servicios necesarios a su alcance.

Así, el hecho de poder asistir a una persona que se encuentra físicamente separada a varios kilómetros del profesional sanitario y la posibilidad de tratarle de forma personalizada,

casi de la misma manera que si estuviera en persona ante él, es un logro enorme. El poder controlar en tiempo real los ejercicios prescritos, ya sean de actividad o cognitivos, junto con ver y examinar las constantes del paciente mientras los ejecuta, es un avance que debe ser explotado y puesto a disposición del mayor número de personas posible.

Por otro lado, las personas están viviendo cada vez más tiempo y, poco a poco, se está adoptando la idea de que, para disfrutar de esos años, es importante llegar a la vejez lo más activo posible y, si es factible, mantener esta actividad, con el fin de evitar un mayor deterioro en las capacidades motoras y psicológicas asociadas al paso del tiempo. Multitud de estudios demuestran que mantener una mente y un cuerpo activos no solo nos hace sentir bien (Carolina Garcés, 2021) (Mente) (Chapman, 2013), sino que también evita o retrasa en la medida de lo posible la probabilidad de tener algún tipo de impedimento que nos haga dependientes, acabar postrados en una cama o necesitando hacer uso de sillas de ruedas.

El ejercicio físico estimula la producción de diversas sustancias a nivel músculo esquelético, por ejemplo, las neurotróficas o “factores neurotróficos derivados del cerebro” (*Brain Derived Neurotrophic Factor*), unas proteínas que favorecen la supervivencia de las neuronas y actúan positivamente sobre la memoria. Estas sustancias activan la vascularización, favoreciendo el aporte de glucosa y oxígeno. Éstos son nutrientes indispensables para las neuronas, incidiendo en la neurogénesis o creación de nuevas neuronas en el hipocampo, área fundamental para la memoria, contribuyendo, en definitiva, a un mejor funcionamiento cerebral (Olivares, 2015). Si combinamos el ejercicio físico con una adecuada interacción social y cierta actividad intelectual, dispondremos de unas poderosas herramientas para retrasar las demencias, mejorando la calidad de vida (Erickson, 2011).

Por lo tanto, el término envejecimiento activo es cada vez más aceptado por la sociedad en general y por las personas mayores en particular. En base a este movimiento, se ha creado toda una economía en torno a este segmento de personas, llamada “*Silver Economy*”, que, se estima que, en 2020, ha realizado un gasto de 11.800 millones de euros en todo el mundo. Un gasto que hay que tener en cuenta y es de esperar que esta cifra aumente cada año debido al envejecimiento de la población de los países desarrollados, que cuentan con mayor poder adquisitivo y una mejor adaptación a las tecnologías generación tras generación (Estadística, s.f.).

A estos dos conceptos hay que sumar los nuevos hábitos y tendencias sociales, en parte adquiridos durante el confinamiento provocado por la pandemia del COVID-19, como hacer actividad física en casa, hacer uso de las nuevas tecnologías, consumir servicios interactivos, juegos, videotutoriales, videollamadas, convertir la tecnología en algo fundamental que ha mantenido a las personas conectadas, en la medida de lo posible, a través de la distancia y el confinamiento. El cambio sustancial que ha experimentado la sociedad en este periodo de tiempo ha sido fundamental para eliminar muchas brechas tecnológicas y aceptar nuevas tendencias en nuestro propio beneficio para mitigar el sentimiento de soledad y abandono que todos hemos sufrido, aunque especialmente los más desfavorecidos y las personas mayores.

Estas experiencias abren la puerta a nuevos retos o desafíos con posibles soluciones alternativas relacionadas con la tesis que se ha desarrollado. Uno de los principales problemas que nos podríamos encontrar es la no aceptación de la tecnología a utilizar. Entre los diferentes motivos que inducirían a ello, se podrían citar la dificultad a la hora de interactuar, la no usabilidad del sistema, u otros factores basados más en el miedo a utilizar nuevas tecnologías que en la adaptación misma.

Para llegar al mayor número de personas posible, es fundamental centrar los esfuerzos y el interés en desarrollar soluciones atractivas, eficaces y de bajo coste. De esta manera, nos permitirá completar y cumplir con la premisa establecida de ayudar en la medida de lo posible a las personas en las diferentes condiciones de salud que poseen. Esto abarca tanto a personas que necesiten rehabilitación, tras sufrir alguna lesión, como a personas de la tercera edad para que su proceso de envejecimiento sea más saludable.

Así, en el trabajo aquí desarrollado, nos hemos centrado en hacer uso de tecnologías no invasivas y de bajo coste, con cámaras RGB-D<sup>1</sup>, que nos permiten conocer la posición del usuario y sus articulaciones en el espacio. Esto lo hacemos con el fin de poder controlar y supervisar todos sus movimientos en los tres ejes cartesianos (X, Y, Z), sin utilizar ningún otro tipo de dispositivo *wearable*<sup>2</sup>. El objetivo de no usar un método invasivo es que muchos estudios (Sergueeva, 2017) (Gao, 2015) (Venkatesh, 2017) demuestran que los usuarios rechazan mucho más este tipo de dispositivos y que pueden causar molestias a los usuarios y pacientes. En el caso de los relojes inteligentes, aunque son cada día más aceptados, (Wu, 2016), su finalidad es totalmente diferente a lo que necesitamos y a lo que nos referimos para la realización de nuestro proyecto. Con nuestra tecnología evitamos tener que comprar o implementar otros sistemas de captura de movimiento 3D, que son excesivamente caros y especializados, que no servirían a nuestro propósito de ayudar a las personas con recursos más limitados.



*U.S. Activity Tracker Ownership*  
(Endeavour Partners, September 2013)

Ilustración 1 - Uso de *wearable* en EEUU (Partners, 2013).

Según datos de Endeavour Partners (Partners, 2013), en EEUU, un tercio de los usuarios que han tenido un producto *wearable* han acabado abandonando su uso a los seis meses. Si nos centramos en las pulseras o dispositivos cuantificadores, este estudio pone uno de estos productos en las manos de uno de cada diez adultos de EEUU, pero solo la mitad de ellos lo siguen usando.

<sup>1</sup> Red, Green, Blue, Depth - Rojo, Verde, Azul, Profundidad.

<sup>2</sup> Por tratarse de un término popular y por no existir una alternativa altamente aceptada en español, se ha decidido usar el término inglés original.

En el Reino Unido los datos estadísticos disponibles indican un rechazo a dichos dispositivos. En una encuesta de Accenture (Accenture, s.f.), menos del 30 % afirmaban estar interesados en comprar un reloj inteligente, y apenas un 25 % lo harían con unas gafas conectadas como las Glass de Google. Si aumentamos el ámbito a más países, entre ellos Australia, Canadá o India, se llegan a cotas del 50 % de interés.

De esta manera, dentro del contexto empresarial, nos motivó aún más el hecho de poder desarrollar un sistema que se pudiera llevar al mercado. A través de las herramientas y recursos que poseemos, lo hemos presentado en distintos foros donde se congregan diversos actores relacionados con la salud, tanto a nivel privado como público. Así pues, damos a conocer al sistema KineActiv con el fin de poder ser adquirido y adoptado por estas entidades. Lanzar al mercado un producto digno, que pueda ser explotado y usado por la población necesitada, ya sea porque tienen algún tipo de lesión que deba ser tratado o por la población más envejecida, para que se mantenga activa y saludable el máximo tiempo posible. Es un gran reto personal y empresarial.

Dentro de esos círculos, también se integran actores tan importantes como cámaras de comercio, diputaciones, instituciones comarcales, entidades gubernamentales nacionales e incluso entidades europeas, pues presenté KineActiv, dentro del proyecto europeo Cross4Health (Cross4Health, s.f.), en el cual únicamente 20 proyectos de toda Europa fueron galardonados dentro del programa, siendo el nuestro uno de ellos. A raíz de conseguir ese proyecto europeo, tuve la oportunidad de ver cuáles son las tendencias en medidas de salud y nuevas tecnologías a nivel europeo, abriéndose todo un mundo de posibilidades de colaboración y distribución internacional de KineActiv.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal es el desarrollo de una plataforma doméstica que permita el control preciso de movimientos, y que constituya el núcleo de aplicaciones de supervisión automática de rutinas físicas prescritas por personal especializado. Con el fin de reducir el tiempo de lesión y fortalecer la rehabilitación, se pretende lograr una mejor y más rápida recuperación, sin que el profesional esté presente durante todo el proceso. El paciente realizará ejercicios de forma autónoma, siendo controlados en tiempo real por el sistema y esto permitirá al profesional sanitario tener acceso a los datos de las sesiones del paciente, entre ellos, si ha ejecutado correcta o incorrectamente las pautas y si ha conseguido alcanzar los objetivos marcados o cuánto tiempo ha tardado en reaccionar al estímulo presentado y cumplir el objetivo establecido.

Por otro lado, ampliando el concepto anterior, también se pretende desarrollar un sistema que permita fortalecer y mejorar la condición física de las personas, sin sufrir ninguna lesión articular. En concreto, nos referimos a las personas mayores, que, con el paso del tiempo, presentan limitaciones físicas asociadas a la edad y sobre todo al sedentarismo y a la falta de actividad. Así, utilizando la misma base tecnológica para la realización de ejercicios, se desarrollan diversas rutinas físicas adaptadas a las necesidades de las personas mayores, con el fin de reducir lo que se denomina la fragilidad asociada a la edad, a través de la cual, si no se actúa correctamente, el anciano podría acabar en silla de ruedas, en una cama o incluso perder su vida prematuramente.

Más concretamente los objetivos de esta tesis se pueden resumir a través de los siguientes puntos:

- **Objetivo 1**
  - Creación de una plataforma basada en Kinect (sensor RGB-D) que permita el desarrollo de sistemas de monitorización automática de la actividad física en entornos domésticos.
- **Objetivo 2**
  - Capacidad de control y supervisión en tiempo real de la ejecución de los movimientos asociados al ejercicio prescrito por un profesional sanitario.
- **Objetivo 3**
  - Aumentar la adherencia a los tratamientos con la ayuda de entornos gamificados y la utilización de técnicas de realidad aumentada.
- **Objetivo 4**
  - Construir un sistema amigable y utilizable para un amplio rango de tipos de usuarios, priorizando las necesidades de las personas mayores a través de la implementación de interfaces interactivas avanzadas controladas por gestos.
- **Objetivo 5**
  - Construir un sistema que permita analizar los resultados obtenidos de forma precisa y objetiva para estudiar las posibles evoluciones y comportamientos de los usuarios.

### 1.3 Aportaciones y beneficios esperados

Como resultado del estudio, la investigación y el trabajo realizados, la principal contribución esperada está relacionada con el desarrollo de un nuevo enfoque que facilite la integración entre las nuevas tecnologías y el mundo de la salud. Por un lado, se plantea el uso de herramientas complementarias como son las cámaras vídeo y profundidad, la realidad aumentada, el control en tiempo real y el uso de interfaces avanzadas, para desarrollar soluciones con la misma base tecnológica. Por el otro lado, se llevará a cabo la implantación de esas soluciones en dos frentes específicos, la rehabilitación y las personas mayores, ayudando a mejorar su salud y bienestar.

En cuanto a los beneficios, uno de los efectos que esperamos obtener es que se puedan minimizar los tiempos de recuperación de las lesiones articulares, así como aumentar la fuerza, la forma física y el tono muscular de los ancianos. Esto contribuirá a evitar, mejorar o retrasar su nivel de fragilidad, con el fin de estar físicamente activos durante el mayor tiempo posible y no convertirse en personas dependientes anticipadamente.

En concreto, podemos destacar los siguientes puntos como aportaciones esperadas de nuestro trabajo:

- Métodos de monitorización y control preciso del movimiento del cuerpo en tiempo real mediante cámaras RGB-D, con el objetivo de medir el ajuste a rutinas físicas predefinidas.
- Nuevos modelos avanzados de interacción a través de gestos y realidad aumentada.
- Proporcionar mecanismos para reducir el tiempo de recuperación mediante el uso de la realidad aumentada.

- Desarrollo de un sistema integrado para monitorización en procesos de rehabilitación y actividad física en personas mayores que proporcione:
  - Modelos de supervisión para gestionar el problema de la fragilidad en las personas mayores.
  - Protocolos de recuperación funcional capaz de mejorar los sistemas actuales, tanto en el tiempo de tratamiento como en la precisión del proceso de recuperación.
  - Alta aceptación por parte de los usuarios y mejora efectiva del proceso de recuperación en ejercicios de rehabilitación o de nivel de bienestar psicofísico en envejecimiento activo.
  - Entorno de análisis y efectividad de los tratamientos por parte del profesional sanitario y capacidad de personalización de sesiones futuras.
- Metodologías y herramientas de evaluación experimental de la efectividad del sistema durante la ejecución de rutinas físicas prescritas por personal especializado.

## 1.4 Estructura de la memoria

A lo largo de este documento se presentará en diferentes capítulos las ideas principales del trabajo realizado, incluyendo la metodología para evaluar los sistemas desarrollados y los resultados experimentales. La memoria continúa con una introducción sobre los fundamentos de las distintas tecnologías que se han usado para el desarrollo y creación del sistema KineActiv. Se explica cómo se entrelazan los distintos elementos software, describiendo conceptos tales, como realidad aumentada, gamificación y la adaptación de estos a través del uso de interfaces de usuario avanzadas. Por otro lado, se hace referencia al hardware que se ha utilizado, haciendo hincapié en el uso de dispositivos que nos permiten capturar y tratar la información de los objetos en el espacio 3D. Finalmente se introducen conceptos básicos de salud, que se deben tener en cuenta a lo largo de todo el desarrollo. Dentro de estos conceptos, se explican los fundamentos de la biomecánica, los distintos tipos de contracción muscular, los planos y los ejes anatómicos y las clasificaciones de las articulaciones. Todos estos elementos son fundamentales para llevar a cabo el desarrollo correcto de nuestro sistema.

A lo largo de la memoria, se puede encontrar en varias ocasiones la palabra *gamificación*. Aunque se trata de un anglicismo aún no aceptado por la RAE, hacemos uso de ella por cuestiones de claridad con el fin de situar el contexto de las acciones desarrolladas a lo largo del proceso.

A modo de curiosidad, la RAE dice lo siguiente:

*“La forma gamificación es una adaptación del inglés gamification que se desaconseja por ser un híbrido formado a partir del inglés game (‘juego’) y resultar, por tanto, poco transparente semánticamente en español. En su lugar, se recomienda emplear ludificación”.*

Posteriormente, se realiza una exposición inicial del concepto, diseño y desarrollo del sistema KineActiv, estableciendo la base de las dos ramas del sistema, que se explican con más detalle en los dos apartados que le siguen. El primero de ellos está enfocado al desarrollo de la rama de rehabilitación de lesiones de los miembros superiores e inferiores y el siguiente, se centra en la evolución hacia las personas de la tercera edad, creando un sistema que les permita

realizar una actividad física y cognitiva con el objetivo de mitigar la fragilidad o prefragilidad, manteniéndolos autónomos el máximo tiempo posible.

Seguidamente se describirán los diferentes experimentos que se llevaron a cabo en cada una de las ramas y qué resultados se obtuvieron entre las personas que participaron en cada uno de ellos, ya que, debido a la diferencia tan notable entre la rehabilitación y el mantenimiento de la forma física y cognitiva, los experimentos, son diametralmente distintos.

La memoria finaliza con las principales conclusiones de todo el trabajo desarrollado, así como las posibles líneas de trabajo futuro y la bibliografía de todos los recursos que se han analizado, comparado y que han servido de base en las diferentes etapas del desarrollo y experimentación realizadas.



## 2 Fundamentos

En este capítulo se detallarán todas las tecnologías y los fundamentos utilizados para desarrollar el sistema KineActiv. En él se hace uso de elementos muy distintos entre sí que, una vez conjuntados, forman un sistema robusto en el que se armonizan elementos completamente dispares. Uno de los elementos principales de los que se hacen uso es la realidad aumentada, siendo tremendamente potente su utilización, pues nos permite entrelazar el mundo real y el mundo virtual, creando una sinergia de mucho valor para nuestro sistema, con el fin de poder obtener el incentivo que haga que el usuario se vea inmerso en una nueva realidad y realice lo que pretendemos en cada instante de tiempo (Cabero-Almenara, 2018). Además, para conseguir ese objetivo, se explota el concepto de gamificación, ya que el objetivo es que dentro de ese mundo nuevo que se ha creado, tengamos diferentes estímulos para que el usuario interactúe de la manera que se desea, siendo a la vez divertido, intentando así aumentar la adherencia a la actividad propuesta. Se pretende que el usuario sienta en todo momento que está jugando, realizando una actividad lúdica, que le entretenga y no sea tediosa, para evitar así el abandono de la rutina física objetivo.

Para que estos conceptos tengan un sentido y, posteriormente, se pueda capturar el movimiento a ser analizado, se precisa de un elemento hardware lo suficientemente potente como para poder captar todo lo que haga el usuario en tiempo real y poder procesarlo, con el fin de evaluar cómo se realiza la actividad, en cuánto tiempo, qué rango de movilidad se alcanza, cuántas veces, etc. De ahí, que la integración de las cámaras 3D dentro del sistema sea fundamental.

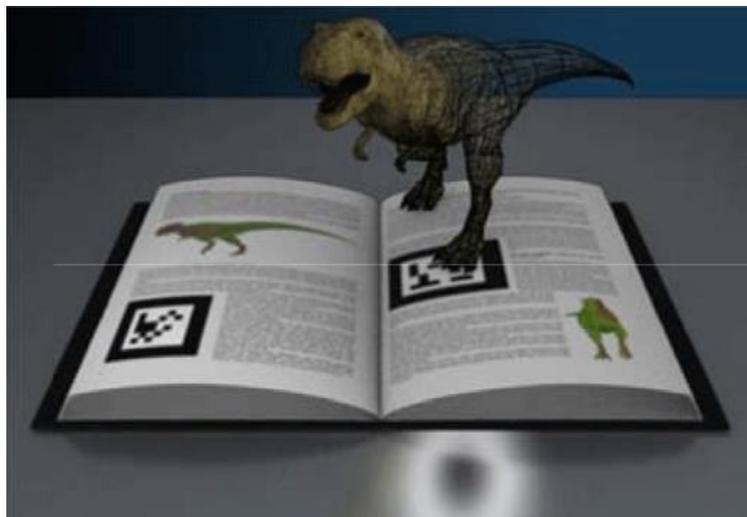
Como se está hablando de análisis de movimiento, rehabilitación, mejora física y cognitiva, hay que tener en cuenta determinados conceptos biomecánicos y anatómicos. Evidentemente, estos conceptos no se suelen estudiar dentro del ámbito de las ingenierías. Así pues, conceptos de biomecánica humana, músculos, movimientos de esos músculos, planos y ejes anatómicos, roles o funciones musculares y clasificación de las articulaciones, hacen del componente anatómico un elemento de una gran importancia dentro del desarrollo. Tener claro estos conceptos y cómo actúan en cada momento dentro del estudio, conlleva un reto continuo, que hay que tener muy en cuenta.

### 2.1 Realidad aumentada

La realidad aumentada nos permite añadir capas de información visual sobre el mundo real que nos rodea, utilizando la tecnología de dispositivos como, por ejemplo, nuestros propios teléfonos móviles. Esto nos ayuda a generar experiencias que aporten conocimiento relevante sobre nuestro entorno, y además recibimos esa información en tiempo real.

Tecnológicamente, los sistemas de realidad aumentada, por diferentes que sean, presentan cuatro componentes comunes: un dato geoespacial para el objeto virtual, un marcador visual, una superficie para proyectar elementos virtuales al usuario y una potencia de procesamiento adecuada para gráficos, animación y fusión de imágenes, como un PC y un monitor. Para ejecutarse, un sistema realidad aumentada también debe incluir una cámara capaz de rastrear el movimiento del usuario para fusionar los objetos virtuales, y una pantalla visual, como gafas o un teléfono inteligente, a través de la cual el usuario puede ver los objetos virtuales superpuestos al mundo físico.

La revolución de las tecnologías de la información ha transformado la forma en la que vemos, conocemos, disfrutamos y percibimos el mundo. La realidad aumentada es parte de esta revolución y es aquella que nos permite percibir, ver y conectarnos con el mundo de una forma innovadora donde es posible solapar sobre mundo físico información virtual engrandeciendo el mundo que conocemos (Rigueros Bello, 2017).



*Ilustración 2 - Ejemplo de realidad aumentada con imágenes (Rigueros Bello, 2017).*

A través de la realidad aumentada, el mundo virtual se entremezcla con el mundo real, como podemos ver en Ilustración 2, de forma contextualizada, y siempre con el objetivo de entender mejor todo lo que nos rodea. Los medios técnicos que utiliza incluyen multimedia, modelado 3D, seguimiento y registro en tiempo real, interacción inteligente, detección y más. Su principio es añadir información virtual generada por computadora, como texto, imágenes, modelos 3D, música, video, etc., al mundo real después de la simulación. De esta manera, los dos tipos de información se complementan entre sí, logrando de esta forma la mejora en la interpretación del mundo real.

En los últimos años, cada vez más instituciones de investigación, universidades y empresas de renombre internacional han invertido en la investigación de realidad aumentada, publicando muchos artículos y resultados de investigación científica como podemos ver en (Rigueros Bello, 2017) (Mekni, 2014). Estos resultados (Połap, 2018) demuestran la viabilidad e innovación de la realidad aumentada como tecnología de interacción persona-ordenador. Con la mejora de la potencia de cálculo del software y hardware informático, la realidad aumentada ha cambiado gradualmente de la etapa de investigación teórica del laboratorio a la etapa de aplicación masiva e industrial, constituye un puente entre el mundo digital y el mundo real, y proporciona a las personas una nueva forma de reconocer y experimentar las cosas a su alrededor. Además, ha sido catalogada como una de las diez tecnologías de futuro más prometedoras por organizaciones autorizadas como el American Times Weekly (Weekly, s.f.). En los últimos años, la realidad aumentada se beneficia del potencial de la computación en la nube y se ha convertido en un punto de acceso de investigación en el campo de Internet. Puede transferir almacenamiento y computación compleja desde el cliente al entorno de servicio de computación en la nube, proporcionando un posible patrón de arquitectura distribuida para la computación de efectos físicos interactivos complejos.

La tecnología de realidad aumentada se ha aplicado en muchos campos, incluidos el turismo, la arqueología, el arte, el comercio, la fabricación industrial y la restauración, la

educación, la gestión de emergencias, el entretenimiento, el ocio y el tratamiento médico (Yu, 2009). En el campo del turismo, la aplicación de la tecnología de realidad aumentada a las atracciones turísticas puede mostrar vistas restauradas de sitios históricos mediante el uso de cámaras de teléfonos móviles, software de pantalla y otros medios tecnológicos para integrar las escenas reales.



*Ilustración 3 - Ejemplo de realidad aumentada en el Coliseo Romano (Fritz, 2005).*

También se utiliza dentro del sector turístico con el objetivo de mejorar la experiencia turística. Por un lado, varios ejemplos han demostrado que la realidad aumentada puede ayudar a las organizaciones turísticas y a los profesionales a llegar a un público más amplio sirviendo como tecnología de entrega de atractivos contenidos multimedia y aplicaciones móviles, ajustados a varios niveles de conocimiento. Por otro lado, los sistemas de información basados en realidad aumentada pueden ayudar a los turistas a acceder a información valiosa (Ilustración 3) y mejorar su conocimiento sobre una atracción turística o un destino, al tiempo que mejoran la experiencia turística y ofrecen mayores niveles de entretenimiento durante todo el proceso (Fritz, 2005). Y lo que es más importante, tales sistemas de información pueden personalizar el contenido multimedia de acuerdo con las características del usuario y el contexto de uso, lo que respalda su implementación en una serie de escenarios como se observa en Ilustración 4.

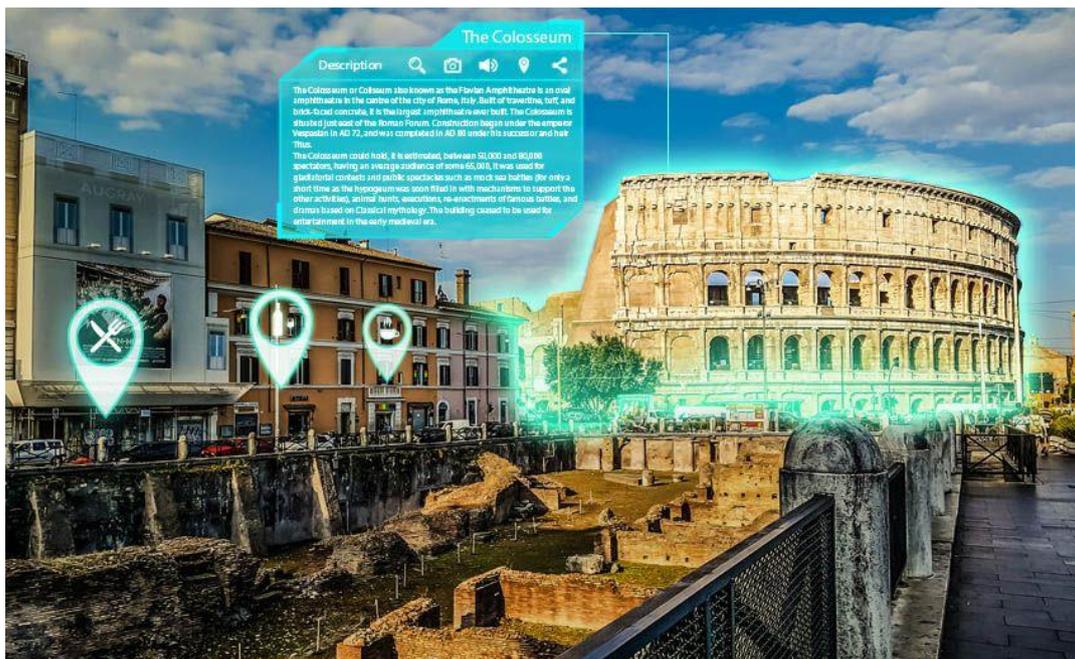


Ilustración 4 - Información adicional en los alrededores del Coliseo Romano (Fritz, 2005).

Además de crear escenas, la tecnología de realidad aumentada se utiliza a menudo en estudios arqueológicos para acercarse a las reliquias en paisajes reales para garantizar que los arqueólogos puedan identificar con mayor precisión sus descubrimientos (Vlahakis, 2002) y así tener una idea más precisa de lo que se encontraba en ese lugar hace tiempo como en la Ilustración 5.



Ilustración 5 - Ejemplo de realidad aumentada en arqueología (Vlahakis, 2002).

La tecnología realidad aumentada, también permite a los consumidores ver todo sobre un producto sin abrir el paquete que lo contiene. Al escanear la imagen del producto, no solo puede mostrar cierta información de las opciones personalizadas, sino también obtener otra información de la imagen del producto. Otra de las ventajas de usar realidad aumentada en productos es que permite al comprador ver cómo le queda la prenda, zapatilla o el elemento

que esté pensando adquirir, sin necesidad de probarlo físicamente, tal y como vemos en Ilustración 6. Por otro lado, la realidad aumentada puede guiar a los trabajadores visualmente, recordarles la hora y dibujar en 3D para hacer productos de manera más eficiente.

Una experiencia de compra impulsada por realidad aumentada a través de la aplicación *Snapchat* permite a los usuarios personalizar y probar virtualmente un par de Nike Air Force 1 Ilustración 6. Patrocinado por la marca, el filtro te pide que cambies de color (elige entre tonos como Magic Flamingo, Blue Void y Honeycomb) y textura (cuero liso u ondulado) de 13 partes diferentes de las zapatillas antes de presionar el botón "probarse" para ver una superposición digital de 360 grados de cómo se verían en sus pies. Si al usuario le gusta lo que ve, puede hacer clic en "comprar ahora" para comprar inmediatamente el par que ha diseñado.

La integración de las compras de realidad aumentada directamente en las plataformas de redes sociales es un movimiento comercial inteligente que ha hecho que Nike, una marca que continúa teniendo un gran éxito entre los grupos demográficos más jóvenes, se destaque en el creciente mercado del comercio social (Mccluskey, 2022).

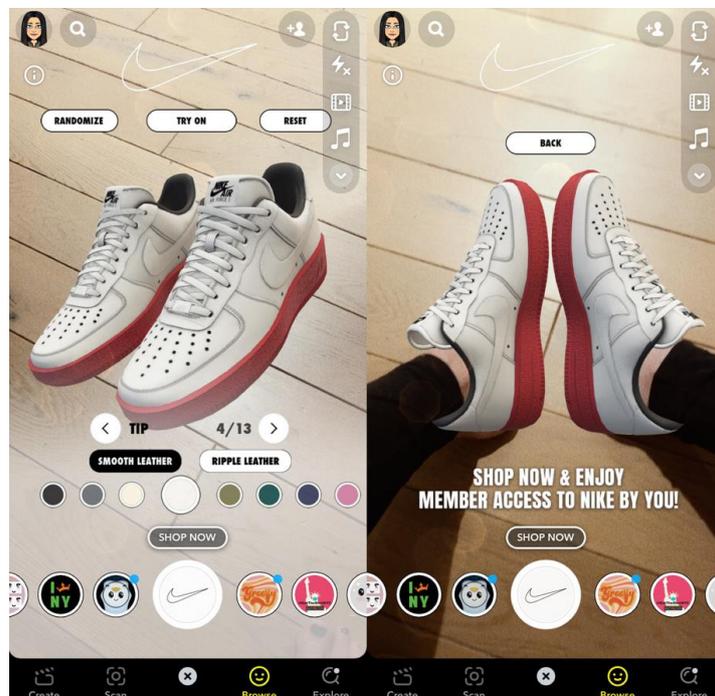


Ilustración 6 - Ejemplo de zapatilla Nike siendo probada por un usuario a través de realidad aumentada (Mccluskey, 2022).

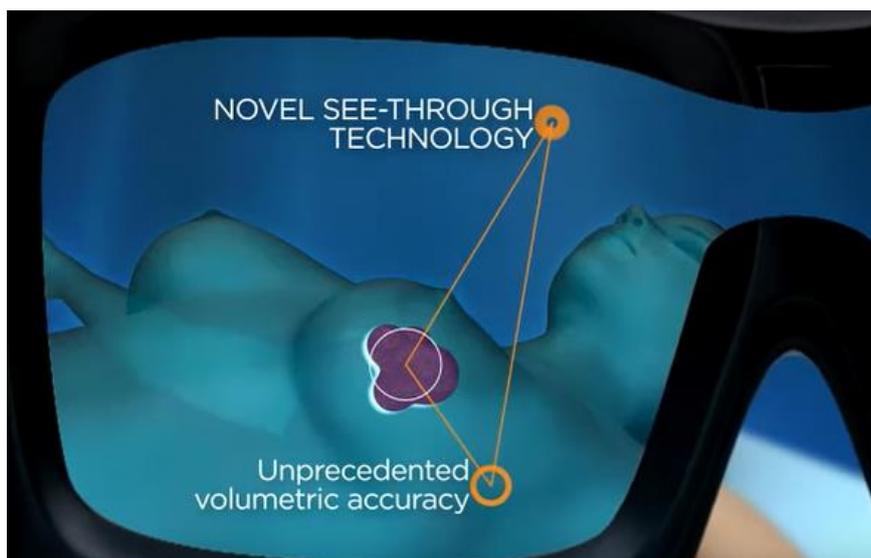
Tomando la industria de fabricación de automóviles como ejemplo, la tecnología de realidad aumentada puede permitir a los diseñadores de automóviles perfeccionar la estructura de los automóviles y hacer mejores comparaciones a través de la presentación visual. La aplicación de la tecnología realidad aumentada en el campo del arte ha permitido a las personas tener más ángulos de experiencia e interpretación de la realidad (Ruiz Torres, 2011). A menudo, esta fusión de realidad y realidad virtual se ha convertido en un arte y se puede utilizar en soluciones de seguridad pública y realizando un buen papel dentro del sector. Un ejemplo de marca que usa la realidad aumentada dentro de la industria automovilística es el caso de Volkswagen con su *Augmented Reality Apps* (Aplicaciones de Realidad Aumentada) (Volkswagen, s.f.), usada para comparar el uso de energía que tendría un electrodoméstico con el uso de energía de sus automóviles. Podemos ver un ejemplo de la aplicación de realidad

aumentada en la siguiente Ilustración 7, en la que se le indica al conductor la dirección que debe tomar, dentro de 20 metros, así como el nombre de la calle, la velocidad a la que circula y el límite de esta.



*Ilustración 7 - Ejemplo de realidad aumentada en un vehículo del Grupo VW (Volkswagen, s.f.).*

Por ejemplo, el sistema de realidad aumentada para búsqueda y rescate está equipado con una cámara aérea, que puede integrar la escena real con el nombre de la carretera forestal y la ubicación identificada por la geografía, a fin de rescatar a la persona perdida de manera más eficiente (Pandavenes, 2022). El médico puede usar la tecnología de realidad aumentada para localizar con mayor precisión el sitio quirúrgico del paciente (Kamphuis, 2014). Los médicos e incluso los pacientes son conscientes del hecho de que cuando se trata de cirugía, la precisión es de suma importancia. Ahora, la realidad aumentada puede ayudar a los cirujanos a ser más eficientes en las cirugías (R. Hussain, 2020). Ya sea que estén realizando un procedimiento mínimamente invasivo (Ilustración 8) o localizando un tumor en el hígado, las aplicaciones de atención médica de realidad aumentada pueden ayudar a salvar vidas y tratar a los pacientes sin problemas (Sutherland, 2019). La tecnología realidad aumentada puede observar mejor el feto en tiempo real. La tecnología realidad aumentada también puede recordarle al paciente que tome el medicamento a tiempo al permitir que el paciente use el equipo correspondiente.



*Ilustración 8 - Ejemplo de realidad aumentada en medicina (Kamphuis, 2014).*

El uso de realidad aumentada en la industria médica ha crecido a lo largo de los años (Futurist, s.f.). Ha demostrado ser útil tanto para los médicos como para los pacientes. Los pacientes pueden ser educados sobre sus enfermedades a través de realidad aumentada, y la tecnología también se puede utilizar para cirugías complejas, ayudando a los médicos a realizarlas con alta precisión.

Los sistemas inmersivos se pueden utilizar para capturar nuevos datos, crear nuevas experiencias y proporcionar nuevos conocimientos mediante la generación de elementos virtuales de mundos físicos e imaginarios. Los sistemas inmersivos están experimentando, cada día una mayor aplicación en una amplia gama de campos (Rubio-Tamayo, 2017), y de ahí que sean tan interesantes sus soluciones y estudios aplicados.

El uso de la tecnología de realidad aumentada para integrar objetos virtuales en el entorno de aprendizaje real para el aprendizaje de idiomas está en auge. Se usa la realidad aumentada en aulas de inglés y se construye un entorno, utilizando el método de creación de prototipos del sistema y evaluando las sensaciones de los alumnos mediante entrevistas (Li K. C., 2015). Con base en las opiniones de los expertos del dominio (Shernoff, 2014), el prototipo del sistema realidad aumentada valida la posibilidad de llevar a cabo el aprendizaje digital inmersivo de idiomas y la cognición incorporada.

## 2.2 Gamificación

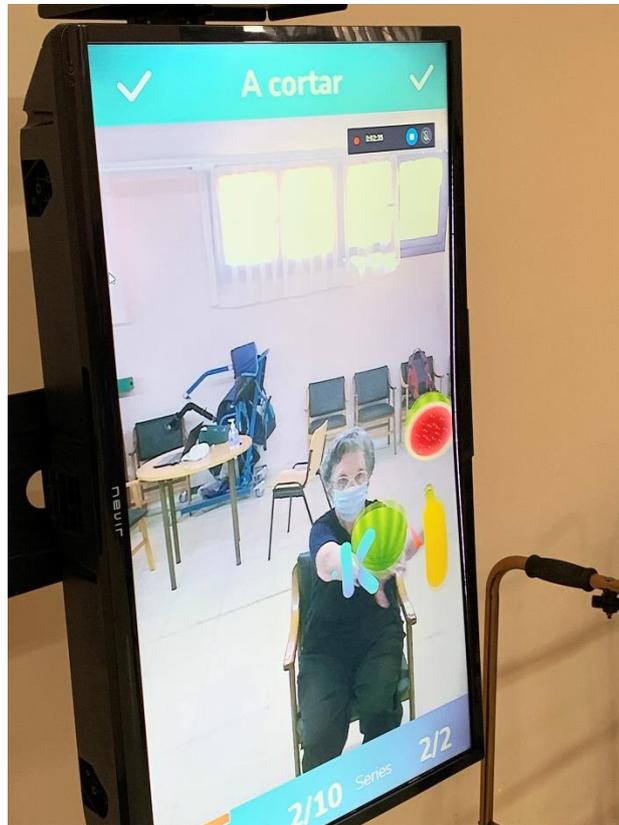
Entendemos la gamificación como el intento estratégico de mejorar sistemas, servicios, organizaciones y actividades con el propósito de crear experiencias similares a las que se experimentan al jugar juegos cuyo objetivo es el de motivar e involucrar a los usuarios. Esto generalmente se logra aplicando elementos de diseño y principios de juegos en contextos que no son de juego. Utilizamos la gamificación con elementos de diseño de juegos para mejorar la participación del usuario, el aprendizaje, la retención de conocimientos, la facilidad de uso, la ejecución de un ejercicio y más (Gallego-Durán, 2014).

Las personas de todas las edades disfrutan jugando, y algunos investigadores de atención médica han argumentado que es necesario aprovechar el potencial de la gamificación para fomentar un comportamiento de salud positivo. La definición más ampliamente aceptada de gamificación, establecida como "un proceso de mejora de los servicios con esfuerzos para invocar experiencias de juego y resultados de comportamiento adicionales", se ha ampliado para incluir características de juego como puntos, niveles, tablas de clasificación y muchos otros elementos (Sardi, 2017).

En general un juego se caracteriza por su naturaleza voluntaria, un conjunto de objetivos y reglas predeterminadas que limitan el alcance de la actividad de uno. Siguiendo este mismo concepto, la gamificación es un área emergente de investigación y práctica que incorpora elementos de diseño de juegos en un contexto no relacionado con el juego para involucrar y motivar mejor a los usuarios (Alsawaier, 2018) (Krath, 2021). En la Ilustración 9 podemos ver un caso práctico de este concepto.

Algunos investigadores del ámbito de la salud (Marston, 2016) han argumentado que la gamificación debe usarse para aumentar el compromiso dentro de los programas de educación médica para hacer que las tareas sean más gratificantes (Cheng, 2019). Por ejemplo, las aplicaciones gamificadas tienen el potencial de inspirar a los pacientes a ser más responsables de su propio tratamiento (p. ej., ayudando a mejorar la adherencia a la medicación (Croon,

2021)), y son especialmente adecuadas para involucrar a los niños (Radovick, 2018) que tienen dificultades para informar sus síntomas. Tanto para adultos como para niños, el objetivo es que el compromiso activo con un proceso gamificado conduzca a una mayor autoconciencia, una menor aprensión hacia el tratamiento y un compromiso a largo plazo con un servicio de atención médica.



*Ilustración 9 - Ejemplo de gamificación con el sistema KineActiv. El objetivo es cortar las frutas con las manos, provocando así el movimiento de las articulaciones superiores e incrementar la coordinación y las funciones cognitivas.*

La investigación sugiere que los juegos pueden tener efectos sociales, emocionales y cognitivos positivos. En una revisión sistemática de los juegos de aprendizaje (Kim, 2018), se evaluaron los tipos de juegos, los modos de aprendizaje, los espacios de aprendizaje creados por el juego y los sistemas de apoyo al aprendizaje integrados en aplicaciones gamificadas, y se identificaron cinco temas integrados en el juego, que se citan a continuación:

- Diseño del *game-based learning* (aprendizaje basado en juegos) como activación y adquisición de conocimiento.
- Integración del aprendizaje a través de la representación, la simulación o la contextualización.
- Espacios de aprendizaje ideados por la mecánica del juego y el mundo del juego.
- La ocurrencia de momentos de aprendizaje metareflexivos e iterativos durante el juego
- Soporte de aprendizaje multifacético en el juego (o andamiaje).

Algunos investigadores han argumentado (Zainuddin, 2020) que es crucial considerar la mecánica del juego y la mecánica de aprendizaje en conjunto, lo que significa que los juegos efectivos se centran explícitamente en cómo las acciones del mundo del juego afectan los

comportamientos del mundo real. Sin embargo, la definición y el diseño de las aplicaciones sanitarias gamificadas, y de los juegos en general con fines de aprendizaje, aún no está clara.

Aunque se han realizado una serie de estudios de gamificación en programas de salud y educación médica, la concepción actual de la gamificación en este dominio es demasiado amplia para que los investigadores puedan replicar los hallazgos, ya que no hay consenso sobre los elementos de diseño de las aplicaciones de salud gamificadas. La aplicación adecuada y consistente de la gamificación tiene el potencial de mejorar la salud y el bienestar de la sociedad.

Las aplicaciones de salud gamificadas desafían a las personas a involucrarse más en su bienestar, con la idea de que aquellos que se involucran activamente querrán más información sobre su condición y, por lo tanto, asumirán más responsabilidad en el manejo y/o la prevención de los síntomas. La retroalimentación continua proporcionada por estos juegos, al igual que la información ofrecida durante las consultas programadas con un médico u otro profesional de la salud, puede reforzar la importancia de las opciones saludables. Además, los juegos ofrecen el beneficio adicional de permitir a los pacientes medir su progreso contra ciertos puntos de referencia y un costo mínimo más allá del desembolso inicial para una aplicación. Finalmente, los juegos de realidad aumentada que fusionan el aprendizaje del mundo real y las recompensas virtuales están en un estado incipiente, pero la inmensa popularidad y la rápida adopción de aplicaciones como Pokémon Go muestran que estas tecnologías pueden tener un gran potencial para involucrar a los pacientes en diversos contextos (p. ej., rehabilitación física, entrenamiento médico, pruebas, etc.).

### 2.3 Cámaras RGB-D

Dada la evolución de los sistemas de visión artificial en los últimos años hacia una percepción multidimensional del entorno, se está mostrando un mayor interés por la visión tridimensional. Por este motivo, se están desarrollando nuevas tecnologías y sistemas de percepción que permiten obtener una visión 3D del entorno, es decir, representaciones que añaden la dimensión de profundidad a las imágenes 2D tradicionales. Esto, ha llevado a la aparición de cámaras con tecnologías de propósito general. Dichas cámaras también son conocidas como cámaras o sensores "low-cost" como los de la Ilustración 10. Además, se añade una nueva categoría, denominada como RGB-D (Red Green Blue and Depth), siendo Microsoft Kinect el ejemplo más popular.



Ilustración 10 - Ejemplos de sensores 3D.

El dispositivo Kinect que se ha utilizado en el desarrollo de los sistemas que se documentan en esta memoria usa la tecnología de tiempo de vuelo para calcular la profundidad,

la cual para estimar distancias se basa en un haz de luz infrarroja, que permite medir el tiempo que transcurre entre la emisión y la recepción del haz de luz. Tiene un obturador electrónico incorporado que opera en sincronismo con los pulsos de luz infrarroja. Para entender estas tecnologías, debemos tener en cuenta dos conceptos. Por un lado, la porción del pulso y por otro la luz integrada. La porción del pulso es bloqueada por el obturador una vez que se lanza, y depende del tiempo de llegada del pulso. Por otro lado, la luz integrada en el sensor depende directamente de la distancia que ha viajado el pulso. La distancia se puede calcular con la ecuación:  $z = \frac{R(S2-S1)}{2(S1+S2)} + R/2$  para una cámara ideal. Siendo  $R$  el rango, determinado por la frecuencia del pulso de luz,  $S1$  la cantidad de luz recibida, y  $S2$  la cantidad de luz bloqueada (A, F, & F, 2006).

La detección de partes del cuerpo humano se ha investigado popularmente en los campos de la visión por computador y el reconocimiento de patrones. La localización precisa de partes del cuerpo es importante en la estimación de la postura humana para el reconocimiento de la actividad, la cual se utiliza en varios sistemas inteligentes para la solución de diversas tareas: interacción humano-computadora (HCI) (Sanabria, 2011), videovigilancia, atención médica (Martínez José, 2018) y entretenimiento (Rossius, 2014). Recientemente, se está convergiendo con las técnicas de realidad virtual y realidad aumentada en el campo de la formación.

Los primeros enfoques que utilizaron una sola cámara intentaron detectar la región de interés extrayendo características de la iluminación, el color y la información de borde en imágenes 2D (Santiago Pe, 2007). En estos enfoques, los algoritmos de aprendizaje automático como el impulso adaptativo (AdaBoost), la máquina de vectores de soporte (SVM) y el modelo de mezcla gaussiana (GMM) se utilizan para extraer características claves del cuerpo como la cara, el torso, las manos y los pies de un gran conjunto de datos. Sin embargo, una detección confiable de tales características es difícil de lograr debido a los ruidos de fondo y los cambios de iluminación en las imágenes. La reciente disponibilidad de cámaras RGB-D, como Microsoft Kinect<sup>3</sup> e Intel RealSense de la Ilustración 11, proporciona datos de profundidad y sugiere una forma más confiable de detectar estas características. Utilizando la información de profundidad recuperada de un sensor infrarrojo, la región de interés en el cuerpo humano se puede segmentar con mayor precisión sin ambigüedades de fondo<sup>4</sup>.



*Ilustración 11 - Intel RealSense - www.intel.com.*

<sup>3</sup> <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/apps/design/devices/kinect-for-windows>

<sup>4</sup> <https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/emerging-technologies/intel-realsense-technology/Intel-RealSense-Viewer-User-Guide.pdf>

Las articulaciones del cuerpo humano pueden proporcionar información útil para el análisis de movimiento. El uso de una sola cámara RGB-D se ha utilizado ampliamente para detectar partes del cuerpo humano como una estructura jerárquica del esqueleto (Koen Buys, 2014). En este enfoque se estima una lista de posiciones conjuntas a partir de un usuario que se enfrenta a la cámara RGB-D mediante el uso del modelo estadístico. Sin embargo, su precisión, especialmente para las articulaciones internas, es sensible a la postura de entrada. Por ejemplo, las posiciones de las articulaciones del cuerpo ocultas pueden omitirse o estimarse incorrectamente a partir de posturas desconocidas. Usando múltiples cámaras alrededor del usuario, se puede combinar un conjunto de imágenes de profundidad capturadas desde diferentes puntos de vista para complementar las partes del cuerpo ocultas. En estos enfoques, se debe resolver un problema de optimización para rastrear una lista de articulaciones en un modelo articulado a partir de un volumen de profundidad.

## 2.4 Interfaces de usuario avanzadas

En los últimos años, el mundo de las tecnologías de la información y la comunicación a través de Internet se ha ido integrando paulatinamente en la vida cotidiana de los adultos mayores. La evidencia afirma que la accesibilidad a la tecnología es un factor clave para reducir el riesgo de exclusión social, el acceso a la atención médica y el bienestar.

A pesar de la cantidad de beneficios potenciales, el uso de dichos servicios depende en gran medida de la tecnología de interfaz de usuarios. Los problemas de usabilidad a menudo limitan el uso a ciertos segmentos de la población.

A través de esta evolución en las interfaces de usuarios, se intenta interactuar con sistemas o aplicaciones sin utilizar líneas de comandos o dispositivos de entrada como teclados, ratones, joystick, touchpad, etc. Estos dispositivos se sustituyen por el propio cuerpo, que, a través de movimientos gestuales, actúa directamente como medio de transmisión de la acción o comando (Scolari, 2021) (Suárez, 2018).

Hasta el día de hoy se ha hecho uso de metáforas y elementos visuales que evocan una acción o un elemento que nos ayude a asociar la interacción que se desea realizar con el ordenador, pero actualmente el paradigma de las metáforas visuales es poco usado (Silva Sprock, s.f.). Estas metáforas han sido muy comúnmente utilizadas en las GUI (*Graphical User Interface / Interfaces Gráficas de Usuario*). Hoy en día, se ha evolucionado y ya no se parecen a objetos o acciones en el mundo real y, por lo tanto, las interacciones son distintas, tanto para el usuario frecuente de una computadora como para aquellos que no tienen nociones de cómo manejar el ratón, abrir un programa, etc. Por supuesto, es importante mencionar que, aunque las interacciones parezcan ser más reales, todavía están dentro de un medio digital, y no es algo tangible y por lo tanto habrá muchos conceptos y tareas en las que se utilizarán metáforas para lograr el objetivo establecido.

Con el advenimiento de la realidad aumentada y virtual en numerosas áreas de aplicación, la necesidad y el interés en interfaces más efectivas prevalecen impulsadas, entre otros factores, por tecnologías mejoradas, aumentando la complejidad de la aplicación en su desarrollo, pero disminuyendo los requisitos de experiencia del usuario.

Además, hay que destacar los problemas claves en el diseño de diversos 3DUI (*3D User Interface / Interfaces de Usuario 3D*) al observar detalladamente los temas simples y avanzados de selección, manipulación 3D y diseño de la interfaz de navegación espacial. Estos temas son

muy relevantes, ya que forman la base para la mayoría de las aplicaciones basadas en 3DUI, pero también pueden causar problemas importantes (rendimiento, usabilidad, experiencia) cuando no se diseñan correctamente, dado que pueden ser difíciles de manejar.

Hoy en día, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se han convertido en parte de nuestra vida cotidiana, mejorando la calidad de vida y promoviendo nuevas formas de interacción social. A pesar de los numerosos beneficios de las TIC, los adultos mayores todavía presentan bajas tasas de adopción de las TIC en comparación con otros segmentos de la población (Sunkel, 2019). La falta de interfaces de usuario accesibles se ha identificado como una barrera importante (Córdoba, 2018). Las interfaces de usuario tradicionales siguen un enfoque de diseño convencional, generalmente ignorando las necesidades de los adultos mayores. Investigaciones recientes en Interacción Humano-Computadora (HCI) (Vásquez, 2020) proponen interfaces de usuario simples e intuitivas capaces de adaptarse a las habilidades individuales de los usuarios. Sin embargo, la mayoría de los enfoques existentes realizan la adaptación basada en grupos de perfiles de usuario y no proporcionan una adaptación personalizada en tiempo real.

El rápido crecimiento de la complejidad de las interfaces de usuario juntamente con los problemas de alfabetización digital tiene un alto impacto en las bajas tasas de adopción de tecnología entre el colectivo de adultos mayores. Muchos adultos mayores no son capaces de asimilar la tecnología moderna, por lo tanto, las interfaces futuras deben considerar enfoques simples pero efectivos para abordar los problemas de usabilidad.

A pesar de los avances en las tecnologías de asistencia para mejorar la usabilidad y accesibilidad de las interfaces de usuario, todavía persisten dudas en cómo manejar las diferencias entre usuarios. En ese sentido, la investigación actual está profundizando sobre la interfaz de usuario adaptativa (*Adaptive User Interface*) para proporcionar asistencia personalizada al usuario. El objetivo de una AUI es mejorar la interacción entre el usuario y la interfaz de usuario adaptando aspectos como la distribución del diseño del sistema y las acciones disponibles, de acuerdo con los objetivos y necesidades actuales de los usuarios.

Sin embargo, la mayoría de los enfoques explorados hasta ahora (Severo Malaspina, 2021) no proporcionan adaptación en tiempo real, sino principalmente adaptación basada en grupos de perfiles de usuario.

## 2.5 Fundamentos de la biomecánica

La biomecánica y la kinesiología son ciencias que estudian los movimientos del cuerpo humano: el cómo y el por qué. Se basan en la biología y la anatomía, así como en la aplicación de leyes y principios físicos a ellos (WIRHED, 2001). Aunque son ciencias relativamente jóvenes, los fundamentos se encuentran en tiempos lejanos, cuando Leonardo da Vinci hablaba de las palancas del cuerpo humano.

*"La biomecánica deportiva aplica las leyes de la mecánica a los movimientos realizados durante la práctica de la actividad física y el deporte con el objetivo principal de mejorar el rendimiento del deportista"* (McGinnis, 2005) (Bartlett, 2007) y kinesiología estudia las acciones musculares y articulares en un solo movimiento. Para diseñar un entrenamiento efectivo, debemos comenzar con un conocimiento de la mecánica básica de los movimientos.

El requisito esencial de la biomecánica es un conocimiento complejo de las articulaciones, así como los músculos y los ligamentos que comprenden la estructura anatómica que forma la estructura específica de cada articulación (origen e inserción), así como una comprensión clara de sus efectos sobre el movimiento de la articulación o articulaciones que son objeto de estudio. Tras saber esto, podemos empezar a analizar con precisión qué ocurre mecánicamente a medida que realizamos ejercicios específicos, aunque para ello sería imprescindible un cierto conocimiento previo de la anatomía humana básica y de la fisiología muscular.

## 2.6 Tipos de contracción muscular

Existen diferentes tipos de contracción muscular, que debemos conocer para entender la motivación de los tipos de ejercicios hemos desarrollado y, qué funcionalidad se espera de cada uno de ellos y cómo hay que abordarlos en todos los desarrollos para que el resultado sea óptimo.

### Contracción isotónica o dinámica

- **Contracciones concéntricas:** Se producen cuando la fuerza ejercida por el músculo es mayor que la que ofrece la resistencia ( $\text{fuerza} > \text{resistencia}$ ). Los puntos de inserción se acercan produciendo acortamiento muscular (fase positiva). Esto sucede, por ejemplo, cuando levantamos un peso.
- **Contracciones excéntricas:** Se producen cuando la fuerza ejercida por un músculo es menor que la que ofrece la resistencia ( $\text{fuerza} < \text{resistencia}$ ). Los puntos de inserción se alejan produciendo un alargamiento muscular (fase negativa). Por ejemplo, al bajar un peso.

### Contracción isométrica o estática

Implica una contracción muscular sin movimiento. Ocurre cuando la fuerza ejercida por el músculo es igual a la que ofrece la resistencia ( $\text{Fuerza} = \text{Resistencia}$ ). No hay movimiento. Por ejemplo, sostener un peso o empujar una pared.

## 2.7 Roles o funciones musculares

Un músculo, al contraerse durante una acción, puede asumir diferentes roles durante la ejecución del movimiento:

- **Músculo agonista o protagonista:** es el más efectivo para realizar un determinado movimiento en una articulación, el principal responsable del movimiento.
- **Músculo antagonista:** es el músculo cuya acción se opone a la del agonista.
- **Músculos auxiliares:** ayudan a los agonistas a realizar el movimiento.

- **Músculos estabilizadores:** se contraen isométricamente para estabilizar las "articulaciones vecinas" para que los agonistas puedan trabajar con mayor fluidez.
- **Músculos sinérgicos:** cuando dos músculos realizan la misma función para realizar un movimiento. Por ejemplo, el esternocleidomastoideo o gemelos.

Un grupo muscular incluye todos los músculos que producen el mismo movimiento en la misma articulación. El grupo lleva el nombre de la articulación en la que se produce el movimiento causado por la contracción concéntrica de estos músculos. Por ejemplo, los flexores del codo es el grupo de músculos que al contraerse flexionan concéntricamente el bíceps braquial, braquial y braquioradial.

Un ejercicio puede implicar uno o más movimientos articulares. Un músculo realiza un movimiento específico, y un ejercicio implica una combinación de varios movimientos específicos. Un músculo solo puede desarrollar tensión. El ejemplo más claro es el de una goma: si tiramos solo de uno de sus extremos, ambos tienen la misma cantidad de estiramiento o tensión, es decir, aunque tiremos solo de uno de estos extremos, la goma se estirará por igual en todos sus puntos. Lo mismo sucede con las fibras musculares, que se contraen y estiran por igual en su totalidad.

## 2.8 Planos y ejes anatómicos

Dentro del estudio de la biomecánica de las articulaciones se deben tener en cuenta diferentes elementos, los cuales se enumeran a continuación:

- Clasificación
  - Tipo
  - Género
- Movimientos realizados
- Plano y eje
- Posición de referencia
- Distancia en grados
- Músculos involucrados

Todos los movimientos de cualquier articulación se realizan en un plano y alrededor de un eje. Así pues, los principales movimientos articulares pueden ocurrir en tres planos, que son: sagital, coronal o también denominado frontal y transversal, también conocido como horizontal o axial.

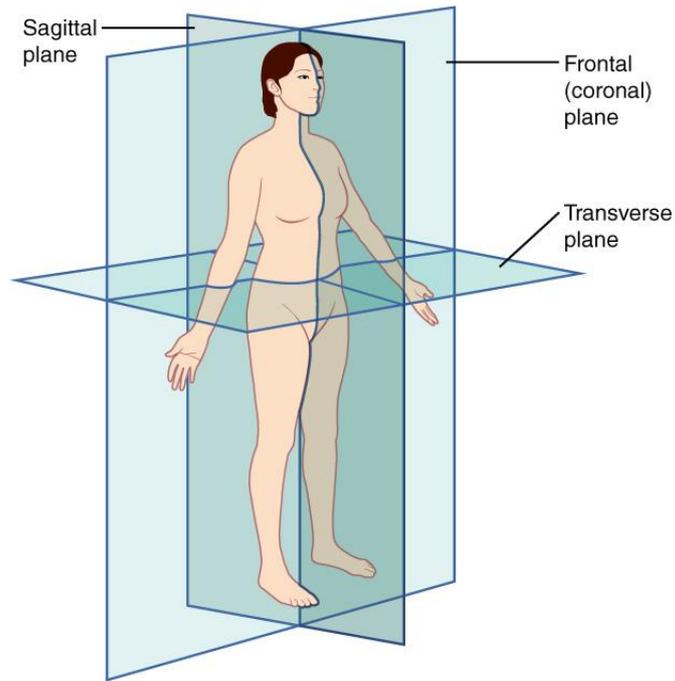


Ilustración 12 - Planos anatómicos (movements, s.f.).

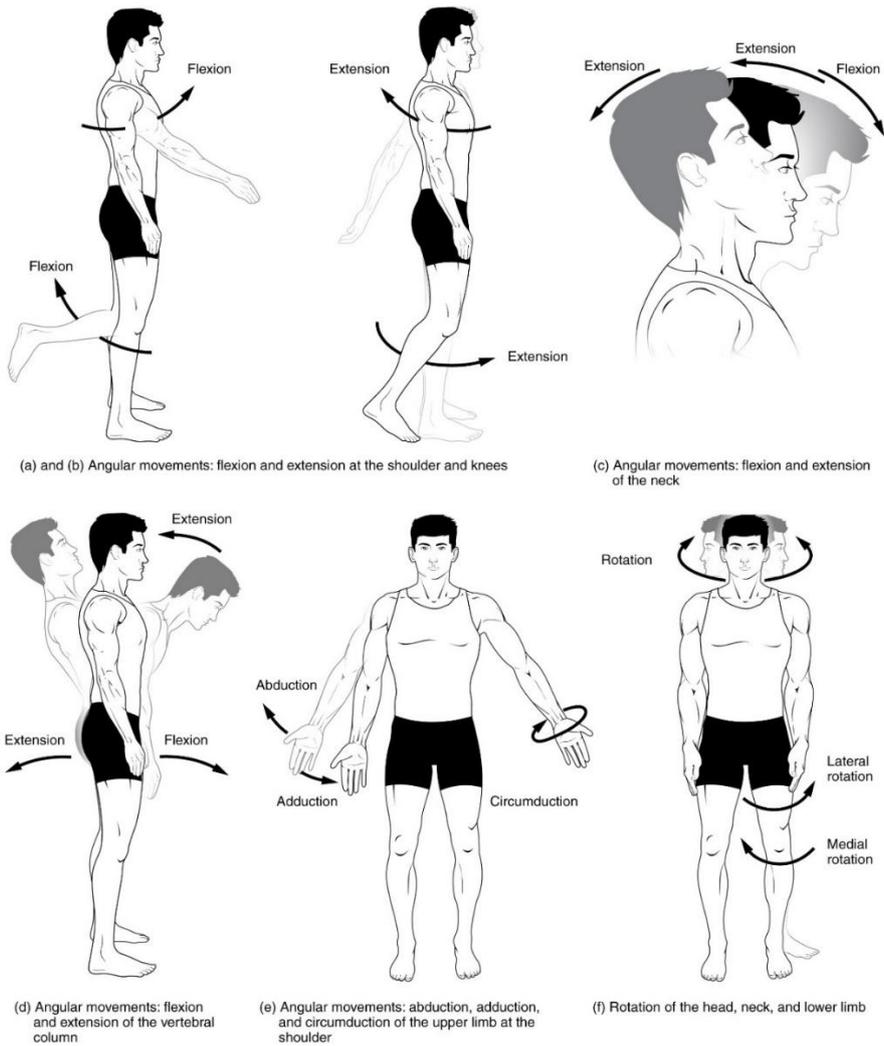


Ilustración 13 - Movimientos articulares (movements, s.f.).

Hay tres pares de movimientos básicos:

- **Flexión-extensión:** ocurre en el plano sagital, alrededor del eje lateromedial.
- **Abducción-aducción:** ocurre en el plano frontal, alrededor del eje anteroposterior.
- **Rotación interna-externa:** ocurre en el plano axial, alrededor del eje vertical o craneocaudal.

Las articulaciones se mueven de tal manera que los segmentos articulares no tienen ejes fijos de movimiento, sino ejes instantáneos de trayectorias de movimiento. La zona donde se acumula el mayor número de estos ejes instantáneos de rotación es la zona donde se sitúa el supuesto eje de movimiento. Las articulaciones se pueden clasificar teniendo en cuenta nueve tipos de movimientos: tres rotaciones en los tres ejes del espacio y tres traslaciones en cada eje.

## 2.9 Clasificación de las articulaciones

Según el tipo de movimiento, las articulaciones se clasifican en los siguientes tipos:

- **Pivote:** Se basa en la pronación-supinación. Un ejemplo de este tipo de movimiento son las dos vértebras superiores y el codo.
- **Esférico:** Dentro del movimiento esférico se encuentran los movimientos de abducción-aducción, flexión-extensión y rotaciones. El ejemplo de articulaciones que realizan este movimiento son el hombro y la cadera.
- **Elipsoidal:** Contiene movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión. Movimientos de este tipo son el radio del antebrazo y el hueso escafoides de la mano.
- **Bisagra:** Estos movimientos constan de flexión-extensión. La rodilla, el codo y el tobillo se encuadran en este tipo.
- **En silla de montar:** Realiza movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión. Las falanges son el ejemplo característico.
- **Deslizante o plana:** Este tipo no tiene eje de movimiento. Realiza pequeños portaobjetos limitados por ligamentos. Un ejemplo de articulaciones dentro de esta categoría son la clavícula y algunas articulaciones del pie y la muñeca.

Este listado se puede observar con mayor detalle en la Ilustración 14

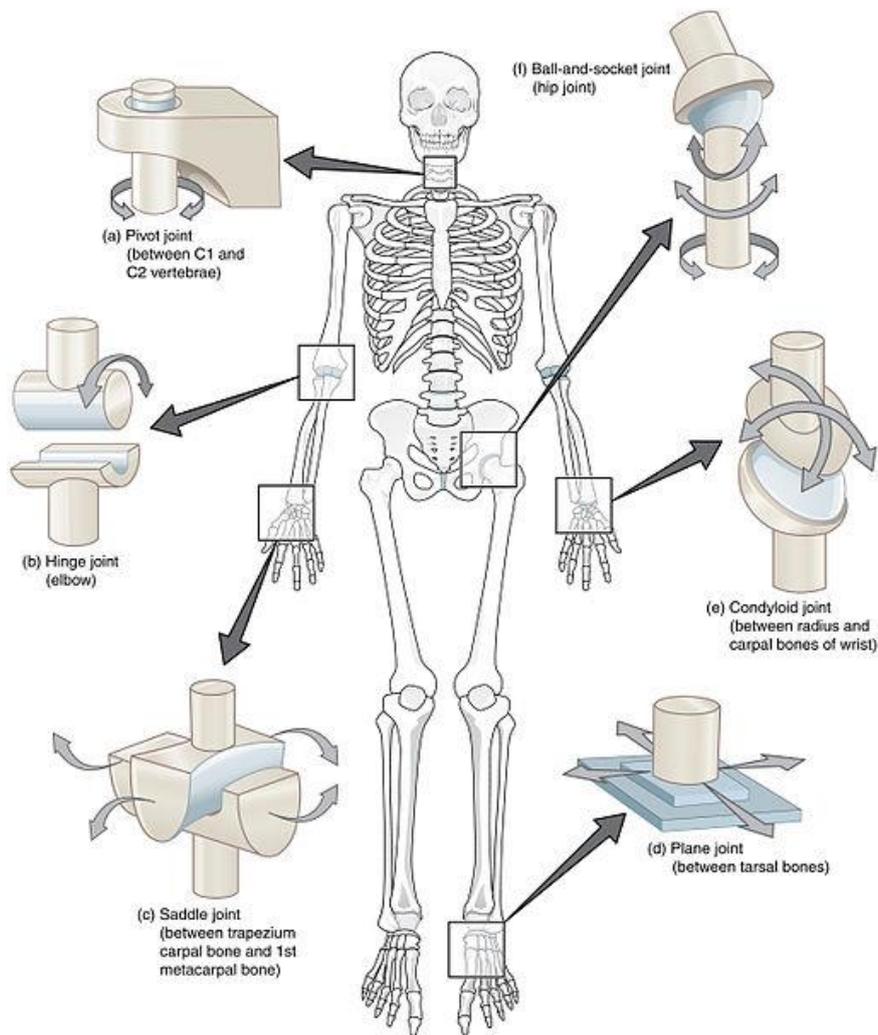


Ilustración 14 - Clasificación de las articulaciones (Hurtado, s.f.).

## 2.10 Kinect: tecnología para la detección y rastreo del movimiento

Kinect fue inicialmente "un controlador de juego y entretenimiento gratuito", desarrollado por Microsoft para la consola de juegos Xbox 360, y desde junio de 2011 para PC. Kinect permite a los usuarios interactuar con la consola sin tener que realizar contacto físico con un controlador de videojuegos tradicional, utilizando una interfaz de usuario natural que reconoce gestos, comandos de voz, objetos e imágenes<sup>5</sup>. El dispositivo Kinect disfrutó de una enorme popularidad y ventas durante los primeros años, convirtiéndolo en uno de los periféricos más vendidos de todos los tiempos.

Microsoft Research invirtió veinte años de desarrollo en la tecnología Kinect según las palabras de Robert J. Bach, comúnmente conocido como Robbie Bach, quien fue el Presidente de la División de Entretenimiento y Dispositivos de Microsoft. Kinect fue anunciado por primera vez el 2 de junio de 2009 en la Electronic Entertainment Expo 2009 como "Project Natal".

<sup>5</sup> <http://download.microsoft.com/download/f/6/6/f6636beb-a352-48ee-86a3-abd9c0d4492a/kinectmanual.pdf>

El sensor Kinect es una varilla horizontal de aproximadamente 23 cm unida a una pequeña base circular con un eje de unión de bola y zócalo, y está diseñado para colocarse longitudinalmente por encima o por debajo de la pantalla de video. El dispositivo cuenta con una cámara RGB, sensor de profundidad, micrófono de matriz múltiple y procesador personalizado que ejecuta software propietario, y que proporciona capacidades de captura de movimiento 3D de cuerpo completo, reconocimiento facial y reconocimiento de voz. El micrófono de matriz de sensores Kinect permite que la Xbox 360 realice la localización de fuentes acústicas y la supresión del ruido ambiental, lo que le hace posible participar en el chat de Xbox Live sin usar auriculares.

El sensor de profundidad es un proyector infrarrojo combinado con un sensor CMOS monocromo que permite al Kinect ver la habitación en 3D en cualquier condición de luz ambiental. El rango de detección de profundidad del sensor es ajustable gracias al software Kinect, capaz de calibrar automáticamente el sensor en función de la jugabilidad y el entorno físico del jugador, como la presencia de sofás.

El software del sistema Kinect permite a los usuarios operar la interfaz de la consola Xbox 360 mediante comandos de voz y gestos con las manos. Kinect utiliza técnicas de reconocimiento de voz y reconocimiento facial para identificar automáticamente a los usuarios. Entre las aplicaciones de video que Kinect usa para chatear por voz o video con usuarios u otros usuarios de Xbox 360 y Windows Live Messenger, se encuentran Skype, Microsoft Teams, Zoom o Google Meet, con total compatibilidad al usar los programas con Kinect. La aplicación puede usar la funcionalidad de seguimiento de Kinect y el sensor giroscópico motorizado para ajustar la cámara para que el usuario permanezca en el marco, incluso cuando se mueve. En la Ilustración 15 y la Ilustración 16 se pueden observar los elementos que componen tanto el dispositivo Kinect 360, como el Kinect v2.

Kinect se compone de una serie de cámaras y micrófonos como se muestra en dichas ilustraciones.

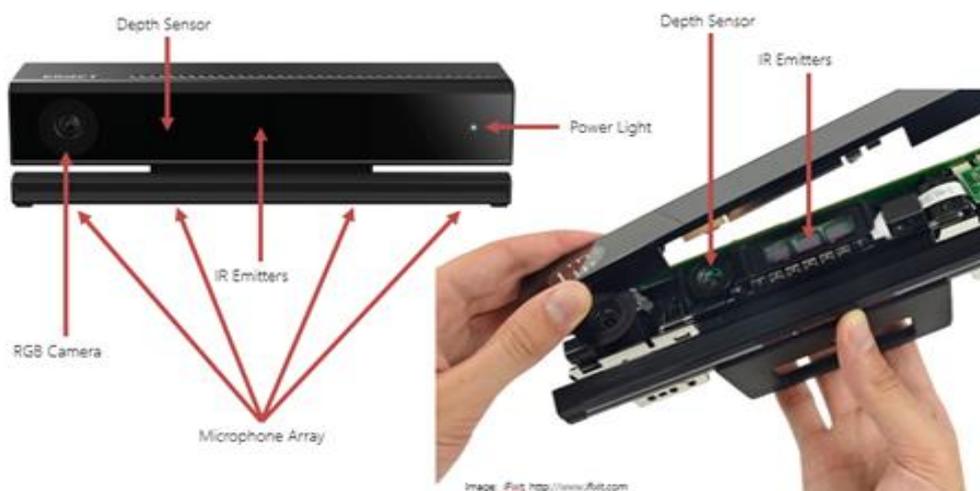


Ilustración 15 - Dispositivo Kinect v2.

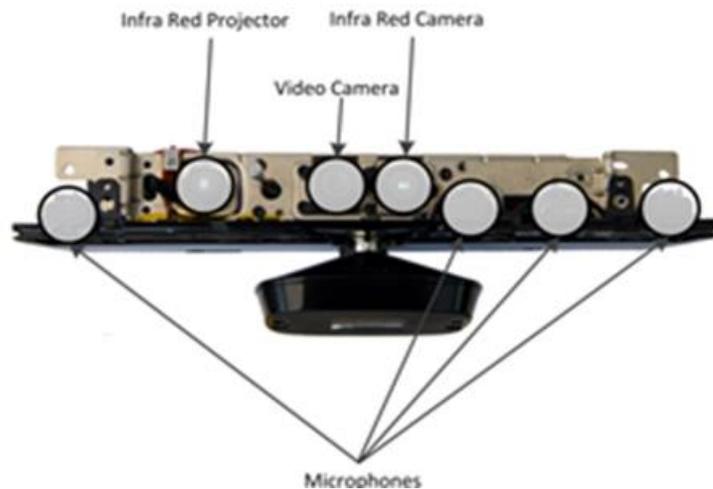


Ilustración 16 - Dispositivo Kinect v1.

El sensor de profundidad detecta qué elementos, en su campo de visión, están y a qué distancia. Para ello, se utilizan diferentes técnicas dentro del concepto *range imaging* (Rango Imagen). Nuestro cerebro, por ejemplo, utiliza la técnica de triangulación estéreo, el Kinect V1 utiliza una técnica llamada luz estructurada y el Kinect V2 utiliza la técnica de tiempo de vuelo. Antes de comentar con mayor detalle las diferencias entre los dos dispositivos Kinect, veamos en qué consiste la tecnología basada en luz estructurada, ya que la técnica de tiempo de vuelo ya ha sido mencionada en el apartado 8.3.

Así pues, la tecnología basada en luz estructurada es capaz de capturar la forma y características de un objeto mediante la proyección de un patrón de luz y su registro en un sistema de adquisición en una cámara. Este tipo de tecnología se basa en capturar la radiación que refleja el objeto a estudiar, ya sea de la luz visible/ambiente o de la emisión de algún tipo de luz o radiación hacia el objeto. Además, más concretamente, la Kinect v1, usa lo que se denomina el método por interferencia láser, que trabaja con dos fuentes de luz y una cámara. Los haces proyectan dos patrones de rayas sobre la escena o el objeto (Ilustración 17). La interferencia da lugar a patrones regulares y equidistantes entre sí. Variando el tamaño del patrón podemos obtener una adquisición mucho más cuidadosa, generando un patrón mucho más pequeño, cuando existen muchos detalles para tener en cuenta, efecto que se logra modificando la inclinación y el ángulo entre las fuentes de luz. Algunos inconvenientes que se asocian al uso de este método son el alto coste de implementación que tiene y la posibilidad de interferencia del haz con las partes reflejadas de otras zonas del objeto debido a no poder modular las rayas individualmente. De este defecto se habla más adelante con la utilización del código Gray (Lanman, 2007).

Este método genera señales invasivas que pueden ser cuantificadas. Se puede medir la pérdida o alteración de información colorimétrica o de textura de las superficies iluminadas, la inconsistencia del flujo óptico, o incluso, la agresión que pueden causar las fuentes láser. Es por ello por lo que se ha ido trabajando en métodos de proyección de luz en el espectro no visible (Fofi & Sliwa), cada uno de ellos basados en diferentes tipos de luz: luz estructurada infrarroja (IRSL), invisible (ISL) y filtrada (FSL). El método de luz estructurada fue el más extendido, debido a que no interfiere con la iluminación de la escena y no altera el color de esta, y es el que utilizó el sistema Kinect de Microsoft.

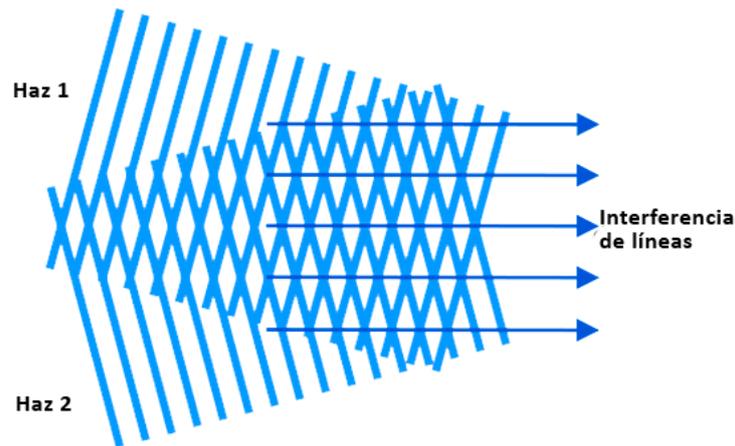


Ilustración 17 - Interferencia líneas.

## Diferencias entre Kinect y Kinect V2

Con el lanzamiento de la versión 2 de Kinect se pudieron observar varias diferencias entre versiones. La siguiente tabla ilustra estas diferencias.

Tabla 1 - Diferencias entre Kinect v1 y Kinect v2.

Capacidad	Kinect V1	Kinect V2
<b>Vídeo</b>	640×480 @30 fps 1280×960 @12 fps	1920×1080 @30 fps definición alta.
<b>Profundidad</b>	320×240, 640×480 Distancia 0,8 a 4 m. por defecto en modo estándar. Distancias de 0,4 a 3 m. en modo cercano.	512×424 Distancias 0,5 y 4,5 m.
<b>Cuerpo Tracck</b>	Capacidad para detectar a 6 personas, pero solo dos pueden ser rastreadas por completo.  Por cuerpo detectado, capaz de identificar 20 articulaciones.  Se llama corriente esquelética.	Capacidad para detectar 6 cuerpos, todos completamente rastreados.  Por cuerpo detectado, capaz de identificar 25 articulaciones.  Se llama BodySource.
<b>USB</b>	2.0	3.0
<b>Sistema operativo</b>	Win7 o más alto.	Win 8.1 o superior. Solo 64 bits.

Además, dentro de las mejoras que se han implementado es necesario mencionar las nuevas características del V2, tales como:

- Aumento en calidad o fidelidad de la cámara de profundidad, hasta 3X.
- Micrófonos mejorados (cero balanceado).
- El infrarrojo (IR) es independiente (ya que en V1, estaba dentro de la profundidad). De hecho, esto nos permite tener una nueva fuente o flujo para manipular, que es la fuente infrarroja, con una resolución de 512 x 424.
- Capacidad de seguimiento del estado de la mano (dos estados: abierto, cerrado).

En ciertos campos se presenta un enfoque innovador que utiliza Microsoft Kinect como un componente esencial para el desarrollo de laboratorios educativos de realidad virtual basados en juegos (Lee, 2021). Esta técnica aborda varios aspectos diferentes. En primer lugar, representa un método eficiente para crear el VE (*Virtual Environment / Entorno Virtual*)

utilizando Kinect como herramienta de medición. En segundo lugar, Kinect se utiliza como un sistema DAQ (*Data Acquisition System / Sistema de Adquisición de Datos*) sustituto para adquirir datos de rango y rastrear el movimiento de objetos de interés. Por fin, Kinect sirve como una nueva interfaz humano-computadora para rastrear el movimiento de todo el cuerpo de los usuarios y reconocer sus voces. Utilizando el método descrito en (Lee, 2021)., se pueden lograr tres aspectos principales (entorno virtual, sistema de adquisición de datos y precio) del desarrollo de la realidad virtual educativa con un Kinect económico y disponible comercialmente.

### **Aplicaciones basadas en Kinect**

El uso de Kinect se ha convertido en un tema popular desde su introducción en 2010, cuando solo se vendía con fines de entretenimiento. En 2012, Microsoft lanzó Kinect para Windows con un kit de desarrollo de software Kinect de código abierto (Kinect SDK), lo que permite a los clientes desarrollar sus propias aplicaciones con menos dificultades técnicas. Debido al alto precio y la falta de disponibilidad de las cámaras 3D comerciales, Kinect se utiliza con frecuencia como un reemplazo adecuado. Las aplicaciones de Kinect incluyen escanear las caras de los usuarios y crear avatares personalizados, modelar entornos interiores, reconstruir un laboratorio virtual dentro de un entorno de juegos y reconstruir en 3D en tiempo real.

El uso de Kinect para rastrear el movimiento de objetos que no sean cuerpos humanos es un tema de investigación menos popular. Sin embargo, todavía se están reportando algunos avances en la investigación (Wang L. H., 2019) (Elaraby, 2018). Por ejemplo, los datos de color y profundidad de Kinect se han utilizado para estimar el flujo de movimiento 3D, para estimar el movimiento 3D basado en partículas de escena y para rastrear el movimiento de los objetos en el interior de laboratorios educativos.

El dispositivo Kinect puede potencialmente servir como una herramienta de captura e interpretación de gestos. Durante las conferencias, sería más fácil para los instructores usar sus gestos para controlar las computadoras en lugar de hacer clic repetidamente con el ratón o tocar el teclado. Por ejemplo, un orador puede usar una combinación de gestos para controlar una presentación de diapositivas. Mientras que un investigador que quiera demostrar la cinemática de un robot con la ayuda del Kinect puede guiar al robot moviendo los brazos, lo cual resulta más rápido que operar el robot a través de una interfaz tradicional.

### **Kinect v2**

Kinect v2 es un dispositivo de entrada de detección de movimiento de bajo costo compuesto por cámaras RGB y sensores que puede mapear la profundidad a través del cálculo del tiempo de vuelo a una resolución espacial de 512 × 424 píxeles y en un rango de trabajo de profundidad de 0,4 a 4,5 m. Está soportado por un Kit de Desarrollo de Software (SDK) que construye modelos de esqueletos humanos de hasta seis personas presentes en la escena, rastrea el movimiento humano y reconoce gestos en tiempo real, entre otras aplicaciones. Todas estas capacidades convierten a Kinect en una interfaz de usuario natural que no requiere ninguna interacción física.

El SDK proporciona una serie de flujos de datos, siendo los más populares aquellos que comprenden imágenes en color 2D, imágenes de profundidad 3D y marcos esqueléticos 3D. Este último incluye el modelo esquelético incorporado que consiste en las ubicaciones 3D de las 25 articulaciones mostradas en Ilustración 18. Como se afirma en (Lun & Zhao, 2015), este modelo es el primer paso hacia el reconocimiento del movimiento humano. Una vez que se estima el esqueleto humano, se debe interpretar el movimiento y se debe entregar la retroalimentación adecuada al usuario.

El SDK gratuito allanó el camino para desarrollar una amplia gama de aplicaciones, algunas de ellas destinadas a apoyar la fisioterapia y la rehabilitación (Xavier-Rocha, 2020) (García-Agundez, 2019). Están destinadas principalmente a garantizar una supervisión automática en el hogar de ejercicios repetitivos prescritos por especialistas médicos, basados en el seguimiento de las articulaciones y segmentos corporales sin marcadores. La Ilustración 19 muestra un ejemplo de seguimiento de movimiento a través del modelo de esqueleto incorporado.

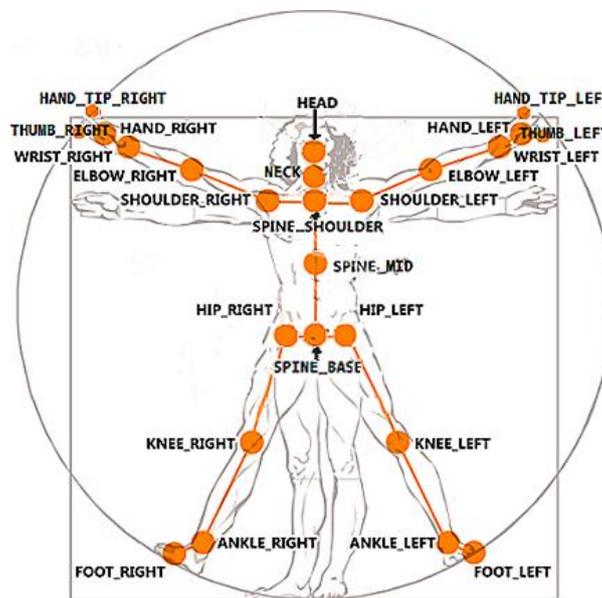
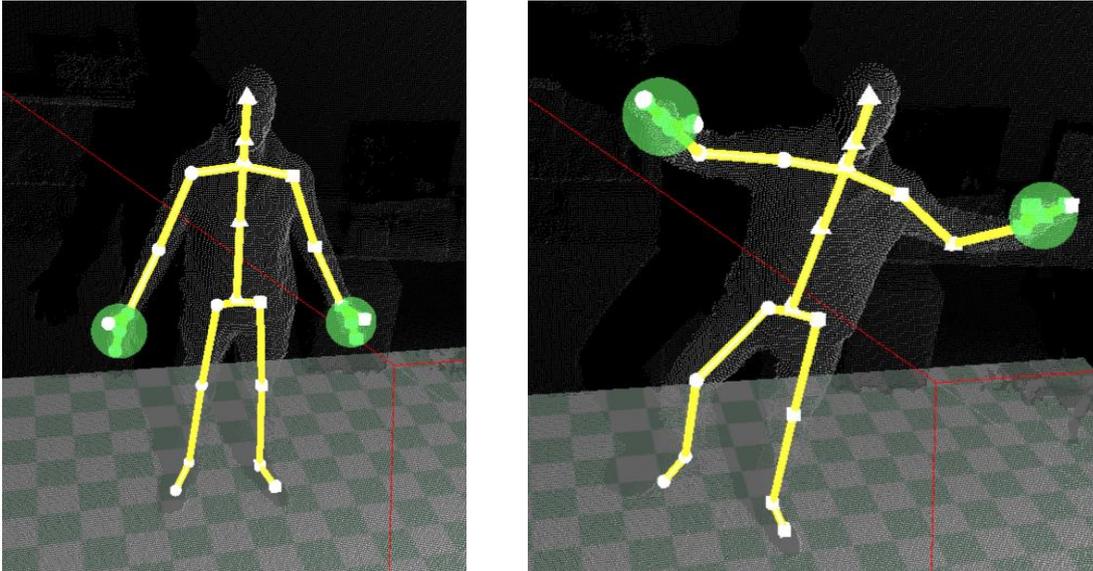


Ilustración 18 - Modelo esquelético proporcionado por el Kit de desarrollo de software (SDK) que consiste en las ubicaciones 3D de 25 articulaciones (Wiedemann, Planinc, Nemeč, & Kampel, 2015).



*Ilustración 19 - Un ejemplo de seguimiento del movimiento corporal a través del modelo esquelético incorporado.*

### **Funcionalidad del sistema Kinect**

La eficiencia de los enfoques actuales de creación de componentes realidad aumentada se ve obstaculizada por los métodos para adquirir parámetros geométricos del mundo real y por la elección de herramientas de mapeo. Por lo tanto, el laborioso trabajo de topografía en el mundo real podría completarse más rápidamente si se utilizara un sensor eficiente para reemplazar los dispositivos de medición tradicionales. Además, todo el proceso de creación de un elemento de realidad aumentada se puede simplificar significativamente si el sistema se adapta con algún *middleware* (lógica de intercambio de información entre aplicaciones) que pueda procesar los datos sin tratar adquiridos y generar mapas y modelos listos para usar automáticamente.

Varios tipos de dispositivos de medición sin contacto, como cámaras bidimensionales y escáneres tridimensionales, son herramientas potenciales para estudiar el mundo real. Sin embargo, las cámaras 2D sólo pueden adquirir imágenes 2D. Por lo tanto, se requieren algoritmos complicados para generar geometrías 3D. Este tipo de dispositivos solo es adecuado para aplicaciones que tienen bajos requisitos de velocidad computacional y precisión. Hay dos tipos de escáneres 3D que se encuentran comúnmente, a saber, escáneres láser y escáneres infrarrojos. Los escáneres láser a menudo son más caros y requieren usuarios experimentados para operar. Por otro lado, los escáneres infrarrojos como el Kinect son más asequibles, accesibles y flexibles.

Los principales pasos de adquisición y procesamiento de datos utilizados por los sistemas de cámaras Kinect se muestran en la Ilustración 20. Kinect genera información de profundidad y color al mismo tiempo, y esos datos se asignan a la salida en forma de una nube de puntos 3D. Los siguientes pasos incluyen encontrar la ubicación de Kinect, generar una nube de puntos global 3D, subdividir esta nube de puntos y combinar las nubes de subpuntos resultantes.

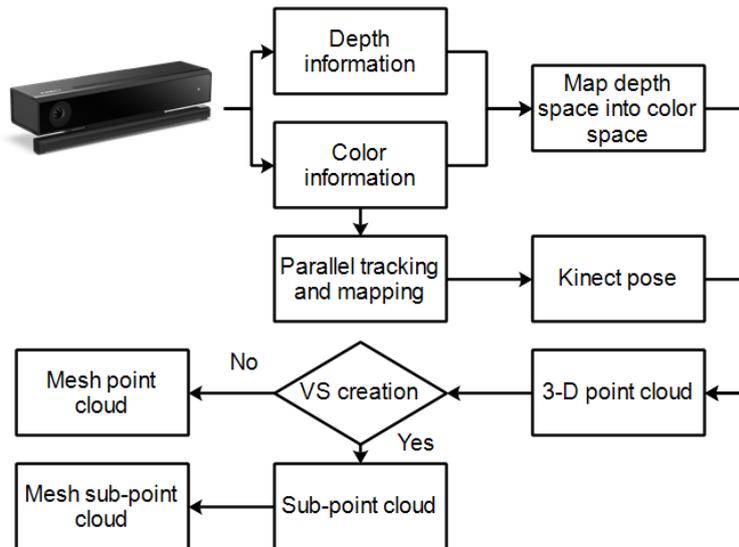


Ilustración 20 - Algoritmo Kinect v2 ([www.microsoft.com/docs/KinectV2/](http://www.microsoft.com/docs/KinectV2/)).

### Kinect en el entorno de investigación

En la revisión de la literatura, se realizaron búsquedas en las bases de datos Web of Science, PubMed e IEEE Xplore utilizando las siguientes palabras claves para dispositivos Kinect: "Kinect" Y "revisión" O "precisión" O "aplicaciones médicas" O "discapacidad física" O "educación" O "reconocimiento de gestos" O "precisión" O "esqueleto". Las palabras claves también tienen la capacidad de recuperar información sobre exactitud y precisión, incluso cuando se habla de flujo esquelético o cuando se reconocen gestos. Si bien no son sinónimos, si un estudio se centra en la precisión, la exactitud siempre está presente también, pero lo contrario no es el caso cuando se buscan palabras claves con "precisión" mientras se usa al menos uno de los nombres de los sensores. En nuestro caso, cuando hablamos de sistemas de medición, exactitud significa el grado de proximidad de una cantidad medida a su valor real. Precisión significa el grado en que las mediciones repetidas producen los mismos resultados. Las palabras claves "aplicaciones médicas", "discapacidad física" y "educación" fueron elegidas para evaluar el uso multidisciplinario de los sensores.

Aun así, existe una baja posibilidad de que se encuentren y evalúen algoritmos que fueron desarrollados por sus autores entre las búsquedas que se realizan. Estos algoritmos utilizan al menos uno de los sensores, y su precisión generalmente también se estudia. En cuanto a la búsqueda, no se aplicó ningún filtrado: todos los artículos se indexaron desde el inicio de la primera versión de Kinect. Los resultados de la búsqueda se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Resultados de la búsqueda para la revisión de la literatura: número de artículos relacionados.

Palabras clave	Web de ciencia	PubMed	IEEE Xplore
Revisión de Kinect	74	36	48
Precisión de Kinect	635	200	884
Precisión de manos de Kinect	105	4	128
Esqueleto de Kinect	183	99	578
Reconocimiento de gestos de Kinect	240	30	727
Aplicaciones médicas de Kinect	27	19	183
Discapacidad física de Kinect	22	22	24
Educación de Kinect	67	77	183

Según los resultados de búsqueda, los dispositivos Kinect son muy populares en los campos de investigación aplicada analizados, y la mayoría de los estudios giran en torno al reconocimiento de gestos y sus propiedades de detección de profundidad.

En términos del número de estudios sobre la precisión del dispositivo, hay varias alternativas, pero Kinect es mucho más popular en este sentido, que competidores como pueden ser Intel RealSense, por citar un ejemplo.

### Seguimiento de movimiento

La monitorización del movimiento en su conjunto es un vasto campo de investigación. Los sensores utilizados en el seguimiento de movimiento se pueden clasificar en varias categorías según Zhou y Hu (Zhou & Hu, 2008). Según ellos, las tres categorías principales de seguimiento son "seguimiento no visual", "seguimiento visual" y "seguimiento asistido por robot".

Las tres categorías principales tienen múltiples subclases. Además, en su estudio de clasificación, realizaron una encuesta sobre el uso de sensores en el campo de la rehabilitación. Examinaron varios sensores de las tres clases principales, pero concluyeron que estos sensores no están orientados al paciente, no permiten el uso doméstico y son caros. Por el contrario, el Kinect es un sensor de bajo costo y permite su uso en casa si el terapeuta lo sugiere.

Según la encuesta antes mencionada de Zhou y Hu, el sensor Kinect se puede clasificar en la categoría visual sin marcadores. Los sensores que se clasifican en esta categoría tienen alta precisión, alta compatibilidad, computación eficiente, bajo costo y su único inconveniente es la oclusión. Como es un sensor visual sin marcadores, el Kinect solo puede rastrear los movimientos que ocurren frente a él (lo que significa que los movimientos ocurren en su campo de visión).

En 2011, cuando el Kinect aún era joven, se evaluó su utilidad educativa (Yukselturk, 2018), arrojando resultados escépticos pero positivos. En 2014, revisando artículos de tendencia en realidad aumentada, se descubrió que la demanda de juegos educativos de AR para Kinect

estaba aumentando al mismo tiempo que se mencionaba que su seguimiento de objetos debería mejorarse algorítmicamente (Dehkordi, 2018).

Además, en 2014, se estudió el impacto clínico y técnico del sensor Kinect (Guzsvinecz, 2019) comparándolo con LMC, Asus Xtion Pro-Live e Intel Creative y el número de artículos indexados por PubMed evaluando el Kinect aumentó drásticamente desde 2011, concluyendo que el Kinect es útil en aplicaciones médicas. Sobre la base de estos artículos, encontramos que la mayoría de los estudios solo incluyen la rehabilitación de las extremidades superiores y la mayoría de los estudios se centran en los juegos serios<sup>6</sup> con Kinect para hacer que la rehabilitación y la educación sean divertidas y motivadoras.

Hay otros estudios sobre Kinect que no cubren la precisión y la exactitud, sino que se centran en su uso e idoneidad en múltiples campos: laboratorios virtuales para la educación (Zhang, 2018), ayuda a niños con necesidades educativas especiales (Baykal, 2020), medición y mejora del deterioro cognitivo leve (de Melo Cerqueira, 2020), mejora de la motivación (Vukićević, 2019), juegos de ejercicio (Almasi, 2022), establecimiento de una interfaz controlada por gestos para personas con discapacidad (Zhang, 2018), evaluación del rendimiento en juegos de personas con discapacidad física (Scano, 2018), etc.

En base a toda la información y comparativa de los estudios analizados, ya se disponía de suficientes motivos para adoptar el dispositivo Kinect v2 para el desarrollo del sistema KineActiv realizado en esta tesis. La base científica sobre la que se sustenta hace que sea lo suficientemente preciso y estable para el cometido que afrontamos. Así pues, nos decantamos definitivamente para usarlo según los fines que se establecen para realizar la rehabilitación y la mejora de las condiciones físicas de los usuarios a los que va dirigido KineActiv.

---

<sup>6</sup> Los juegos serios, también llamados "juegos formativos", son juegos diseñados para un propósito principal distinto del de la pura diversión.

## 3 KineActiv: concepción, diseño y desarrollo

Es esta sección se expone la idea inicial de qué es el sistema KineActiv como parte central de las aportaciones de esta tesis, así como el diseño que servirá de base para los distintos escenarios de aplicación explorados. Además, se explica el alcance funcional del sistema y cómo se plantean las distintas soluciones que posteriormente se implementan.

El capítulo finaliza con el alcance tecnológico usado para la implementación del sistema KineActiv. Esta implementación es la base tanto para el sistema de rehabilitación, como el sistema enfocado a la tercera edad.

### 3.1 Introducción

Desde hace algún tiempo, la evolución en el ámbito de la rehabilitación y el bienestar físico se ha visto afectada por la introducción de nuevas técnicas y tendencias que permiten la adaptación de los tratamientos a los tiempos actuales, tratando de mejorar y consolidar los resultados esperados en el mínimo tiempo posible y también, que la calidad de vida de los usuarios sea mejor y se extienda al máximo. Para ello, cada vez se utiliza más la técnica llamada "terapia activa" (Kaur, 2013), que consiste en realizar ejercicios por parte del paciente durante un tiempo determinado. Todo ello supervisado y controlado por un profesional.

Los ejercicios, que son prescritos por los profesionales, regulan, controlan y ayudan a las personas con dificultades motoras a recuperar la movilidad en las extremidades afectadas y, por tanto, la calidad de vida. Una práctica común es contar con personal especializado en sesiones de rehabilitación (p. ej. fisioterapeutas), que supervisen la cantidad y calidad de los ejercicios. Una alternativa al personal especializado es el uso de robots diseñados para ayudar a los pacientes a realizar ejercicios de rehabilitación (Bai, Song, Xu, Nie, & Li, 2017), que generalmente solo es posible en entornos clínicos o especializados (p. ej. hospitales). Sin embargo, se trata de soluciones costosas y pueden implicar el traslado de pacientes con movilidad reducida.

Un enfoque más barato, pero menos efectivo, es realizar los ejercicios prescritos de forma independiente en casa, sin supervisión profesional. Sin embargo, un estudio indica que solo el 31 % de las personas con un trastorno de movilidad realizan los ejercicios correctamente (Shaughnessy, Resnick, & Macko, 2006). Además, la pérdida de motivación del paciente es frecuente.

La proliferación de sensores cada vez más baratos ha permitido la creación y el desarrollo de sistemas capaces de controlar automáticamente la frecuencia, la duración y la corrección de los ejercicios prescritos (Rand, Kizony, & Weiss, 2004) (Chang, Chou, Wang, & Chen, 2013) (Saposnik, y otros, 2010). Además, el uso de interfaces de usuario multimodales, junto con las tecnologías de juego, podría ayudar a mantener al usuario motivado y comprometido durante la ejecución de los ejercicios. El objetivo final es mantener la adherencia del paciente al tratamiento, lo cual es particularmente importante en la rehabilitación a largo plazo debido a la necesidad de reducir los períodos de recuperación (Bai & Song, 2019).

En esta tesis se presenta KineActiv, un sistema diseñado para ayudar a fisioterapeutas en la supervisión de los ejercicios de los miembros superiores e inferiores, sin necesidad de estar presentes, auxiliando al paciente y contribuyendo a lograr una rehabilitación más efectiva y rápida. El sistema se basa en un sensor RGB-D (MS-Kinect V2) y una interfaz de usuario amigable,

interactiva y basada en juegos, que tiene como objetivo hacer que la ejecución de los ejercicios sea más fácil y agradable. El sistema mide cuantitativamente los movimientos de las extremidades superiores e inferiores y los compara con objetivos numéricos previamente establecidos por el fisioterapeuta. También permite al especialista realizar un seguimiento del progreso del paciente en tiempo real a través de un sistema basado en tecnología web, con estadísticas que resumen el rendimiento del paciente.

En capítulos posteriores se describen los experimentos realizados con un conjunto de datos reales consistentes en mediciones cuantitativas. El análisis estadístico nos permitirá evaluar la precisión y fiabilidad del sistema, así como su sensibilidad para medir el progreso de los pacientes.

Un colectivo que podría beneficiarse particularmente del desarrollo de tecnologías de terapia asistida como la descrita es el de adultos mayores. La población mundial está experimentando un rápido envejecimiento, lo que representa un desafío para casi todas las áreas de la sociedad: satisfacer una creciente demanda de bienes y servicios específicos adaptados a las necesidades de las personas mayores. Un ejemplo llamativo es el mercado de las tecnologías de asistencia, tanto para la teleasistencia como para la promoción del envejecimiento activo, que se espera que crezca drásticamente en las próximas décadas (Golant, 2017). Además de los beneficios para la calidad de vida, estas soluciones deberían conducir a una reducción significativa de los costes sanitarios (Aoyagi & Shephard, 2011).

Recientemente, ha surgido una serie de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) que tienen como objetivo proporcionar formas innovadoras y efectivas de ayudar a las personas mayores en su vida cotidiana (Blažun, Saranto, & Rissanen, 2012). Paralelamente, se han llevado a cabo estudios para acercar la asistencia de las TIC a las personas mayores e investigar sus actitudes hacia la tecnología (Reeder, y otros, 2013) y, sin embargo, se ha trabajado poco para evaluar objetivamente los beneficios de introducir tecnologías en la vida cotidiana de las personas mayores.

Las TIC de asistencia se pueden clasificar en dos categorías: herramientas que se centran en la atención pasiva y herramientas que promueven la atención activa. Por un lado, las tecnologías de asistencia pasiva incluyen aquellas herramientas diseñadas para sostener la vida diaria (Khosravi & Ghapanchi, 2015). Ejemplos ilustrativos son las tecnologías integrales de eSalud, que permiten el acceso remoto a servicios de salud para monitorear enfermedades crónicas o ayudar en caso de eventos inesperados (Flick, Zamani, Stahl, & Brem, 2020). En (Mogollón, Solorzano, González, & Ilaquiche, 2018) se propone un monitoreo remoto en tiempo real de la salud de una persona, que garantiza una intervención temprana en caso de un empeoramiento repentino del estado de salud. Otro ejemplo se puede encontrar en (Mentiplay, y otros, 2015), donde un sistema de seguimiento de actividad ayuda a los pacientes con enfermedad de Alzheimer a vivir de forma independiente. El sistema monitorea el movimiento de un paciente mientras realiza sus actividades diarias y brinda asistencia urgente en caso de necesidad. Se espera que los pacientes ganen confianza en sí mismos, mientras que los cuidadores se liberan de algunas de sus cargas.

Por otro lado, el cuidado activo abarcaría tecnologías para promover un estilo de vida activo mediante la incorporación de la actividad física en la rutina diaria de las personas mayores (Cyarto, Batchelor, Baker, & Dow, 2016). Un estudio reciente muestra el potencial de una clase de ejercicio virtual que utiliza tecnología de juego y avatar para mejorar las habilidades físicas y las conexiones sociales entre los ancianos (Ahmed, y otros, 2015).

Los beneficios de la fisioterapia en adultos de 70 años o más están bien establecidos (Mogollón, Solorzano, González, & Ilaquiche, 2018). Un estudio sobre fragilidad en nonagenarios evaluó los efectos del entrenamiento multicomponente en la producción de energía y masa musculares, la atenuación muscular, el riesgo de caídas y los resultados funcionales (Cadore, y otros, 2014). Los participantes mostraron una mejora significativa en el test TUG (*Timed Up and Go*) con tareas simples y dobles, lo que refleja una mejor respuesta física. Del mismo modo, los efectos del entrenamiento físico intensivo en adultos mayores que viven en comunidad se examinaron en (Binder, y otros, 2002). Los resultados muestran que la actividad de alta intensidad mejora las medidas de la función física más que las rutinas de ejercicio de baja intensidad (Li, y otros, 2017). La mayoría de estas iniciativas se implementaron a través de juegos digitales (Khosravi, Rezvani, & Wiewiora, 2016), donde aproximadamente el 90 % de los pacientes informaron que el uso de juegos UERG (*Upper Extremities Rehab Garden game / Juego de rehabilitación de jardín de extremidades superiores*) aumentó su motivación (Chen, Huang, & Wang, 2015).

Otros estudios que ofrecen ejercicios de rehabilitación basados en juegos (Wang, Kreutzer, Björnemo, & Davies, 2004) (Da Costa & de Carvalho, 2004) (Edmans, y otros, 2006) también han demostrado una mayor motivación y adherencia del paciente al tratamiento y al progreso objetivo de la condición física. Un estudio reciente (De Angeli, Jovanović, McNeill, & Coventry, 2020) encontró que el placer y el disfrute juegan un papel decisivo en la motivación de las personas mayores. Estos esfuerzos demostraron tanto el valor de introducir la fisioterapia en la atención integral de las personas mayores, como la mejor aceptación de la tecnología por parte de los usuarios mayores cuando perciben que estas soluciones proporcionan beneficios verificables y provocan sentimientos positivos.

En este sentido, Microsoft Kinect también ha supuesto una revolución en las tecnologías de soporte de fisioterapia (Al-Khafajiy, y otros, 2019), como mencioné en los párrafos anteriores. La integración de Kinect, juegos y realidad aumentada para la rehabilitación física de pacientes con lesiones cerebrales se puede encontrar en (Rand, Kizony, & Weiss, 2004) (Broeren, y otros, 2008) (Pyk, y otros, 2010). Estos trabajos se centraron en fortalecer la motivación de los pacientes para hacer ejercicio y entrenar el cerebro para recuperar una habilidad perdida, pidiéndole al paciente que se acerque a una meta.

A pesar del potencial de rehabilitación de estas herramientas, no son sensibles a las limitaciones funcionales relacionadas con la edad, como la pérdida de visión y audición, el deterioro de las habilidades motoras, el deterioro cognitivo y la mala cultura tecnológica (Arch, 2008).

Además, estas propuestas no implican mecanismos de corrección en tiempo real ni cuantifican objetivamente el nivel de logro de un objetivo físico. Un sistema basado en Kinect con un entorno interactivo de realidad aumentada se utilizó con éxito para la rehabilitación de las extremidades superiores en pacientes con accidente cerebrovascular (Agree, 2014). Sobre la base de los datos de movimiento obtenidos de los dispositivos de medición, el sistema monitorea y evalúa el progreso de la rehabilitación.

En base a los estudios analizados, el diseño propuesto de KineActiv (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019) para ayudar a los fisioterapeutas en la supervisión de los ejercicios de las extremidades superiores, ayudando a los pacientes lesionados a lograr una rehabilitación más rápida, sirve como base para el desarrollo del nuevo objetivo. Así pues, la

adaptación hacia la tercera edad implica una evolución con la meta de eliminar, reducir o ralentizar su fragilidad.

### 3.2 Alcance funcional

A partir del apartado anterior, en el que se han introducido las bases de por qué es necesario la investigación en tecnologías de asistencia a la terapia activa y el desarrollo de KineActiv y qué motivaciones existen para investigar estos temas, podemos discernir a quién se dirige un producto de estas características.

Por tanto, tenemos una base común para dos enfoques diferentes, con los que, descubrimos que la relación se establece en la realización de ejercicios para mejorar la condición física de los pacientes, ya sea a través de la terapia activa o para minimizar la fragilidad.

Con esta filosofía podemos adaptar un mismo producto a dos tipos de usuarios con necesidades diferentes. Por un lado, tendríamos adultos, de 18 a 65 años, activos, en mayor o menor medida, con una alta conciencia corporal, que han sufrido una lesión y son conscientes de que, para una mejor recuperación, deben colaborar en el proceso de rehabilitación. Cabe recordar que el fisioterapeuta o médico rehabilitador nos ayuda a recuperar parte de la movilidad de la extremidad dañada, pero tonificar, fortalecer y reducir los tiempos en el proceso de curación dependen del paciente a través de la realización de ejercicios que mejoren y potencien los músculos que, a causa de la inmovilización asociada a la lesión, se han debilitado y atrofiado en mayor o menor medida. Nadie puede hacer que nuestros músculos sean más poderosos excepto nosotros mismos.

Por otro lado, existen personas mayores de 65 años en las que, debido a la acción inherente al tiempo, sus músculos, equilibrio y funciones motoras, así como su conciencia corporal, sufren una degeneración gradual que puede mitigarse o incluso revertirse con la realización de actividad física moderada y prolongada en el tiempo. De hecho, uno de los problemas secundarios que ha provocado la crisis del COVID-19 es precisamente, a raíz de la obligación de permanecer confinados en casa, sin poder salir o realizar suficiente actividad física, el deterioro significativo de la salud y la movilidad de muchas personas mayores, por lo que una solución como la propuesta sería de gran ayuda para este grupo poblacional.

El propósito general de ambas versiones es la mejora física de las personas, contribuyendo así a aumentar su calidad de vida y su bienestar general, ya que se ha demostrado que realizar actividad física no solo es beneficioso a nivel muscular y óseo sino también a nivel mental (Aparicio García-Molina, 2010). Debido a las diferencias de los dos escenarios de aplicación, podemos distinguir dos tipos de perfiles profesionales que podrían estar interesados en utilizar el sistema KineActiv.

En primer lugar, centros de rehabilitación y de fisioterapia serían candidatos idóneos para utilizar el sistema enfocado a la rehabilitación de miembros dañados, así como todo el sistema sanitario, el cual soporta largas listas de espera para el servicio de rehabilitación. Estas listas de espera tienen un enorme impacto en el proceso de rehabilitación de los pacientes, aumentando el tiempo de rehabilitación con el incremento de los costes que esto conlleva. Además, con el uso del sistema propuesto, los profesionales podrían atender a más de un usuario simultáneamente, ya que un paciente puede realizar ejercicios físicos de forma autónoma, controlados en tiempo real por el sistema en una sala de un establecimiento sanitario. Mientras tanto, el profesional puede estar atendiendo a otro paciente, sin necesidad de estar pendiente

del nivel de ejecución de los ejercicios prescritos, ya que todo el movimiento realizado está registrado, y tiene la posibilidad de evaluar lo ejecutado en cualquier otro momento.

Otro elemento a tener en cuenta es que con el sistema KineActiv no sería necesario que el paciente se desplazara a las instalaciones médicas del profesional, sino que podría realizar los ejercicios desde casa de forma cómoda y segura, en un entorno doméstico para el paciente y a cualquier hora del día.

Por otro lado, la versión de KineActiv enfocada a las personas mayores está orientada para toda la población a partir de los 65 años, con el fin de contribuir a mantener una vida activa y saludable. Esto les permite ser autosuficientes durante el mayor tiempo posible, ya que se ha demostrado que cuando se reduce la actividad física, el deterioro cognitivo y físico aumenta significativamente con el tiempo. Una reducción en las capacidades psíquicas y motoras hace que las personas mayores tengan cada vez menos movilidad, y puedan necesitar sillas de ruedas o incluso perder la movilidad por completo y terminar en una cama con cuidados constantes.

Si se dan estos casos, también aparecen costes inherentes tanto a nivel privado como a nivel de la sociedad, que, junto con el aumento de la esperanza de vida, podrían ser inasequibles para muchas familias y también para las instituciones públicas. Así, el objetivo principal es promover en la medida de lo posible la autonomía de las personas mayores, sumando así calidad de vida e independencia durante el mayor tiempo posible.

De esta forma, una de las partes más interesadas en el uso de un sistema como KineActiv deberían ser las propias administraciones públicas, así como los centros de mayores, residencias y centros de día.

Otra de las partes que se beneficiarían serían los familiares de las personas mayores, ya que es normal desear que nuestros seres queridos estén siempre en las mejores condiciones posibles, tanto física como mentalmente.

### 3.3 Alcance tecnológico

En este apartado se describe el sistema y las tecnologías que se han utilizado en su desarrollo, así como una descripción del número de ejercicios desarrollados, las lógicas de control y el sistema de almacenamiento de datos, que servirán también de piedra angular para el correcto funcionamiento e interconexión de todos los elementos que componen KineActiv.

En este punto expondré los elementos en común a los sistemas desarrollados, ya que ambos tienen una base tecnológica compartida, independientemente de si es el sistema de rehabilitación articular, como el sistema de envejecimiento activo para ayudar a las personas mayores a mitigar la fragilidad motora relacionada con la edad.

La Ilustración 21 muestra los principales flujos de trabajo de KineActiv, donde interfaz de usuario gamificada basada en realidad aumentada se conecta a un sistema distribuido con un servidor central y una base de datos. El fisioterapeuta utiliza una aplicación basada en la web para prescribir tratamientos y monitorear el progreso del usuario. El entorno gamificado tiene como objetivo hacer que el proceso de rehabilitación sea más amigable y agradable, utilizando contextos gamificados específicos para cada tipo de ejercicio.

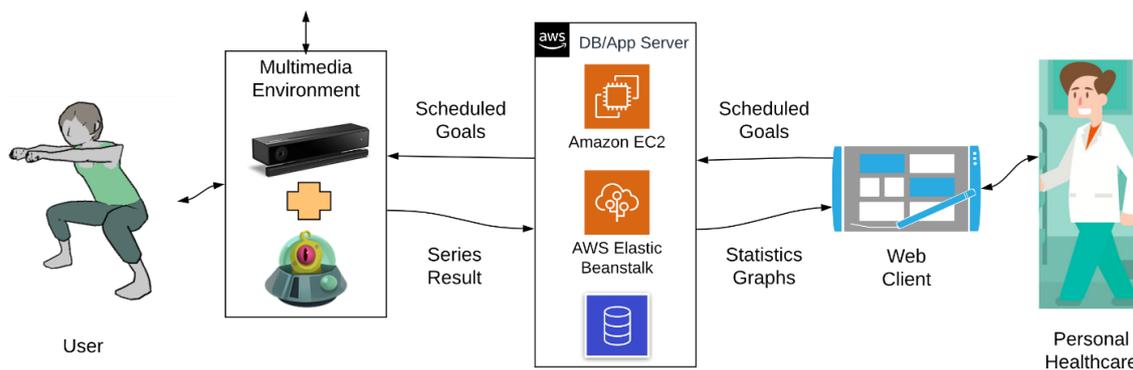


Ilustración 21 - Arquitectura del sistema KineActiv (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

Para obtener un producto que tenga la precisión necesaria para cumplir los objetivos que se han establecido desde el principio nos basaremos en varios conceptos que se han explicado anteriormente. Estos conceptos son los fundamentos técnicos del dispositivo Kinect, el alcance funcional del sistema, los métodos que permiten soportar interfaces de usuario avanzadas en realidad aumentada, entornos gamificados, interacción avanzada de usuario basada en gestos y evaluación en tiempo real de los ejercicios. Con todo ello se explicarán las bases tecnológicas y funcionales que se han desarrollado para la intercomunicación de todos los elementos que nos permiten la integración de los componentes.

La Ilustración 22 muestra el conjunto de ejercicios implementados, que se han dividido en actividades de hombro y rodilla. Dado que el hombro tiene más grados de libertad que la rodilla, el número de ejercicios en la primera articulación es mayor que en la segunda. Ambas articulaciones fueron elegidas de acuerdo con las sugerencias realizadas por el equipo médico, con el fin de abordar los problemas locomotores más comunes en la vejez y, por lo tanto, mejorar la calidad de vida de los ancianos. En (Lun & Zhao, 2015) se muestra un ejemplo que ilustra cómo interactúa un usuario con el sistema.

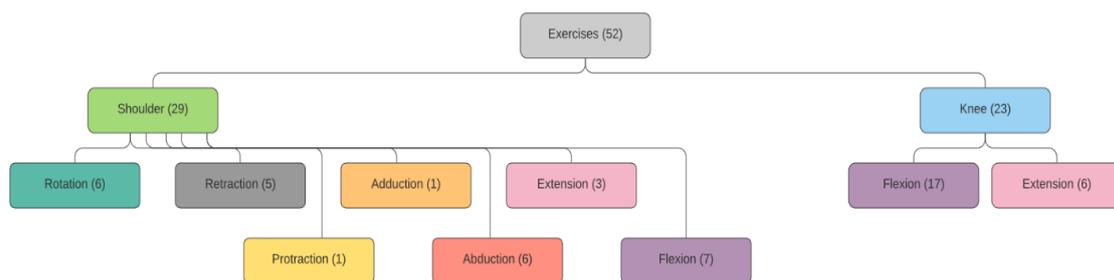


Ilustración 22 - Conjunto de ejercicios implementados (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

A pesar de la diversidad de ejercicios, la ejecución de todos ellos sigue un diagrama de flujo común mostrado en la Ilustración 23. Por medio de un comando basado en gestos, el usuario le hace saber al sistema que está listo para realizar el ejercicio, y el sistema comienza a monitorear el movimiento, particularmente las articulaciones y los segmentos del cuerpo involucrados en el ejercicio. El sistema espera hasta que la posición del usuario sea reconocida como la correcta para comenzar la primera repetición del ejercicio. Cuando el usuario comienza a ejecutar esta primera repetición, el sistema monitoriza sus movimientos y comprueba en tiempo real que cumple con las reglas de control definidas para el ejercicio, las cuales suelen basarse en márgenes de tolerancia. Si se detecta un error, se informa al usuario a través de

retroalimentación visual, para que pueda intentar corregirlo en la siguiente repetición. Este proceso continúa hasta que se completan todas las repeticiones programadas, después de lo cual los logros se almacenan en una base de datos.



Ilustración 23 - Diagrama de flujo de ejecución de ejercicios. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

Las principales herramientas de software utilizadas para el diseño e implementación de la gestión de sensores y componentes interactivos fueron las siguientes:

- **Autodesk Maya**<sup>7</sup>: Los avatares 3D se construyeron utilizando el software de animación 3D Maya. Para ilustrar mejor el ejercicio, los avatares fueron diseñados para girar 360º mientras se realiza el movimiento, haciendo así posible la observación desde todos los ángulos.
- **Adobe Illustrator**<sup>8</sup>: Los elementos gráficos 2D para la gamificación fueron evolucionando para seguir un estilo unificado y consistente. Adobe Illustrator se utilizó para este propósito. Para crear los efectos de movimiento de los elementos gráficos 2D,

<sup>7</sup> <https://www.autodesk.es/products/maya>

<sup>8</sup> <https://www.adobe.com/es/products/illustrator.html>

se diseñaron y secuenciaron todos los fotogramas necesarios para componer la animación de video deseada.

- **Motor de Unity**<sup>9</sup>: El entorno gamificado se implementó utilizando el motor de Unity.

En el diseño de todo el sistema se han tenido en cuenta detalles que serán necesarios en un futuro para poder realizar otro tipo de estudios y funcionalidades. Para poder implementar inteligencia artificial y aprendizaje automático, se han tenido que diseñar una estructura de base de datos lo suficientemente amplia que sirva también para realizar esas acciones y no únicamente para almacenar los datos que se generan. El fin de este diseño tan complejo tiene el objetivo de evitar un nuevo rediseño de todo el sistema con la pérdida de eficiencia asociada a estas labores.

Así pues, y como el desarrollo también permite el análisis de los datos por parte de sanitarios, profesionales de la salud, hospitales, mutuas de accidentes, residencias de ancianos y un grupo muy heterogéneo de perfiles, debíamos tener en cuenta que cada uno de ellos podrían tener unas necesidades diferentes en función del perfil de usuario, así como de las expectativas sobre el tipo de información relevante para realizar el estudio/análisis objetivo.

En la Ilustración 24 se puede intuir la magnitud de la complejidad de la base de datos, así como las relaciones entre las diferentes tablas que forman parte del sistema. Debido a esta complejidad, se hace imposible que se pueda mostrar y detallar cada uno de los elementos que se han desarrollado, así como la relación entre ellos. Por ese motivo, he almacenado en la nube el diseño completo para todo aquel que desee observar con detalle el diseño de la base de datos (accesible para su completa visualización y máxima definición a través del siguiente enlace de la plataforma Dropbox <https://www.dropbox.com/s/2acakek2u78mo71/BD.png?dl=0>).

---

<sup>9</sup> <https://unity.com/es>



En este diseño se atienden todas las necesidades y posibilidades que se precisan. Proveen la estructura básica para almacenar toda la información generada susceptible de ser estudiada y a través de la cual se elaboran los informes necesarios para controlar la evolución y comportamiento de los usuarios.

De esta manera, creamos toda una infraestructura que nos ayudará en la elaboración de un sistema que puede evolucionar pudiendo adoptar procesos automatizados, con los resultados que esperamos obtener en el futuro tras analizar los resultados de los usuarios y haciendo uso de las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automatizado. Las pruebas a las que se someterán los datos obtenidos con toda la información adquirida, tras ser sometida a técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automatizado, mejorará el comportamiento del sistema. Será capaz de adaptar los tratamientos de los usuarios de manera automatizada en función de los resultados obtenidos. La estructura de esta base de datos hace que podamos distinguir diferentes usos y perfiles de las tablas, dependiendo de los resultados que almacenan y que posteriormente serán estudiados.

Por un lado, podemos distinguir un conjunto de tablas en la base de datos diseñada que, evidentemente, no entrarían dentro de las seleccionadas para realizar ningún estudio posterior. Estas son aquellas destinadas a la gestión de entidades: clientes, mutuas, residencias, hospitales, centros de rehabilitación, centros de día, o cualquier otro tipo de cliente, que sea sensible de contratar los servicios que se ofertan con el sistema.

Así pues, una vez descartadas las tablas de gestión y organización, nos centramos en las tablas que recogen los datos de los resultados de las diferentes sesiones de los pacientes, en las que podremos vincular sus resultados a las lesiones y patologías previas que motivaron comenzar a usar el sistema y estudiar su evolución en el futuro. Además, como se podrá obtener un histórico de todos los ejercicios realizados, se podrán comparar diferentes estrategias de abordar una misma patología o lesión, ya que es muy probable que distintos profesionales de la salud aborden de diferentes maneras una misma dolencia, decisión que dependerá, por un lado, de las singularidades de cada paciente y, por otro, de la experiencia profesional del especialista.

De esta manera, podremos comparar las distintas evoluciones de los distintos pacientes. Finalmente seremos capaces de proponer la solución más acertada, de manera objetiva y más eficiente, que la que puedan ofrecer los sanitarios con su experiencia. Habremos sido capaces de valorar todos los resultados de los pacientes con todos los ejercicios prescritos por todos los profesionales. Así pues, habremos estudiado qué ejercicios, repeticiones, tiempos de trabajo efectivo, así como descansos y periodicidades, son los óptimos de una manera totalmente objetiva.

A lo largo de este capítulo se ha visto un resumen introductorio de qué es el sistema KineActiv, así como el diseño base para los desarrollos específicos de rehabilitación y de actividad física. Además, se han explorado otras tecnologías existentes, así como el alcance funcional y tecnológico de KineActiv. Se han introducido los conceptos de comunicación del sistema, los ejercicios desarrollados para las diferentes articulaciones, el algoritmo de funcionamiento en la realización de un ejercicio y se ha mostrado una parte de la complejidad y magnitud de la base de datos. El próximo capítulo se profundizará en el sistema de rehabilitación con supervisión automática.

## 4 KineActiv: rehabilitación con supervisión automática

En esta sección se explica en qué se basa la rehabilitación con supervisión automática, así como la comparativa con otros sistemas que intentan hacer algo similar, aunque como se verá, sus capacidades son limitadas con relación a las que ofrece KineActiv. También se explicarán las diferencias entre varios sistemas con los que se va a comparar el sistema de KineActiv, y la importancia del control en tiempo real de la ejecución de los ejercicios por parte del paciente y de los mecanismos a través de los cuales se indican los errores al paciente, para que realice las correcciones pertinentes en sucesivas repeticiones.

Además, se incluirá el concepto de márgenes de tolerancia para el movimiento, lo cual permite la adaptación o personalización del sistema a la condición física de cada paciente. Cada cuerpo es distinto, con estructuras corporales diferentes, con lo que es necesaria, la personalización inicial a todos los pacientes que se van a enfrentar al sistema de rehabilitación para que sea óptima y certera con sus condiciones físicas.

### 4.1 Introducción

KineActiv está destinado a ayudar a los fisioterapeutas en la fase de recuperación de los pacientes con trastorno de las extremidades. Se ha comprobado que el uso de la terapia activa en la recuperación de lesiones físicas es fundamental para una mejor rehabilitación, así como una reducción de tiempos y consolidación de los resultados esperados (Nogal García, 2017). Los pacientes interactúan con una interfaz de usuario gamificada, que implementa un entorno de juego adaptado a cada tipo de ejercicio, ya sean superiores, inferiores, isométricos, excéntricos o concéntricos. Los movimientos de las extremidades del paciente se rastrean, miden y evalúan automáticamente en función de una serie de objetivos establecidos de antemano por el personal médico y de forma personalizada para cada paciente, lo que permite al sistema proporcionar información en tiempo real sobre la corrección del ejercicio. Además, el sistema registra los datos del ejercicio y los pone a disposición del fisioterapeuta a través de una arquitectura cliente-servidor, para que las sesiones futuras se puedan planificar en consecuencia. La Ilustración 21 muestra la arquitectura del sistema.

El rendimiento de Microsoft Kinect como herramienta para evaluar variables cinéticas, en comparación con soluciones más convencionales, es un tema de gran interés (Sapoznik, y otros, 2010). Chang (Chang, Chou, Wang, & Chen, 2013) comparó Kinect con el sistema OptiTrack de alta fidelidad, demostrando que el primero puede lograr un rendimiento competitivo en tareas de seguimiento y medición del movimiento. La robustez de Kinect en el modelado del esqueleto humano en presencia de oclusiones parciales ha impulsado su uso como un sistema de monitoreo de movimiento sin marcadores, siendo una solución de bajo coste en comparación con tecnologías más especializadas basadas en la visión (BTS, Vicon<sup>10</sup>, OptiTrack<sup>11</sup>, etc.). Naeimabadi et al. (Naeimabadi, Dinesen, Andersen, Najafi, & Hansen, 2018).

Evaluaron la precisión y usabilidad de Kinect 1.0, 2.0 y dispositivos *wearables* para la rehabilitación remota de la rodilla, se definió una rutina de ejercicios para medir el ángulo de la rodilla y determinar la precisión. Sus hallazgos mostraron que la segunda generación de Kinect

---

<sup>10</sup> <https://www.vicon.com/>

<sup>11</sup> <https://optitrack.com>

y los sensores portátiles tienen una precisión aceptable, con errores promedio de 2.09 °, 3.11 ° y 4.93 ° para Kinect 2.0, acelerómetros y unidades de medición inercial, respectivamente. Tanaka et al. (Tanaka, Ishikawa, Yamasaki, & Diez, 2019) realizaron un estudio destinado a evaluar la precisión de Kinect en comparación con un sistema de captura de movimiento basado en marcadores. Dichos autores llegaron a la conclusión de que, a pesar de las diferencias con los sistemas basados en marcadores, Kinect podría ser útil para clasificar con precisión los movimientos. Zhou y Hu (Zhou & Hu, 2008) realizaron una revisión de los sistemas de movimiento para la rehabilitación. Se consideraron seis criterios: coste, tamaño, peso, función, operación y automatización. Los sistemas visuales sin marcadores se destacaron debido a sus pequeñas dimensiones, rendimiento robusto y bajo coste.

Otros estudios han demostrado que Kinect es capaz de medir movimientos gruesos, lo que lo hace adecuado para la rehabilitación de accidentes cerebrovasculares, como Napoli et al. (Napoli, Glass, Ward, Tucker, & Obeid, 2017) o para medir los trastornos del movimiento en personas con enfermedad de Parkinson (Rizzo & Kim, 2005) (Betke & Gips, 2002). Varona, J. et al. (Varona, Manresa-Yee, & Perales, 2008) y Zanatta, J. et al. (Zannatha, y otros, 2013) estudian un sistema basado en Kinect con un entorno virtual interactivo que se utilizó con éxito para la rehabilitación de miembros superiores en pacientes con accidente cerebrovascular. Sobre la base de los datos de movimiento y las señales obtenidas de los dispositivos de medición ergonómicos, el sistema supervisa y evalúa el progreso de la rehabilitación. También se ha determinado que el dispositivo Kinect puede rastrear el movimiento del cuerpo con la precisión requerida para las pruebas de equilibrio estándar (Funaya, Shibata, Wada, & Yamanaka, 2013), como la evaluación del equilibrio del pie (Yang, y otros, 2014). La sensibilidad a Kinect también se verificó en Obdrzalek, S. et al. (Obdrzalek, y otros, 2012), donde las posturas de las personas mayores en posiciones de pie y sentadas se estimaron con precisión. Los resultados demostraron ser muy útiles en ejercicios de terapia activa.

La rehabilitación de lesiones cerebrales también se ha abordado a través de la realidad virtual (Wang, Kreutzer, Björnemo, & Davies, 2004). Da Costa y de Carvalho (Da Costa & Carvalho, 2004) o y Edmans mostraron los resultados positivos de un dispositivo de realidad virtual para la rehabilitación cognitiva. El potencial de la realidad virtual en pacientes con accidente cerebrovascular fue investigado por Rand (Rand, Kizony, & Weiss, 2004) y Broëren (Broeren, y otros, 2008). A raíz de estos resultados, Pyk et al. (Pyk, y otros, 2010) presentaron un sistema de terapia basada en realidad virtual para la rehabilitación de brazos y manos en niños. Verificaron que el sistema podría reducir el costo de la terapia, aumentar la motivación del paciente y evaluar objetivamente el progreso realizado. Varios estudios han demostrado que al ofrecer ejercicios de rehabilitación virtuales diseñados como juegos, es posible motivar a los pacientes a realizar ejercicios de rehabilitación, y también aumentar su adherencia al tratamiento, como podemos ver en Lange (Lange, Flynn, Proffitt, Chang, & "Skip" Rizzo, 2010), Flynn, S. (Flynn & Lange, 2010), B. Lozano, J. et al. (Lozano, y otros, 2005).

Ejemplos de integración de Kinect, juegos y realidad virtual para fines de rehabilitación motora de pacientes con lesiones cerebrales se pueden encontrar en Pyk, P. (Pyk, y otros, 2010), Cabrera, R. (Cabrera, Molina, Gómez, & García-Heras, 2017), Jung, I. (Jung, Lee, Kim, & Choi, 2014) Jonsdottir, J. et al. (Jonsdottir, y otros, 2018). Estos sistemas han sido diseñados para simplemente animar a los pacientes a hacer ejercicios, sin mecanismos de control preciso del movimiento. Es decir, están destinados a educar al cerebro para recuperar una función perdida o mitigar la degeneración del movimiento, pero no monitorizan ni miden la precisión de movimientos orientados al logro de un objetivo o meta.

A diferencia de la gran mayoría de los trabajos anteriores, que se centran en la neurorrehabilitación, se propone un sistema basado en un dispositivo Kinect para medir con precisión los parámetros cinemáticos de las extremidades superiores, dentro de un entorno gamificado y aumentado. Existen sistemas comerciales con algunas similitudes con el aquí descrito. Kinovea (Alankus, Lazar, May, & Kelleher, 2010) es un software de biomecánica deportiva, que también se utiliza en rehabilitación física. Es un analizador de vídeo que evalúa, corrige y realiza un seguimiento de los movimientos. Mide tiempos, ángulos, trayectorias, perspectivas y coordenadas. A pesar de ser un software potente, el movimiento debe ser grabado y luego estudiado. Skill Spector (Wollersheim, y otros, 2010) también graba videos primero para realizar análisis posteriores sin conexión. El sistema requiere que el usuario localice manualmente las articulaciones, a partir de lo cual genera un modelo para el análisis. Otro ejemplo basado en Kinect es Diaple (Pastor, Hayes, & Bamberg, 2012), en el que el paciente debe imitar ejercicios grabados en video realizados por fisioterapeutas. Luego, el sistema mide qué tan similares son los movimientos del paciente a los del fisioterapeuta. Esta puntuación de similitud se puede considerar como retroalimentación general, es decir, no se dan señales visuales al paciente para corregir su ejecución personal en tiempo real. Otros sistemas comerciales se basan en sofisticados sistemas multicámara que registran a los pacientes que usan trajes especiales dentro de un escenario controlado. Sin embargo, generalmente son costosos y requieren tareas de calibración, por lo que su uso generalmente se limita a entornos especializados.

## 4.2 Usabilidad

La usabilidad dentro de todo el desarrollo ha sido una de las prioridades fundamentales, ya que la pretensión de desarrollar un sistema que sea aceptado y entendido por un rango de personas totalmente dispar, tanto en género, conocimientos sobre tecnología, edad (entre 16 y 80 años) y gustos, es algo tremendamente ambicioso y complejo. De esta manera se realizaron distintos tipos de pruebas de interfaz, disposición de elementos, colores y mensajes hasta conseguir un sistema lo suficientemente aséptico y sencillo que no produjera rechazo o minimizara la posible barrera de entrada a su uso por algún tipo de usuario.

Se estableció que el uso de los colores debía ser mínimo, como máximo 5, blanco, negro, gris, verde y naranja. Además, se estableció que los mensajes que debían provocar la atención del usuario fueran siempre en naranja, que puede considerarse el color más llamativo del grupo elegido y que los mensajes que indicaran que todo se encuentra dentro de la normalidad, fueran en verde.

Dentro de la sencillez de interfaz, el primer diseño aceptado se muestra en la Ilustración 25, en la que se puede apreciar un simple formulario que vincula la sesión que se va a realizar con el usuario al que le ha sido asignado el conjunto de ejercicios.



Ilustración 25 - Pantalla de Login de usuario del sistema KineActiv.

Siguiendo con la importancia de la usabilidad los mensajes y el resto de las pantallas siguen la misma dinámica, haciendo uso de elementos limpios y ordenados, así como de fuentes que faciliten su lectura, tal y como podemos comprobar en la Ilustración 26.

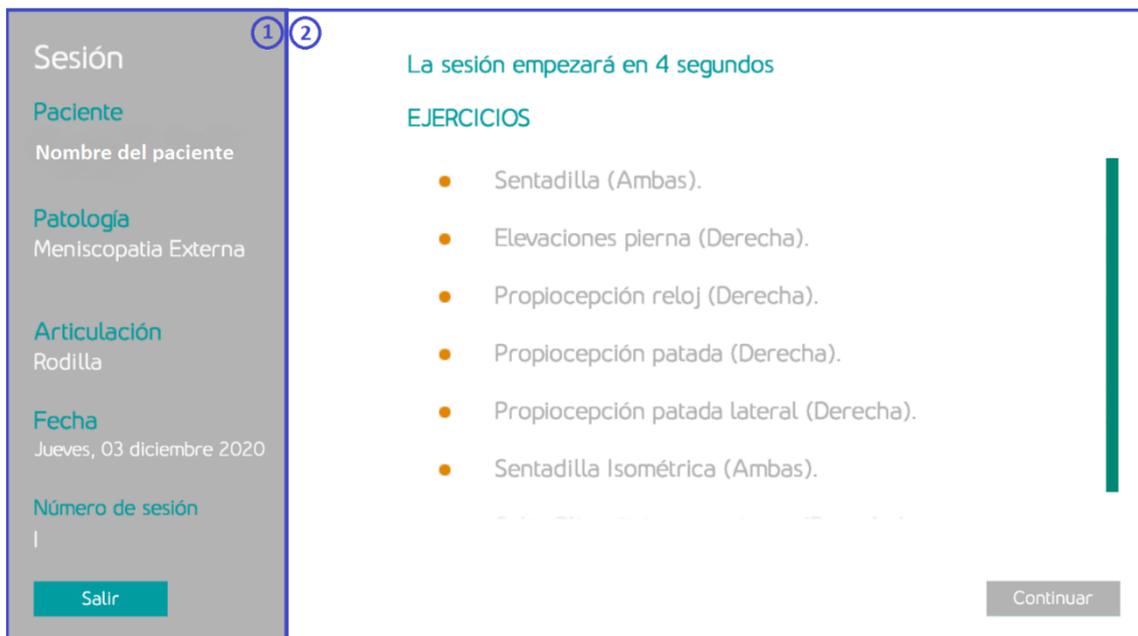


Ilustración 26 - Pantalla de información de ejercicios a realizar.

A continuación, se explican las dos secciones principales de la pantalla, así como la información que muestran.

**1 Información del paciente:** En esta división de la pantalla, se muestra la información relativa al paciente: nombre y apellidos, patología diagnosticada, articulación afectada, la fecha de la sesión y el número de sesión. En la parte inferior, está situado el botón para salir de la aplicación y volver a la pantalla de acceso.

**2 Ejercicios de la sesión:** Muestra la lista de los ejercicios a realizar en la sesión actual. En la parte superior de esta división de la pantalla, podemos ver un contador con el tiempo restante (en segundos) para acceder a la siguiente pantalla automáticamente. Para comenzar de manera inmediata, sin esperar a que finalice el tiempo, el paciente puede pulsar el botón “continuar”.

Esta dinámica de pantallas continúa con la explicación del juego vinculado al ejercicio (Ilustración 27), siguiendo el mismo concepto y creando una visión global del sistema.



Ilustración 27 - Explicación del juego a realizar.

En la parte superior de la pantalla, aparece el contador con el tiempo (en segundos) para comenzar el ejercicio automáticamente. Para comenzar sin esperar ese tiempo, el paciente puede pulsar sobre “continuar” para comenzar la realización del ejercicio inmediatamente.

El sistema, tras agotarse el tiempo o el paciente pulsar sobre “continuar”, llega a una pantalla que no tiene cuenta atrás. En esta pantalla hasta que el usuario no realice un movimiento específico con la mano, no cambiará de pantalla. De esta manera nos aseguramos de que el paciente, decidirá cuándo está preparado para realizar el ejercicio.

En Ilustración 28, se le indica al paciente el número de repeticiones, las series a realizar y cuál es la posición correcta para realizar el ejercicio. Para comenzar, deberá mover la mano en el sentido de la flecha (de derecha a izquierda).



Ilustración 28 - Pantalla previa al inicio del ejercicio.

En la parte inferior derecha está situado el botón “Finalizar ejercicio” para terminar el ejercicio actual. Si al paciente le queda por realizar otro ejercicio, el sistema le mostrará la pantalla de descanso y luego la pantalla del listado de ejercicios (Ilustración 26) de la sesión. En el caso de que no le quedaran ejercicios por realizar, el sistema le llevará a la pantalla de acceso de la Ilustración 25 (si no hay más ejercicios la sesión del día ha terminado).

Tras mover la mano, se le carga al paciente la pantalla donde efectuará el ejercicio mediante el juego indicado. Dependiendo de la lateralidad (hemicuerpo) del ejercicio, se mostrará en la parte derecha o izquierda de la pantalla: el número de repeticiones (realizadas/totales), las series (realizadas/totales), cuál es la posición correcta para realizar el ejercicio y las instrucciones a seguir. En el resto de la pantalla, se visualizan los elementos de la gamificación, el paciente por medio de la Kinect y la interacción del paciente con estos elementos.

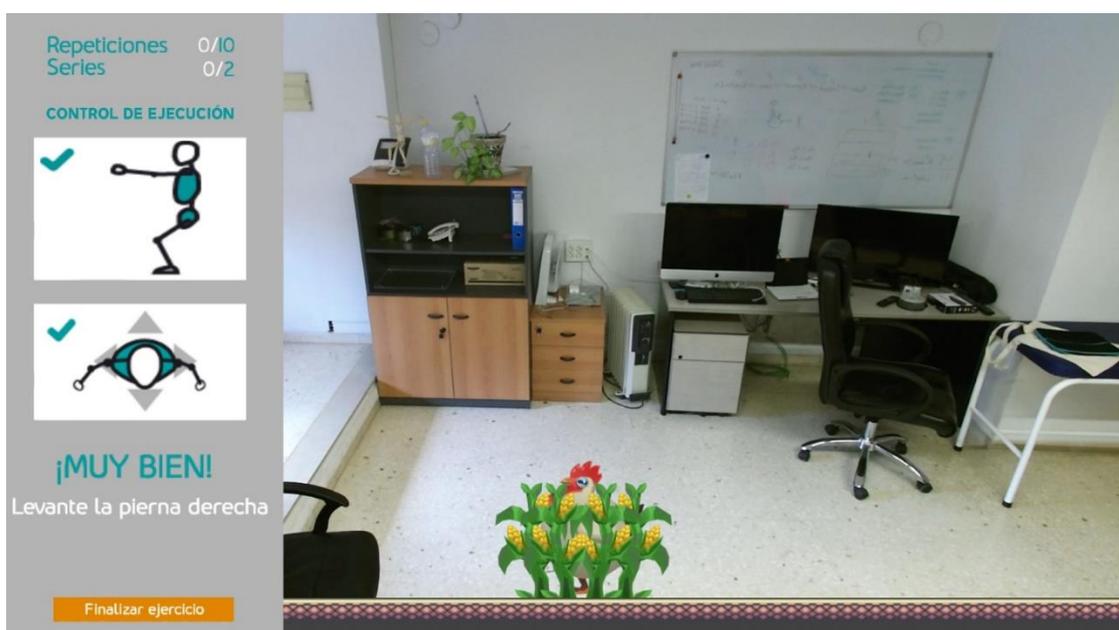


Ilustración 29 - Pantalla donde se realizan los juegos.

En la parte inferior izquierda, está situado el botón “Finalizar ejercicio” para salir del ejercicio. Al pulsar este botón, aparece una ventana emergente que pide confirmación para abandonar el ejercicio, como se muestra en la Ilustración 30.

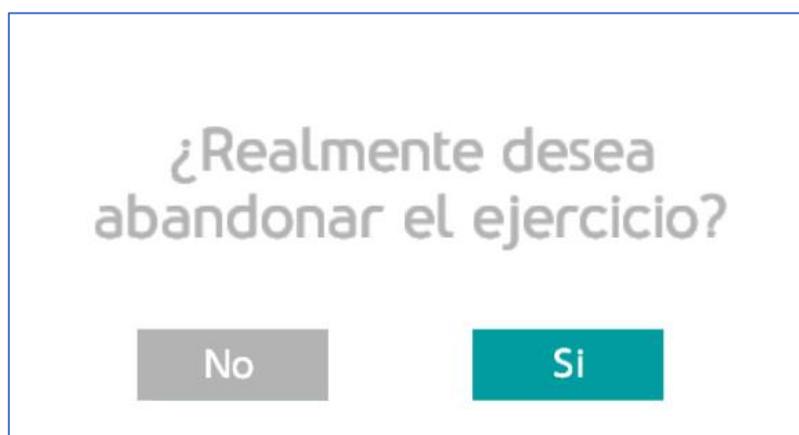


Ilustración 30 - Pantalla abandonar ejercicio.

Al pulsar sobre el botón “No” se vuelve al juego. Si se pulsa el botón “Sí” se muestra en pantalla el porcentaje del ejercicio completado (Ilustración 31) y sale del ejercicio.

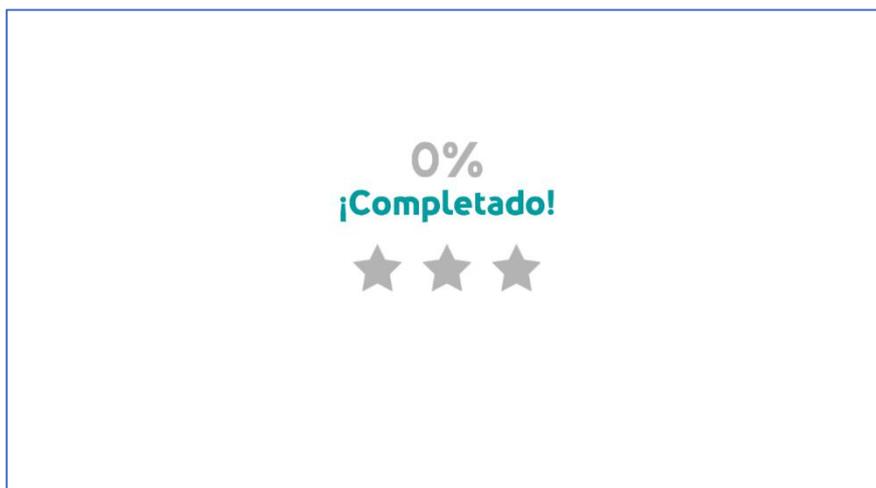


Ilustración 31 - Resultado de la ejecución.

### 4.3 Control y evaluación del movimiento – diseño

El flujo de trabajo operativo de KineActiv se puede describir de la siguiente manera:

1. **Calibración.** El sistema captura los datos biométricos del paciente y adapta los ejercicios a cada paciente.
2. **Ejecución y control.** Dependiendo del ejercicio prescrito, el sistema presenta un entorno de juego personalizado para el paciente, donde los objetivos se representan a través de elementos visuales generados por computadora. Se anima al paciente a realizar el ejercicio correspondiente. El sistema comprueba si la ejecución cumple con el objetivo, de acuerdo con márgenes de tolerancia configurables. El sistema proporciona retroalimentación visual en tiempo real al paciente, indicando hasta qué punto se alcanza el objetivo. Cuando el paciente no realiza el ejercicio de manera correcta, el sistema notifica al paciente y permite que el paciente continúe la serie de ejercicios.
3. **Registro de datos.** Cuando finaliza la ejecución de un ejercicio, todas las series de resultados se almacenan en una base de datos ubicada en un servidor.
4. **Análisis y programación de ejercicios.** Los profesionales sanitarios pueden acceder a sus áreas web privadas, donde estadísticas y recursos gráficos proporcionan detalles sobre la ejecución de los ejercicios, haciendo hincapié en el grado de cumplimiento del objetivo o meta en cada caso. Después de juzgar los resultados, el profesional sanitario puede programar nuevas sesiones reajustando objetivos si fuese necesario.

El conjunto de los puntos descritos aquí, son la base del sistema que se amplía con otras funciones que se describen a continuación.

#### Adquisición

La etapa de adquisición consiste en entornos de usuario gamificados desarrollados en el motor de juego Unity, que integran los servicios proporcionados por el KINECT SDK 1.8 a través del paquete Unity Kinect con MS-SDK. Dado que el objetivo de este trabajo es tratar las lesiones de hombro, solo se obtienen y rastrean en tiempo real las coordenadas 3D del hombro, el codo y la muñeca (articulaciones de interés). Estas coordenadas son datos de alta precisión calculados 30 veces por segundo, por lo que las ubicaciones conjuntas actualizadas están disponibles siempre que se requieran.

Antes de comenzar cualquier ejercicio, el sistema comprueba si el paciente está correctamente posicionado y en postura erguida. Se espera a que el paciente esté a una distancia de 2 a 4 m del sensor Kinect, de pie en una posición de la escena determinada como óptima por el sistema considerando el brazo lesionado. Aunque el dispositivo Kinect puede funcionar de forma fiable de 0,4 a 8,5 m, es bien sabido que el rango de distancia de trabajo óptimo es de 1,4 a 4,5 m (Wang, Walsh, & Verma, 2017).

El sistema es capaz de detectar posiciones y posturas corporales incorrectas, y de indicar en qué dirección debe moverse el paciente para cumplir con los requisitos de adquisición. Estas instrucciones se transmiten a través de elementos visuales ubicados en un panel colocado a la derecha o a la izquierda de la escena principal, dependiendo del brazo que requiera rehabilitación. La Ilustración 32 muestra ejemplos de diferentes instrucciones visuales para corregir la posición del paciente (Ilustración 32 a, vista cenital) y la postura corporal Ilustración 32 b. Solo cuando se cumplen todos los requisitos, el sistema permite iniciar el ejercicio. Una vista completa de la interfaz de adquisición, incluidos estos controles, se puede encontrar en la Ilustración 33.

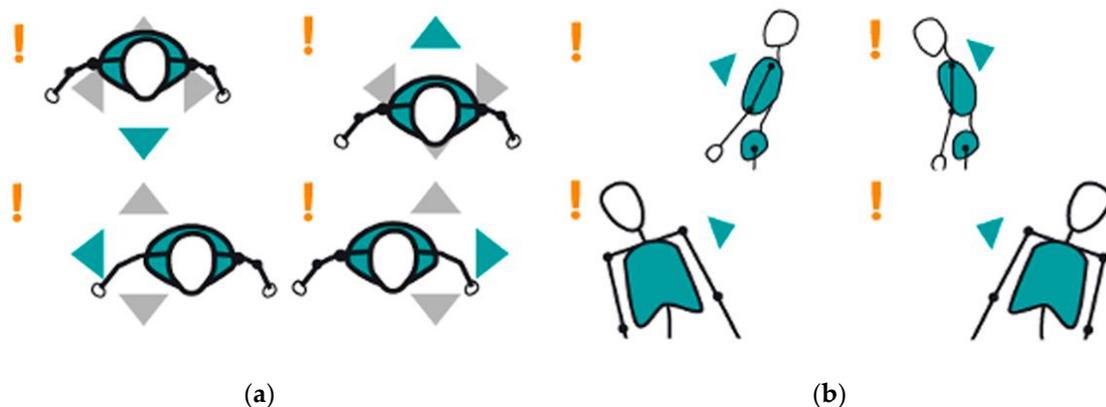


Ilustración 32 - El sistema indica al paciente cómo corregir la posición en la escena (a) y la postura corporal (b).

### Entornos de usuario gamificados

Este estudio se centra en dos tipos de ejercicios: concéntricos e isométricos. El primero consiste en elevar repetidamente el brazo hasta alcanzar un ángulo objetivo, tal y como establece el fisioterapeuta. En el segundo tipo, el brazo se levanta hasta alcanzar un ángulo objetivo, y mantiene esa posición durante un cierto período de tiempo determinado por el especialista. En ambos casos, los objetivos son personalizados, dependiendo de las circunstancias de cada paciente.

Para animar a los pacientes a alcanzar sus objetivos, se han diseñado e implementado entornos gamificados específicos para cada tipo de ejercicio.

La ejecución de los ejercicios concéntricos forma parte de un juego en el que un alienígena generado por ordenador, ubicado en el lugar exacto al que el paciente debe levantar el brazo (meta), está dispuesto a destruir una ciudad si el paciente no logra alcanzar los objetivos establecidos. La Ilustración 33 ilustra este entorno. La ciudad está representada por un horizonte en el borde inferior de la imagen, evitando así afectar la escena del mundo real. El alienígena está diseñado para seguir al paciente en caso de que el paciente se mueva durante la ejecución del ejercicio, de modo que siempre mantenga la posición objetivo.

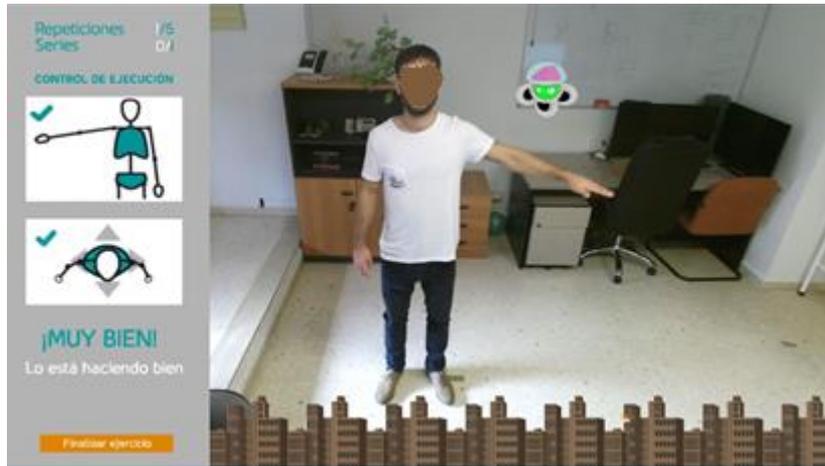


Ilustración 33 - Ambiente gamificado diseñado para fomentar ejercicios concéntricos.

En este *exergame*<sup>12</sup> se pueden identificar dos escenarios principales:

- **Positivo.** El paciente realiza una correcta ejecución del ejercicio, llegando al alienígena, destruyéndolo y manteniendo la ciudad a salvo. Una vez que el paciente baja el brazo, se genera otro alienígena en la misma posición objetivo.
- **Negativo.** El paciente realiza el ejercicio incorrectamente y no alcanza la posición objetivo. Entonces, el alienígena ataca la ciudad con bolas de fuego.

El sistema registra cuántas repeticiones exitosas y cuántos fallos se han realizado en cada serie, y almacena la información en la base de datos en la nube.

El ejercicio isométrico aprovecha un juego muy diferente al anterior. Consiste en un pájaro volando sobre la mano del paciente y una jaula vacía ubicada en la posición exacta (grado objetivo) donde el paciente debe mantener su mano durante un cierto período de tiempo (meta). Se espera que el paciente lleve al ave de vuelta a la jaula. Este juego también se puede resumir en dos escenarios:

- **Positivo.** El paciente realiza una correcta ejecución del ejercicio, llegando a la jaula y manteniendo al ave en la jaula durante el período de tiempo prescrito de forma continua, por lo que el ave se posa y descansa.
- **Negativo.** El paciente realiza el ejercicio incorrectamente, sin poder mantener al ave en la jaula durante el período de tiempo prescrito de forma continua, por lo que el ave continúa volando.

<sup>12</sup> Se usa el anglicismo *exergame* al no encontrar una traducción simple y aclaratoria en español. Su aproximación más fiel, sería videojuego activo.

El sistema registra qué fracción del tiempo esperado el paciente pudo mantener al ave en la jaula en cada repetición, y almacena esta información en la base de datos en la nube.

La idoneidad de los exergames para la rehabilitación se ha estudiado considerando factores como facilitadores y barreras (Nguyen, y otros, 2019), donde se identificaron como los principales facilitadores a nivel tecnológico la "facilidad de uso percibida de los exergames" y la "posibilidad de proporcionar terapia adicional". En el caso de KineActiv, la facilidad de uso percibida ha sido verificada por el estudio de usabilidad descrito en la Sección 4.2, mientras que se puede lograr una terapia adicional ya que el personal médico puede controlar el rendimiento de los pacientes y adaptar los ejercicios prescritos sobre la marcha. Con respecto a las barreras, (Nguyen, y otros, 2019) identificó la baja precisión en la captura de movimiento como el principal factor desalentador. Sin embargo, como se explica en la Sección 4.3, la precisión y fiabilidad de KineActiv a la hora de medir los movimientos de los pacientes también se ha establecido claramente. Resumiendo, este trabajo aborda con éxito los facilitadores típicos y las barreras de los exergames con fines de rehabilitación.

### **Seguimiento y medición**

La etapa de seguimiento y medición se puede dividir en las siguientes tareas:

1. Calibración basada en el paciente.
2. Configuración del margen de tolerancia.
3. Seguimiento conjunto de la articulación.
4. Manejo de la oclusión.

#### **4.4 Calibración de los pacientes**

Dado un paciente, el primer paso está destinado a capturar sus datos biométricos, de modo que los límites asociados a los ejercicios prescritos puedan determinarse de manera confiable. Asegura que el paciente realice los ejercicios dentro de un entorno personalizado.

Una vez que el paciente está bien posicionado y erguido, las coordenadas 3D del hombro, el codo y la muñeca se utilizan para calcular la longitud del brazo (distancia desde el hombro hasta la muñeca). Se define entonces un vector euclídeo tomando la coordenada del hombro como punto inicial, la longitud del brazo como su magnitud, y utilizando el tipo de acción (abducción, flexión) y el ángulo establecido por el fisioterapeuta para definir la dirección del vector. El punto final de este vector determina la posición objetivo personalizada del ejercicio, donde se generarán los elementos gamificados.

#### **4.5 Márgenes de tolerancia**

Los márgenes de tolerancia definen una región 3D personalizada para cada paciente y ejercicio, fuera de la cual cualquier movimiento se considera una ejecución incorrecta. También se considera un paso de calibración, porque los márgenes dependen de la condición del paciente.

En este trabajo se han considerado dos tipos de movimientos: abducción y flexión. Los usuarios comienzan de pie, con los brazos paralelos al tronco. En la abducción, el brazo de interés se eleva directamente en el "plano del tronco" para alcanzar el ángulo objetivo. La flexión es similar, excepto que el brazo se eleva hacia el frente, en un plano perpendicular al del tronco.

En ambas acciones, la posición objetivo de la mano al final del movimiento se modela mediante un elemento gamificado. La Ilustración 34 ilustra los márgenes de tolerancia establecidos para la abducción y la flexión (vista cenital).

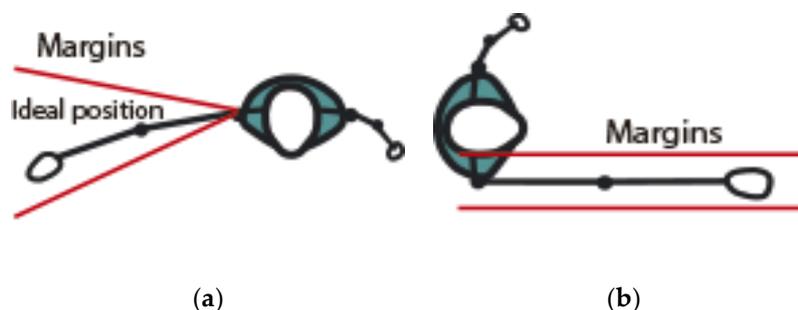


Ilustración 34 - Márgenes de tolerancia para la abducción (a) y la flexión (b).

En los ejercicios de abducción, se definen dos márgenes de tolerancia (delantero y trasero) a partir de dos planos no paralelos cuya intersección está determinada por las coordenadas del hombro Ilustración 34 a. Esta geometría abierta admite ejercicios de abducción de pacientes con un amplio espectro de condiciones físicas. En flexión, el fisioterapeuta establece dos márgenes paralelos de tolerancia, que son, a su vez, perpendiculares al plano del tronco Ilustración 34 b. En cada caso, los dos márgenes delimitan una región 3D válida, que no puede ser superada por ninguna articulación en ningún momento. Cuando una articulación rompe un margen, el sistema interpreta el error e informa al paciente cómo corregir el ejercicio. Por ejemplo, si el sistema detecta un codo fuera de los márgenes (el paciente está doblando el brazo), el sistema le pide al paciente que extienda completamente el brazo. Para los registros de sesión, la repetición se interrumpe y se anota el ángulo alcanzado en el momento de la interrupción. Estos márgenes permanecen determinados por la posición del paciente, por lo que si el paciente se mueve (dentro de límites aceptables), los márgenes se actualizan de acuerdo con las nuevas coordenadas articulares.

#### 4.6 Evaluación del movimiento

Kinect proporciona coordenadas de articulación de alta precisión 30 veces por segundo. La precisión de cada valor de coordenada se representa con más de 20 decimales; el mero hecho de respirar hace que las posiciones de las articulaciones cambien. Afortunadamente, una precisión tan alta no es necesaria en absoluto para monitorear los ejercicios de rehabilitación, por lo que se adoptó una precisión más baja de tres decimales después de demostrar que era suficiente para detectar cambios significativos. De esta manera, se redujo la complejidad de los datos y el software sin perder efectividad.

#### Manejo de la oclusión

Los ejercicios de abducción son muy fáciles de monitorear, porque todas las articulaciones del brazo permanecen visibles durante todo el tiempo de ejecución. Por el contrario, la flexión puede implicar la oclusión articular o la pérdida de seguimiento para un pequeño rango de ángulos, donde las articulaciones están alineadas con el sensor. En estos casos, Kinect proporciona estimaciones de las posiciones de las articulaciones ocluidas. En el momento en que la articulación vuelve a ser visible podemos actualizar su posición. Lidar con esta situación

es simple y efectivo. Si las posiciones reales de la articulación ocluida justo antes y después de la oclusión fueron correctas, entonces se puede suponer razonablemente que la articulación mantuvo posiciones válidas mientras estaba ocluida. De lo contrario, en caso de que la articulación hubiera sido visible, el sensor la habría detectado nuevamente, y su posición real se habría evaluado con respecto a los márgenes de tolerancia.

A modo de resumen del capítulo, se ha explicado en qué se basa la rehabilitación con supervisión automática, así como la comparativa con otros sistemas que intentan hacer algo similar, mostrando las diferencias que existen con relación a KineActiv. Además, se han visto las diferencias entre varios sistemas con los que se compara el sistema de KineActiv, y la importancia del control en tiempo real de la ejecución de los ejercicios por parte del paciente y de los mecanismos a través de los cuales se indican los errores al paciente. Dentro de la usabilidad, se han mostrado los diferentes diseños de la interfaz, así como la interacción con el paciente.

Finalmente, se ha introducido el concepto de márgenes de tolerancia para el movimiento, su evaluación y cómo se manejan las posibles oclusiones que se pueden generar en la ejecución del ejercicio.

## 5 KineActiv: adaptación al envejecimiento activo

En este capítulo de la tesis se presenta una variación del proyecto original, KineActiv. En este caso se cambia de enfoque para centrarse en las personas mayores, mediante la integración de estrategias interactivas sensibles a la edad en un entorno de realidad aumentada para facilitar la realización de actividades físicas en un entorno doméstico. Las principales diferencias entre el nuevo sistema y KineActiv se resumen a continuación:

- El objetivo del nuevo sistema es ayudar a las personas mayores y prevenir o mitigar el estado de fragilidad de los ancianos, mientras que el objetivo de KineActiv es la rehabilitación de una lesión articular principalmente en adultos jóvenes. Según (Clegg, Young, Iliffe, Rikkert, & Rockwood, 2013), la fragilidad es el resultado del deterioro acumulado de múltiples sistemas fisiológicos a lo largo de la vida. La propuesta incluye métodos para controlar el movimiento, evaluar los logros, modalidades de interacción adaptadas, etc.
- Los mecanismos de control de movimiento en el nuevo sistema (p. ej. métodos de estimación de la posición de articulaciones, márgenes de tolerancia, niveles de logro, etc.) se han adaptado para facilitar la realización de ejercicios físicos a las personas mayores. El ejercicio físico en la vejez reduce la pérdida de fuerza y masa musculares, que son síntomas relevantes de fragilidad (Clegg, Young, Iliffe, Rikkert, & Rockwood, 2013). El control en KineActiv es estricto, ya que el objetivo es recuperar el rango completo de movimiento de una articulación lesionada y eso únicamente es posible si se realizan los movimientos con la precisión necesaria para ello. Además, KineActiv implementa elementos para motivar, supervisar y evaluar en tiempo real la realización de ejercicios físicos.
- El nuevo sistema reduce significativamente la necesidad de interacción explícita del usuario a través de técnicas de interacción más naturales e intuitivas, como el reconocimiento de gestos y los intervalos de tiempo personalizables de transición entre pantallas. Su objetivo es simplificar el uso de formas convencionales de interacción con el sistema por parte de usuarios mayores con escasas habilidades tecnológicas. Los modos de interacción avanzada no están disponibles en KineActiv.
- En el nuevo sistema se han implementado nuevas características de realidad aumentada, gamificación y políticas de recompensas, con el fin de fortalecer la motivación y la experiencia del usuario. En particular, el nuevo sistema implementa 34 entornos gamificados basados en realidad aumentada, que es una cantidad mucho mayor que los 15 entornos desarrollados en KineActiv.
- El nuevo sistema implementa 52 ejercicios físicos divididos en 29 y 23 correspondientes a las articulaciones de hombro (miembros superiores) y rodilla (miembros inferiores), respectivamente, en todos los casos adaptados a la movilidad reducida de las personas mayores. Esta cantidad es muy superior a las 19 rutinas implementadas en KineActiv, todas ellas relacionadas con el hombro (miembros superiores).

Hasta donde sabemos, como se muestra en la Tabla 3, ningún otro trabajo ha reportado una herramienta asistida a domicilio que sea capaz de realizar automáticamente un control fino

y medición del movimiento de las extremidades en personas mayores, mientras realizan ejercicios físicos guiados prescritos por un especialista. Aunque el sistema tiene la capacidad de reemplazar el papel de supervisión de un ser humano en entornos domésticos, se puede realizar un control remoto del progreso de cada usuario y su adherencia a las rutinas prescritas desde una aplicación web. Esta retroalimentación continua permite que las rutinas se puedan ajustar dinámicamente a cada usuario. Los beneficios esperados para las personas mayores a medio y largo plazo son múltiples: la mejora objetiva de las capacidades de salud debe favorecer una mayor autonomía, menores riesgos de caídas, así como sentimientos positivos como la alegría, el entusiasmo y la autoestima.

Además del alcance funcional descrito, hasta donde sabemos, ningún trabajo previo ha llevado a cabo experimentos destinados a mostrar tanto la aceptación como la eficacia de una herramienta en un número representativo de usuarios mayores con distribuciones equilibradas entre géneros y rangos de edad. En este ámbito, se diseñaron experimentos sistemáticos basados en mediciones de actividades físicas y respuestas de encuestas de usabilidad para establecer estadísticamente el grado en que se cumplen estas expectativas. Se reclutó un total de 57 participantes, de los cuales 29 eran hombres y 28 mujeres de entre 65 y 80 años. Los resultados respaldados por dos pruebas de significación estadística no paramétricas demostraron que, a pesar de sus limitaciones funcionales relacionadas con la edad, las personas mayores se adaptan positivamente al uso de herramientas multimedia de asistencia centradas en terapia activa si experimentan beneficios claros.

A modo de resumen, las principales contribuciones de este capítulo, junto con aquel en el que se mostrarán los experimentos y resultados asociados, se pueden sintetizar de la siguiente manera:

- Un sistema basado en Kinect diseñado para ayudar a los adultos mayores a incorporar la actividad física en las rutinas diarias a través de entornos de realidad aumentada, gamificación, interfaces de usuario basadas en gestos y otras modalidades de interacción adaptadas al deterioro funcional relacionado con la edad.
- Experimentos dirigidos a evaluar tanto la efectividad como la sensibilidad del sistema para medir el rendimiento físico de las personas mayores al realizar ejercicios prescritos.
- Los resultados de las encuestas de usabilidad sugieren una aceptación progresiva de las herramientas tecnológicas por parte de las personas mayores que les aportan beneficios tangibles a su salud.

El resto del capítulo está organizado de la siguiente manera. La siguiente sección presenta los fundamentos técnicos y metodológicos que subyacen en el sistema, enfocados a la mejora de la usabilidad del público objetivo que va a hacer un uso intenso del proyecto desarrollado. Posteriormente se va a presentar la configuración experimental diseñada para validar la robustez del sistema, que se basa en una encuesta de usabilidad, una serie de rutinas de ejercicio físico y dos pruebas de significación estadística.

## 5.1 Introducción

En los últimos años, con el aumento de la esperanza de vida y el auge de la telemedicina se está observando la necesidad de diseñar estrategias que retrasen la fragilidad e impacten de forma positiva en la salud física y cognitiva de nuestros mayores.

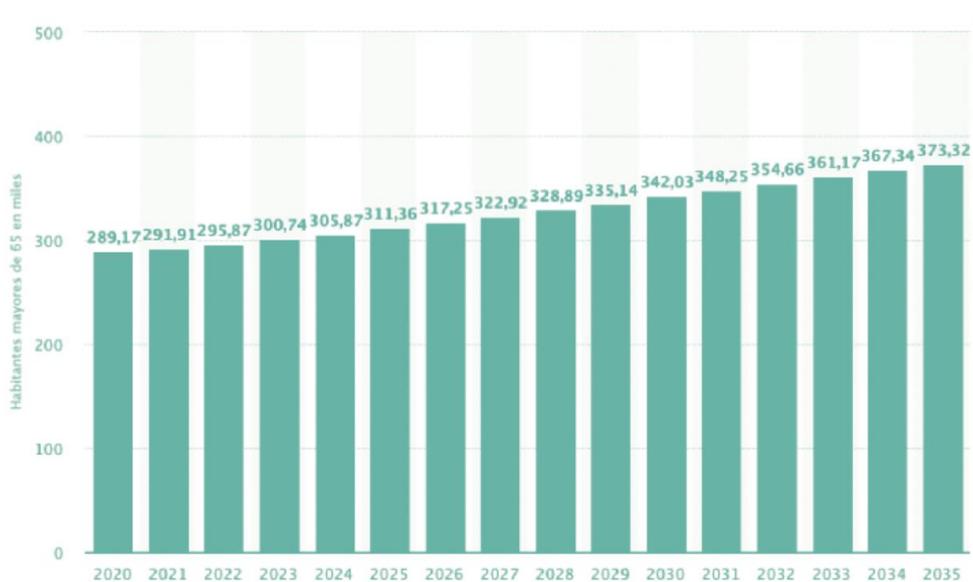
Hoy en día, para aumentar la calidad de vida de los ancianos, se sigue recurriendo a terapias presenciales y a las mismas escalas de valoración de la fragilidad de personas de edad avanzada que llevan vigentes décadas, por lo que creemos que una solución como KineActiv viene a cubrir necesidades crecientes en segmentos ligados con la salud como residencias, centros sociales y centros de día de nuestros mayores.

Creemos que es necesario que las instituciones velen por la equidad en el acceso al sistema sanitario, tal y como dice la Ley General de Sanidad (BOE, s.f.) y que, por lo tanto, apoyen estrategias que mejoren la calidad de vida y luchen contra la fragilidad asociada al envejecimiento.

***“La protección del Derecho a la Salud tiene una cobertura universal y además se tiene que desarrollar siguiendo el principio de equidad en el acceso al sistema y en las prestaciones”  
Ley General de Sanidad (1986)***

La población española se enfrenta actualmente a dos grandes retos que se ven acentuados en la Región de Aragón: el envejecimiento demográfico y la despoblación.

El envejecimiento demográfico es el aumento o modificación de la estructura poblacional por edad, traducido en el aumento de la proporción de grupos de edad avanzada frente a la disminución de los grupos de edad más joven. La población española, con una esperanza de vida de 83,2 años, tiene actualmente 9 millones de personas por encima de los 65 años. Aragón es una de las comunidades con mayor porcentaje de personas mayores de 65 años, con alrededor de un 21 % de la población, unas 292.000 personas.



Previsión de la población mayor de 65 años residente en la Comunidad de Aragón (2020-2035)

*Ilustración 35 - Gráfico de barras evolución de población (Statista, s.f.).*

Por ello, en una región con una población muy condicionada por la despoblación y el envejecimiento poblacional, es necesario garantizar los derechos y servicios públicos a todas las personas con independencia de su lugar de residencia y su condición física, y creemos que es capital desarrollar proyectos que mejoren el acceso a la sanidad y retrasen la fragilidad y la dependencia, y que eviten la saturación de los sistemas sanitarios de los que disponemos actualmente.

Ligado íntimamente con el envejecimiento demográfico nos encontramos con la fragilidad, un concepto hasta ahora denostado, pero que con el envejecimiento poblacional debe cobrar cada vez más importancia.

La fragilidad es un síndrome clínico que se caracteriza por la extrema vulnerabilidad y que expone al individuo a un mayor riesgo de resultados negativos relacionados con la salud. La fragilidad necesita ser evaluada y manejada adecuadamente porque es importante reconocerla como una condición distinta independiente del envejecimiento, de las enfermedades crónicas y de la discapacidad (Araya, 2018).

### Proyección de Población 2020-2035

Datos: INE. Variación % de la población entre 2020 y 2035

Variación %  -17 0 10

Q ter

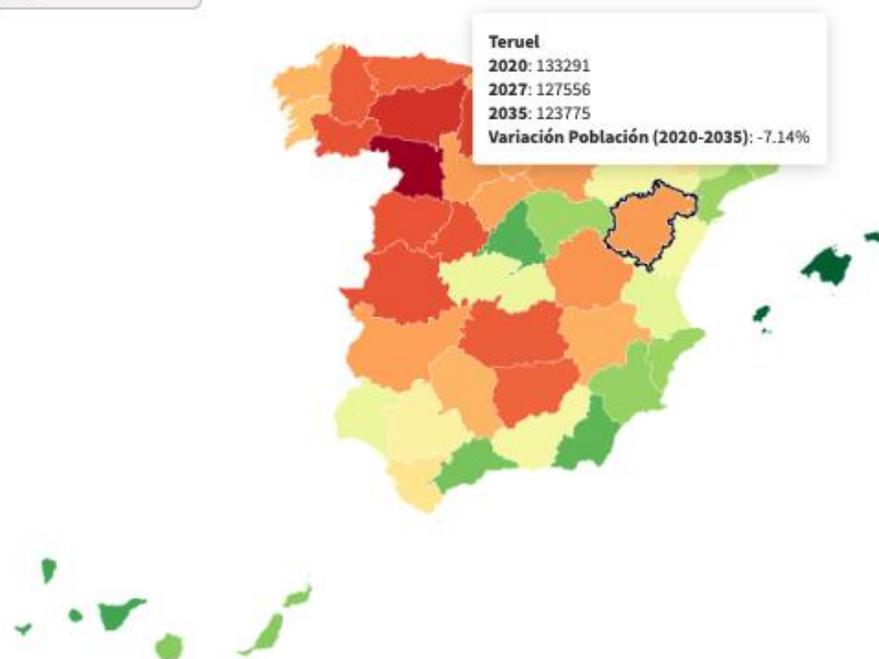


Ilustración 36 - Mapa de población (Estadística, s.f.).

Varias razones hacen de la fragilidad un tema importante para la salud pública.

1. La fragilidad es una condición frecuente y es la más común que conduce a la muerte.
2. El proceso de fragilidad se puede prevenir y tratar particularmente si la intervención se produce temprano.
3. A pesar de su prevalencia, la fragilidad no suele reconocerse como un síndrome clínico o diagnóstico, y cuando se reconoce no se registra con frecuencia en las historias clínicas.

Por otro lado, encontramos la despoblación, fenómeno demográfico y territorial consistente en la disminución de los habitantes de un territorio en comparación a un periodo previo. Actualmente se estima que en España 3 de cada 4 municipios han perdido población en la última década, y que en Aragón la media poblacional es de tan sólo 28 habitantes por km<sup>2</sup>.

Estos dos problemas coexisten con un sistema sanitario estresado y con el presupuesto disparado, donde en regiones como Aragón actualmente existe un gasto sanitario per cápita de 1550 euros (Sanidad, s.f.).

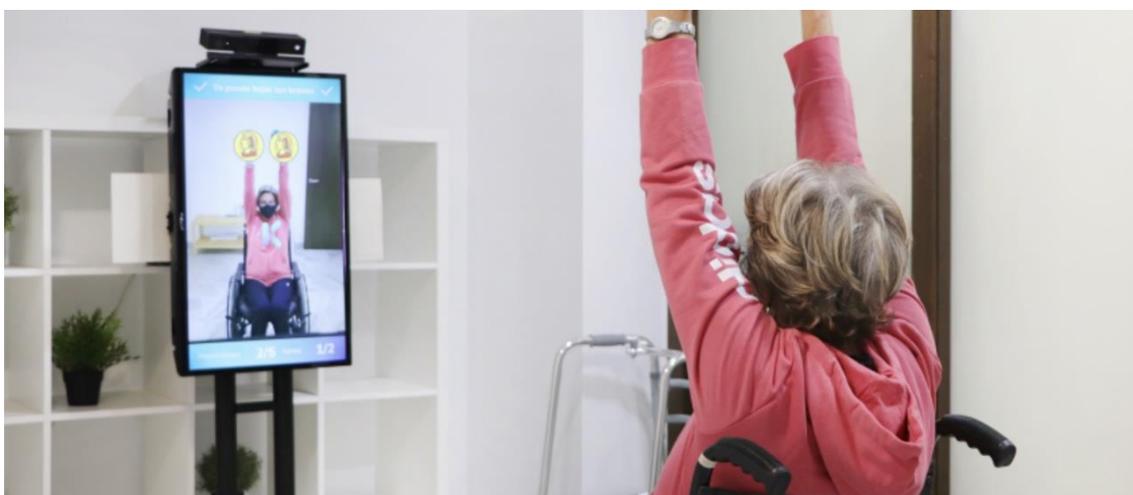
En particular, según datos del INE (Estadística, s.f.), y la página de la web del gobierno de Aragón, la región de Teruel tiene los siguientes datos:

1. El 24,14 % de la población turolense tiene más de 65 años.
2. Del total de personas nacidas en Teruel, menos del 50 % vive en su ciudad de nacimiento. Algo más de un 15 % emigró a Zaragoza, un 11,7 % a Barcelona, casi un 8,5 % a Valencia, y un 15 % a otras provincias.
3. La región tiene una de las densidades de población más bajas del país con tan sólo 9,01 hab/km<sup>2</sup>.
4. Teruel es la capital provincial menos poblada del país con tan sólo 36.240 habitantes.
5. Teruel tiene un total de 26 centros de salud y 270 consultorios locales, con heterogeneidad de equipamiento y de personal sanitario.

Esto hace que el sistema sanitario de la región se encuentre con mayores desafíos que otras regiones para garantizar la equidad en el acceso a la salud de todos los pacientes.

Con KineActiv se pretende mejorar la salud física y psicológica de nuestros mayores a través del ejercicio guiado, la monitorización de las constantes vitales y del establecimiento de canales de comunicación ágiles y flexibles entre médicos y pacientes. Con esto podría mejorarse el acceso a la salud en regiones con población dispersa, y reducirse el gasto sanitario por paciente, al disminuir la fragilidad y la dependencia de las personas mayores.

El objetivo, por tanto, es el desarrollo de una tecnología amigable que rompa con barreras tecnológicas y esté enfocada en la terapia activa y las personas mayores. Con nuestra solución buscamos fomentar el ejercicio físico y acercar al profesional sanitario a todas las áreas de despoblación, que de otra forma se encontrarían desatendidas. Con esto, pretende reducir la necesidad del paciente de desplazarse a la consulta presencial.



*Ilustración 37 - Persona de la tercera edad realizando un ejercicio de KineActiv.*

KineActiv es una herramienta que, a través de un software de desarrollo propio, una cámara 3D que analiza los movimientos realizados por el paciente y unos *wearables* que miden las constantes vitales de referencia, monitoriza, interactúa con el paciente, prescribe y guía al paciente durante la realización de ejercicios previamente pautados por su especialista. A través del software, nos aseguramos de que los ejercicios se realicen de forma correcta y de que el personal sanitario disponga en todo momento de la evolución de dicho paciente y de sus constantes vitales.

Por lo tanto, este proyecto tiene la capacidad de acercar la medicina y la terapia física al medio rural y capacita a los profesionales sanitarios a desarrollar estrategias de tratamiento personalizadas. Esto además permitirá saber con datos objetivos cuáles son los mejores tratamientos para luchar contra la fragilidad y el envejecimiento prematuro haciendo que podamos envejecer con salud, sumando vida a los años.

Según el CSIC, en 2020 en España había un total de 384.251 plazas residenciales, de las cuales más del 73 % se encontraban en residencias privadas, por lo que es una realidad que una gran parte de nuestros mayores precisa de una atención personalizada que actualmente no pueden tener en su domicilio particular. Esto dependerá del estado de salud del paciente y de sus necesidades específicas.

## 5.2 Estado del arte

En un trabajo reciente (Bacha, y otros, 2018) orientado a mejorar el control postural, la marcha, la aptitud cardiorrespiratoria y la cognición en los ancianos se realizó una comparación entre los juegos de Kinect Adventures y la fisioterapia convencional. También se analizaron otras áreas como la aceptabilidad y la adherencia al tratamiento. Se llevaron a cabo experimentos con 23 participantes mayores en cada grupo, cuyas capacidades se midieron a través de técnicas convencionales antes y después del tratamiento. Los resultados de las pruebas estadísticas encontraron beneficios después de ambos tipos de intervención en prácticamente todas las áreas, pero no hubo diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Otro estudio sobre el potencial del *exergaming* basado en Kinect, en comparación con los ejercicios tradicionales, para mejorar el estado de fragilidad y el rendimiento físico en los ancianos prefrágiles y frágiles se presenta en (Liao, Chen, & Wang, 2019). Los experimentos involucraron a 52 personas mayores en dos grupos, que recibieron entrenamiento aeróbico, de resistencia y de equilibrio a través de ejercicios de base Kinect y ejercicios combinados, respectivamente. Después de 36 sesiones durante 12 semanas, las mejoras en la condición física en el grupo que usó Kinect fueron mayores o iguales a las del grupo entrenado por métodos convencionales. En estos dos trabajos, Kinect se utilizó como una herramienta motivacional externa, sin ningún sistema para supervisar y controlar la corrección en la ejecución de los ejercicios prescritos, o para medir los logros físicos.

La fiabilidad de las mediciones basadas en Kinect en tareas de distancia de alcance en los distintos ejes y el cálculo de velocidad y su precisión se exploró en (Hsiao, y otros, 2018). Los experimentos se realizaron en 442 participantes mayores con una edad media de 73,3 años. Los resultados mostraron buenas correlaciones entre los resultados basados en Kinect y las mediciones obtenidas por técnicas tradicionales, lo que muestra que Kinect proporciona mediciones confiables y sensibles a la edad: el rendimiento físico fue significativamente menor en individuos mayores de 75 años. En este trabajo se utilizaron los flujos de datos proporcionados por Kinect para calcular las medidas de rendimiento físico en tareas relacionadas con la marcha y el equilibrio. Sin embargo, el software desarrollado carecía de entornos de usuario inmersivos con fines motivacionales.

La idoneidad del uso del gesto con la mano para proporcionar servicios de atención médica de asistencia domiciliar para pacientes de edad avanzada se investigó en (Oudah, Al-Naji, & Chahl, 2020). Se implementó un sistema en tiempo real basado en Kinect para el reconocimiento de gestos con las manos. Instalado frente al paciente anciano, el sistema reconoce los gestos de las manos y envía las solicitudes asociadas a los servicios de atención. Los experimentos mostraron resultados prometedores en el uso de señales a través de gestos como un medio de comunicación confiable y cómodo para pacientes mayores que no pueden transmitir sus necesidades o sentimientos a través de palabras.

Un estudio reciente (Guoqing, Kun, Hao, & Jingwei, 2020) introduce un sistema basado en Kinect para calcular el ángulo de desplazamiento del centro de gravedad de 80 personas mayores durante sesiones de marcha, con el propósito de estimar objetivamente la probabilidad de riesgo de caída en los ancianos. El riesgo de caída es también objeto de estudio de (Ono, Eguchi, & Takahashi, 2020). Se propone un método de medición de la marcha para evaluar la función motora en conocidas pruebas dinámicas de la marcha utilizando sensores Kinect. El método busca la mejor coincidencia entre un modelo predefinido y el modelo del sujeto durante la tarea y estima las trayectorias conjuntas y angulares. Los resultados se compararon con las mediciones de un sistema de captura de movimiento tridimensional, lo que demuestra la utilidad de las estimaciones de bajo costo proporcionadas por el sistema propuesto para evaluar las tareas clínicas. Estos sistemas están diseñados para su uso en entornos especializados (p. ej. instituciones clínicas) y, por lo tanto, no cubren el alcance de los entornos de usuario dirigidos a personas mayores.

Una propuesta similar a la presentada aquí se introduce en (Nishchyk, Geentjens, Medina, Klein, & Chen, 2020). Se trata de un prototipo basado en Kinect que implementa un exergame de realidad aumentada para motivar a las personas mayores a realizar ejercicio físico en casa. El sistema incluye varios niveles de dificultad que se pueden superar realizando determinadas actividades con distintos grados de dificultad. Por ejemplo, el usuario debe imitar el vuelo de un avión levantando repetidamente los brazos a la altura del hombro, paralelos al suelo, con la articulación del codo recta. A pesar de ser la propuesta más cercana a la que aquí se presenta, existen algunas diferencias claves:

- Aunque el trabajo está interesado en la experiencia de usuario, no incluye ningún estudio de usabilidad;
- Este prototipo se probó con solo tres participantes de entre 43 y 62 años, que es una muestra demasiado pequeña cuyo perfil no corresponde a los ancianos y que no permite extraer conclusiones fiables.
- Aunque el sistema verifica la precisión en la realización de los ejercicios, no parece proporcionar mediciones numéricas que permitan comparar el rendimiento entre diferentes sesiones;
- Este prototipo parece implementar un único entorno en comparación con los 52 ejercicios y 34 *exergames* de nuestro sistema. En definitiva, se trata de un trabajo interesante, pero con mucho menos alcance funcional, análisis de usabilidad y trabajo experimental que el aquí propuesto.

Otro sistema recientemente publicado basado en Kinect que promueve y controla la ejecución de ejercicios físicos se describe en (Nakazawa, Takigawa, & Matsui, 2020). El sistema implementa una función de medición impulsada por el juego, que solo reconoce el movimiento de sentadilla comparando la posición del hombro con un umbral cuando el cuerpo se mueve hacia arriba y hacia abajo. El sistema mide el tiempo de ejercicio e incluye una función de puntuación. Los experimentos con 10 personas mayores de entre 70 y 90 años mostraron la utilidad del sistema para fomentar el envejecimiento activo. A pesar de la validez de la propuesta, se pueden identificar algunas limitaciones. El algoritmo de control de sentadillas depende exclusivamente de las articulaciones del hombro, por lo que no comprueba el ángulo de la rodilla ni el resto de las articulaciones de las extremidades inferiores. Los experimentos no incluyen una evaluación numérica o un estudio de usabilidad, los cuales resultan particularmente importantes en el caso de los usuarios de edad avanzada.

La Tabla 3 resume una comparación entre los artículos revisados y el sistema propuesto en esta tesis basada en un conjunto de criterios que incluyen características del sistema y

estrategias para evaluar su efectividad. Las características del sistema se centran en las tecnologías de usabilidad (p. ej. realidad aumentada, gamificación, etc.) y las capacidades del sistema para monitorear, controlar y medir el movimiento en tiempo real, mientras que las estrategias de evaluación consideran la cantidad y el perfil de los datos, la naturaleza de las mediciones y el uso de pruebas estadísticas para validar la significación de los resultados.

Del análisis de la tabla puede concluirse que ninguno de los artículos revisados puede considerarse directamente comparable con el sistema aquí propuesto en términos de alcance funcional, algoritmos de control, y diversidad de entornos de usuario y modos de interacción.

Tabla 3 - Comparación de publicaciones recientes sobre envejecimiento activo y este trabajo, considerando tanto las características de los sistemas como los métodos para evaluar su efectividad.

Trabajos relacionados (Envejecimiento activo)	1 [31]	2 [32]	3 [33]	4 [34]	5 [27]	6 [29]	7 [30]	8 [28]	KINEACTIV
Año de publicación	20	20	20	20	18	18	20	19	20
Basado en Kinect	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Entorno AR	-	-	X	-	X	-	-	X	X
Gamificación	-	-	X	-	X	-	-	X	X
Interacciones basadas en gestos	-	-	-	-	X	-	X	-	X
Estudio de usabilidad	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Ejercicios para miembros superiores	-	-	X	X	X	X	-	X	X
Ejercicios para miembros inferiores	-	-	-	X	X	X	-	X	X
Control de movimiento en tiempo real	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Medición en tiempo real	X	X	-	X	-	-	-	-	X
Evaluación estadística	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Participantes por género: F/M	80	6	3	10/10	46	442	1/3	52	28/29
Edades de los participantes (edad promedio o rango de edad)	-	23,3	[43, 62]	[70, 90]	69,3	73,3	[60, 75]	[60, 90]	[65, 80]
Asistencia a domicilio	-	-	X	-	-	-	-	-	X

### 5.3 Objetivos funcionales

Con el objetivo de explotar el potencial de las interfaces de gamificación y realidad aumentada para mejorar las habilidades motoras en adultos mayores, se identificaron los siguientes objetivos funcionales:

- Técnicas de detección natural: métodos de interacción más naturales e intuitivos como el reconocimiento de gestos o voz, a la vez que se evitan elementos difíciles de manejar por las personas mayores como los botones para cambiar las pantallas.
- Márgenes de tolerancia laxos: criterios flexibles para evaluar la corrección del movimiento en el curso de la ejecución de un ejercicio para compensar las habilidades motoras limitadas de las personas mayores.

- Interfaz de usuario basada en gestos y secuencias de comandos: entradas gestuales naturales y fáciles para interactuar con el sistema, ya sea para iniciar el juego o para jugar con él. La interfaz gráfica de usuario puede reaccionar implementando un esquema basado en guiones, en el que el usuario simplemente tiene que seguir las indicaciones paso a paso.
- Entorno realidad aumentada: entorno de realidad aumentada agradable que integra al usuario y proporciona retroalimentación en tiempo real sobre el estado del ejercicio actual.
- Esquema de recompensa: la gamificación ofrece un entorno interactivo natural para implementar esquemas de recompensa que permiten mantener la atención de los usuarios y hacer que el sistema sea más atractivo. Por lo tanto, la gamificación puede ser de mayor importancia para los usuarios mayores con habilidades tecnológicas insuficientes.
- Elementos gráficos mejorados: los elementos gráficos, como juegos y avatares, que contribuyen a que el sistema sea más comprensible y agradable para usuarios mayores.

El flujo de interacción típico para que un usuario mayor realice un ejercicio prescrito se puede describir de la siguiente manera. Para iniciar una nueva sesión, el usuario debe autenticarse mediante nombre de usuario y contraseña. Esta es la interacción única del teclado o el ratón durante la sesión. Como mejora futura, se prevé la identificación biométrica a través del reconocimiento facial o de voz. Una vez que ha iniciado sesión, el sistema evalúa la posición del usuario en la escena y la postura del cuerpo, y proporciona retroalimentación visual sobre si se necesita alguna corrección. Luego, el usuario navega a través de múltiples pantallas que proporcionan instrucciones sobre el ejercicio prescrito. Los tiempos de transición personalizables entre pantallas eliminan la necesidad de una interacción explícita del usuario. Después de la última pantalla de información, el sistema se detiene hasta que el usuario realiza un gesto necesario para iniciar el ejercicio: la mano con la palma de la mano mirando hacia el sensor se mueve de derecha a izquierda o de izquierda a derecha (Ilustración 38). Esta acción se ilustra en la pantalla para mantener al usuario comprometido. Una vez reconocido el gesto, comienza el ejercicio. El sistema implementa un entorno de juego personalizado donde los objetivos se representan a través de elementos visuales de AR. Después de ser informado sobre objetivos y repeticiones, el usuario comienza a realizar la actividad. El sistema comprueba si cada repetición cumple con el objetivo preestablecido, teniendo en cuenta los márgenes de tolerancia flexibles configurables, y proporciona retroalimentación visual en tiempo real sobre el nivel de logro. Al final de la rutina, todas las series de mediciones se almacenan en una base de datos central ubicada en un servidor. Luego, el personal sanitario puede acceder a estadísticas y gráficos que resumen los resultados de los ejercicios y reprogramar las nuevas sesiones en consecuencia.

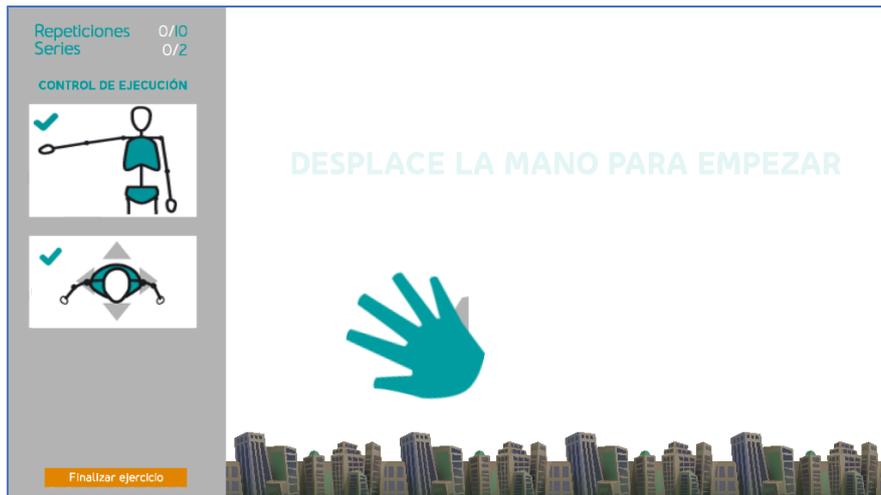


Ilustración 38 - El sistema ilustra la acción (un gesto con la mano) necesaria para iniciar el ejercicio.

A partir de la descripción anterior, se pueden inferir cuatro características de interacción del usuario que resultan particularmente importantes para el objetivo de acercar el sistema a las personas mayores:

- Interfaz de usuario basada en AR
- Entornos gamificados con esquemas de recompensas
- Interacciones de usuario basadas en gestos
- Evaluación en tiempo real del nivel de logro basado en márgenes de tolerancia flexibles.

Las siguientes subsecciones discuten los métodos involucrados en la implementación de estas características.

## 5.4 Usabilidad

La interfaz gráfica de usuario incluye una serie de elementos visuales que fueron diseñados tanto para guiar a los usuarios durante los ejercicios como para provocar en el usuario una sensación de integración en el entorno. Un ejemplo muy destacado del primer objetivo es el uso de avatares, que fueron concebidos como animaciones 3D para ilustrar la forma correcta de realizar ejercicios. Demostraron ser un recurso dinámico, autoexplicativo y atractivo para los usuarios de la enseñanza, especialmente los ancianos. La Ilustración 39 muestra un ejemplo de un avatar 3D que ejemplifica una sentadilla de doble pierna.

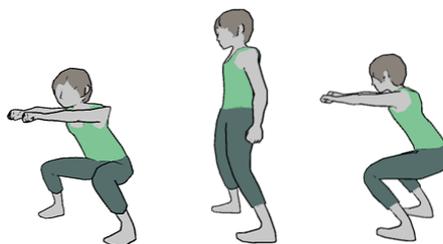


Ilustración 39 - Un avatar 3D que ilustra cómo realizar el ejercicio de sentadilla. En la parte superior, la pantalla con el ejercicio programado. En la parte inferior, algunas tomas de la secuencia de movimiento del avatar.



Ejemplo de la interfaz y de los distintos juegos/ejercicios que verá el paciente

Ejemplo de acceso a la interfazInterfaz y evolución que ve el sanitario al hacer el seguimiento.

Ilustración 40 - Interfaz gráfica de usuario – Aplicación backoffice.

Para cumplir con el segundo objetivo (sensación de integración), se agregaron componentes dinámicos de AR a entornos gamificados. La Ilustración 40 muestra un ejemplo donde los elementos AR representan el objetivo de un ejercicio determinado. En este caso, la coordenada 3D de una jaula de pájaro renderizada en la escena del usuario indica la posición a la que el usuario debe levantar el brazo en un ejercicio de abducción del hombro para cumplir

con el objetivo. Alcanzar la posición objetivo del ejercicio se representa colocando el ave en la jaula. Una vez que el usuario ha completado el ejercicio, el ave sale de la jaula y vuela.

La inserción de elementos AR en una escena requiere información contextual de la escena y datos biométricos del usuario. Por ejemplo, el cálculo de las coordenadas 3D de la jaula de pájaros que representa el objetivo del ejercicio (Ilustración 41) depende de la posición del usuario en la escena, el ángulo objetivo y la longitud de la extremidad superior del usuario. De manera más formal, dado un ejercicio en particular, las articulaciones y los músculos involucrados en su correcta ejecución se recuperan de la base de datos, junto con algunas reglas de evaluación que determinadas por el objetivo del ejercicio y las medidas físicas entre las articulaciones de interés del usuario.

Cada ejercicio comienza con un paso de calibración. Una vez que el cuerpo está correctamente posicionado en la escena, las coordenadas 3D de las articulaciones de interés se obtienen a partir del flujo de coordenadas esqueléticas 3D, y los segmentos entre estas articulaciones se modelan a través de vectores de naturaleza biométrica. Como ejemplo, una calibración relacionada con los ejercicios de hombro incluye las coordenadas del hombro, el codo y la muñeca. Sean S, E y W estas tres articulaciones, respectivamente. Luego,  $\overrightarrow{SE}$ ,  $\overrightarrow{SE}$  y  $\overrightarrow{EW}$  serán vectores y denotarán el brazo y el antebrazo, respectivamente.

Un ejemplo de calibración similar se realiza para los ejercicios de rodilla, donde se obtienen ubicaciones de la cadera (H), la rodilla (K) y el tobillo (A). Como en el caso de las rutinas de hombro, los vectores  $\overrightarrow{HK}$  y  $\overrightarrow{KA}$  ya son estimados. La Ilustración 42 muestra ambos escenarios. Las propiedades de estos vectores pueden considerarse específicas del usuario y, por lo tanto, invariantes entre diferentes sesiones. Este proceso de calibración personalizada se realiza con el usuario colocado frente a la cámara en una postura relajada con el fin de establecer el estado de reposo inicial de cada articulación. Estos datos biométricos se almacenarán y recuperarán al inicio del ejercicio relacionado, y se utilizarán como referencia en los entornos gamificados.

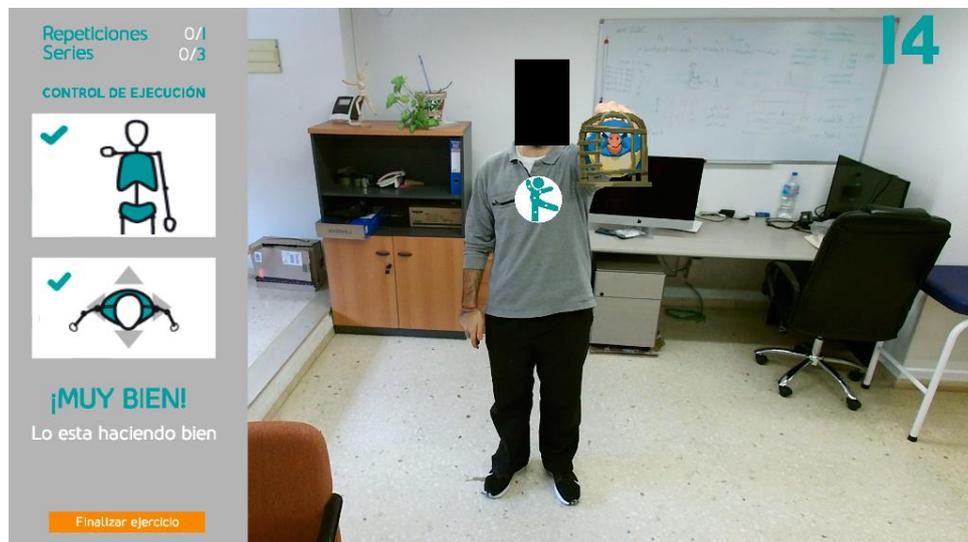
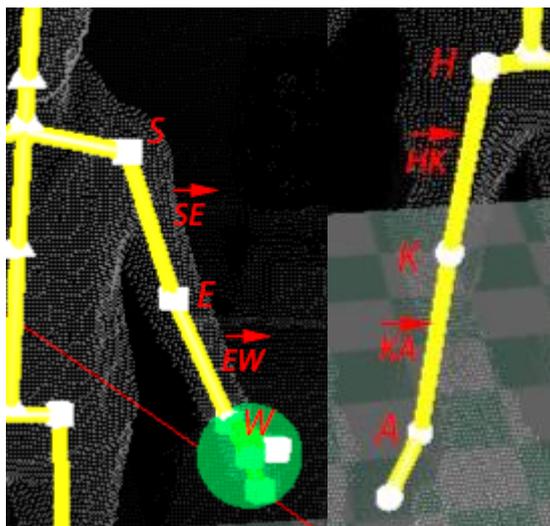


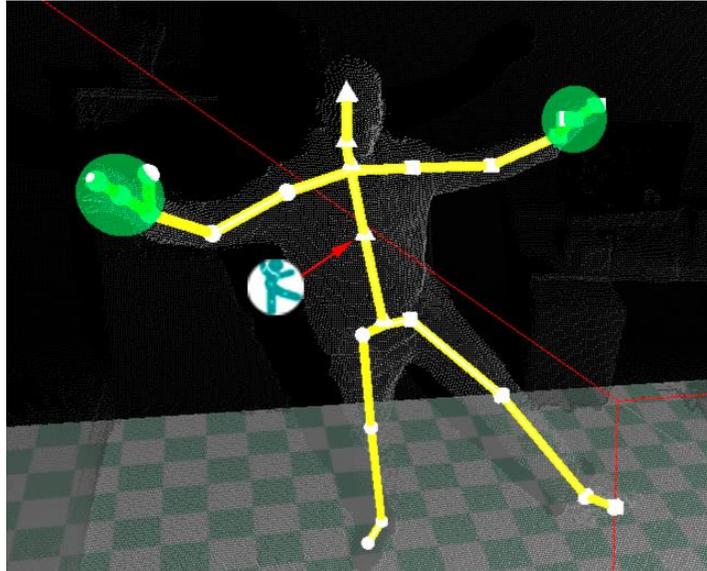
Ilustración 41 - Un elemento de realidad aumentada incrustado en un entorno gamificado: meter al ave en la jaula.



*Ilustración 42 - Articulaciones y vectores involucrados en un paso de calibración para un ejercicio de hombro (izquierda) y un ejercicio de rodilla (derecha).*

Los resultados de la calibración alimentan el método de estimación de las coordenadas 3D de los elementos de realidad aumentada que representan el objetivo del ejercicio (p. ej. un ángulo objetivo). Estas coordenadas son el punto de referencia contra el cual medir el logro del objetivo del ejercicio con una precisión de cinco decimales. Ya sea que se logre o no el objetivo, el resultado de cada repetición se mide (p. ej. el ángulo observado) y se almacena en la base de datos para futuros análisis. Además de evaluar el estado final del ejercicio, las posiciones de las articulaciones y los vectores relacionados se actualizan 30 veces por segundo para garantizar que la ejecución completa del ejercicio sea correcta. Este proceso se basa en unos márgenes de tolerancia que también se personalizan para cada paciente. El papel de estos márgenes se discutirá más adelante.

La tecnología de realidad aumentada también se ha utilizado para identificar a la persona que está recibiendo la atención del sistema adjuntando una marca visual en el pecho del usuario en la transmisión de video, simulando un logotipo impreso en la camisa del usuario. Esto permite mantener a varias personas en la escena, por ejemplo, un fisioterapeuta y un usuario, con el sistema indicando visualmente quién está siendo monitoreado. De esta manera, el sistema mantiene informado al usuario de que está siendo reconocido como el sujeto de interés. La marca, que consiste en un círculo que encierra el logotipo del sistema, se coloca en las coordenadas asociadas con la articulación llamada SPINE\_MID (ver Ilustración 18), que se encuentra alrededor de la quinta vértebra torácica (T5). La marca se mueve junto con esta articulación de una manera que mantiene al usuario identificado durante toda la sesión. La Ilustración 43 muestra la marca y la articulación SPINE\_MID de forma aislada.



*Ilustración 43 - La marca (un círculo que encierra el logotipo del sistema) se coloca en la posición estimada para la articulación SPINE\_MID, que se encuentra alrededor de la quinta vértebra torácica (T5).*

El tamaño de la marca se eligió de tal manera que permitiera una correcta visualización, pero sin interferir con el resto de los elementos de la interfaz gráfica de usuario o con las articulaciones más cercanas (SPINE\_BASE y SPINE\_SHOULDER).

### **Interacciones de usuario basadas en gestos**

El reconocimiento de gestos humanos tiene como objetivo interpretar la semántica de los gestos humanos. Un gesto se puede definir como cualquier movimiento de la cara, las manos u otras partes del cuerpo que tiene la intención de transmitir un mensaje. Por lo tanto, el reconocimiento de gestos es una forma particular de reconocimiento de movimiento. Hoy en día, el reconocimiento de gestos humanos basado en vídeo está ganando impulso como una de las interfaces humano-computadora más prometedoras debido a su simplicidad e intuición [38].

Aprovechando las numerosas oportunidades que ofrece Kinect V2 para reconocer el movimiento humano, se ha desarrollado un enfoque basado en reglas para reconocer un gesto simple y natural que permite al usuario interactuar con el sistema. En particular, se ha implementado una regla para reconocer el movimiento de la mano de izquierda a derecha y de derecha a izquierda, con la palma de la mano mirando hacia el sensor. Una vez que el sistema reconoce este gesto, cambia automáticamente a la siguiente pantalla. Por ejemplo, esta acción permitiría iniciar un juego vinculado al ejercicio seleccionado.

Este reconocedor basado en reglas identifica ambas articulaciones de las manos, HAND\_LEFT y HAND\_RIGHT, las representa a través de círculos grises y espera a que una de las manos realice un movimiento que se ajuste al patrón esperado. La posición inicial de la mano en este patrón de movimiento se establece a la mitad de la altura del usuario en el eje y, y lejos del tronco en el eje x (consulte la Ilustración 44 a la izquierda). Cuando se detecta una de las articulaciones de la mano en una posición inicial válida, el color del círculo que representa esa mano cambia a verde para informar al usuario de que la posición inicial ha sido validada. Mientras el usuario mueva la mano a lo largo del eje x, manteniendo la coordenada y aproximadamente constante, el círculo verde acompaña la ejecución, lo que indica que todavía se reconoce como válida (ver Centro de la Ilustración 44). Finalmente, cuando la mano excede

la coordenada x de la articulación SPINE\_MID, el gesto se considera completado, que es un evento que se representa cambiando el color del círculo de verde a gris claro (ver Figura 12, derecha). Una vez que el gesto ha sido completamente identificado, el sistema cambia la pantalla y comienza el ejercicio.

Reconocer los gestos humanos a través de Kinect V2 es un área de investigación muy activa, y ha sido ampliamente estudiada en (Lahiani & Neji, 2020). Después de esta primera experiencia, planeamos otras características basadas en gestos en futuras versiones.

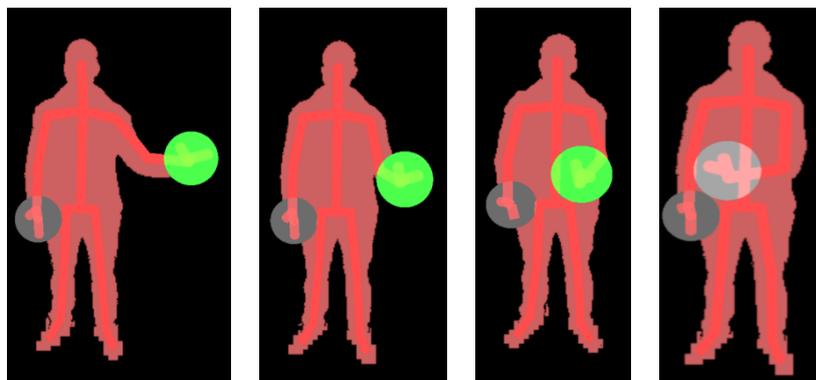


Ilustración 44 - Reconocimiento de gestos: de izquierda a derecha, el círculo representa el seguimiento de la mano de un lado a otro. El círculo gris indica que la interacción ha sido correctamente identificada.

## 5.5 Control y evaluación del movimiento – diseño

Cada tipo de ejercicio está vinculado a un juego. Los juegos se han diseñado priorizando la simplicidad, y teniendo en cuenta los dos objetivos discutidos anteriormente:

- guiar al usuario
- mantener el interés del usuario hasta que se complete el ejercicio.

Cada uno de los juegos elegidos para la realización de los ejercicios ha seguido la premisa de contar con elementos comunes en función del tipo de movimiento a realizar, con el fin de mantener la coherencia con respecto al usuario. Por ejemplo, para ejercicios concéntricos en las articulaciones superiores siempre se utiliza el mismo juego, el cual se adapta a las necesidades del movimiento. El objetivo es proporcionar coherencia a los 34 entornos creados y evitar la monotonía, haciendo más atractiva la interacción con el sistema y adaptando todos los elementos de realidad aumentada a la naturaleza de los movimientos.

Los juegos también incluyen una característica lúdica y gratificante que consiste en puntuar la ejecución de ejercicios y mostrar las puntuaciones en las clasificaciones que involucran otros usuarios. Una vez finalizado el ejercicio, se muestra la puntuación resultante y la clasificación actualizada. El cálculo de la puntuación consiste en comparar una magnitud objetivo (p. ej. un ángulo, una medida de tiempo, etc.) contra una magnitud observada, aunque también depende de la naturaleza de cada ejercicio. Como ejemplo de evaluación de la ejecución de una actividad, se explicará un ejercicio de hombro llamado "retracción escapular". La retracción escapular implica tirar de los omóplatos (escápulas) hacia la columna vertebral para que ambas escápulas estén lo más cerca posible entre sí. La Ilustración 45 y la Ilustración 46 muestran este ejercicio.

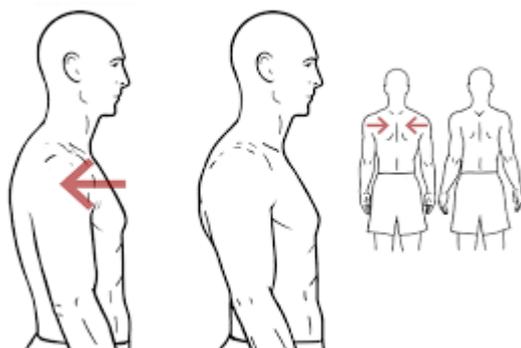


Ilustración 45 - Retracción escapular (<https://workoutsprograms.com/ejercicios/retracción-escapular>).

El control de la ejecución de este ejercicio se basa en las posiciones de las articulaciones SHOULDER\_RIGHT, la SPINE\_SHOULDER y la SHOULDER\_LEFT (ver Ilustración 45), denominaciones que usa Kinect para referirse a las articulaciones del hombro derecho, la columna entre los hombros y del hombro izquierdo. Sean R, S y L tres puntos que denotan las coordenadas de estas tres articulaciones, respectivamente, y que definen vectores entre ellos. Una vista superior de estas articulaciones se asemeja a un triángulo definido por los tres vectores (ver Figura 11 izquierda). Hay que tener en cuenta que, a diferencia de los ejemplos anteriores, estos vectores no representan estructuras corporales y, por lo tanto, se espera que cambien durante la ejecución del ejercicio las distancias entre  $\overrightarrow{RSLSRL}$ .

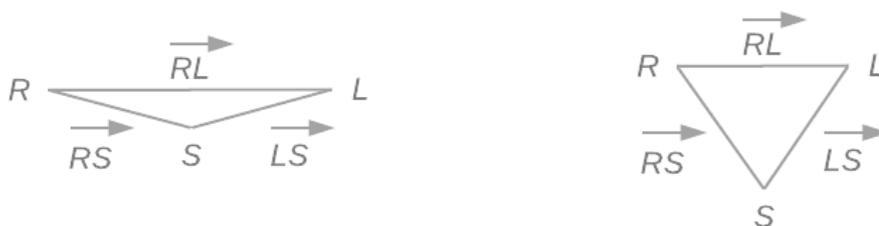


Ilustración 46 - Triángulo definido por las articulaciones SHOULDER\_RIGHT, SPINE\_SHOULDER y SHOULDER\_LEFT (desde una vista superior).

En la Ilustración 46 (izquierda), podemos observar una representación del estado de reposo de estas articulaciones. A la derecha, observamos una deformación causada por la correcta ejecución de una retractsión escapular.

La regla de evaluación de la ejecución del ejercicio mide las longitudes de los vectores en tiempo real y evalúa ciertas condiciones heurísticas que validan las deformaciones esperadas cuando los hombros se acercan entre sí, ambos alejándose del esternón. Estas condiciones se pueden resumir de la siguiente manera:

- $\overrightarrow{RS}_t \geq \overrightarrow{RS}_{t-k}$
- $\overrightarrow{LS}_t \geq \overrightarrow{LS}_{t-k}$
- $\overrightarrow{RL}_t \leq \overrightarrow{RL}_{t-k}$
- $\text{Abs}(|\overrightarrow{RS}_t| - |\overrightarrow{LS}_t|) < \epsilon$

Las variables  $t$ ,  $k$ , y  $\epsilon$  denotan el instante de tiempo actual, una ventana de tiempo configurable y un parámetro para controlar la ejecución simétrica del ejercicio, respectivamente.

Cuando todas las condiciones se cumplen simultáneamente desde el principio hasta el final del ejercicio, la ejecución se considera correcta. El parámetro  $k$  permite ajustar la precisión para controlar la deformación de los vectores: valores pequeños conducen a reglas exigentes, mientras que valores más grandes promueven ejecuciones más permisivas. Cuando no se cumple una regla, se informa al usuario puntualmente qué parte del ejercicio (p. ej. qué hombro) debe corregirse. En este sistema, diseñado para asistir a las personas mayores, los valores asignados a los parámetros  $k$  y  $\epsilon$  están dirigidos a adaptar las reglas a las habilidades motoras de cada usuario.

La Ilustración 47 muestra el entorno de gamificación diseñado para animar a los usuarios a realizar correctamente una ejecución isométrica de la retracción escapular. Los ejercicios isométricos implican una contracción estática de un músculo o grupo de músculos sin ningún movimiento notable en los ángulos de las articulaciones afectadas. El objetivo es mantener la tensión muscular durante un período de tiempo.



Ilustración 47 - Entorno de gamificación diseñado para la retracción escapular isométrica.

En la Ilustración 47, en la parte izquierda, vemos que mientras el usuario mantiene la tensión muscular, el cañón gana potencia de fuego. A la derecha, si el poder acumulado es suficiente, la bala proyectada (bola negra en el centro) golpeará la torre.

Este es un ejemplo de los entornos gamificados relacionados con ejercicios del músculo trapecio, los cuales, aunque diferentes, han sido todos diseñados a partir del tema de piratas. Por el contrario, los ejercicios concéntricos aparecen asociados a entornos gamificados inspirados en temas de extraterrestres. Este juego, en particular, trata sobre un barco pirata que ataca una torre en una isla con un cañón. La potencia de fuego del cañón será proporcional al tiempo que el usuario mantenga la tensión muscular durante la retracción escapular isométrica. El usuario gana si la bala proyectada golpea la torre.

## 5.6 Adaptación de los márgenes de tolerancia

El sistema incluye varios mecanismos para evaluar la ejecución en tiempo real de los ejercicios y el logro de objetivos. Además de algoritmos como el descrito en la sección de control y evaluación del movimiento, para controlar el rendimiento de la retracción escapular, la validez de muchos ejercicios se evalúa a través de márgenes de tolerancia, como se explica en (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). En ese trabajo, el margen de tolerancia se definió como una región 3D personalizada fuera de la cual cualquier actividad se consideraba inválida. Estos márgenes de tolerancia generalmente se consideran junto con márgenes posturales, los cuales están destinados a evitar cambios posturales indebidos dirigidos a compensar o facilitar el movimiento objetivo.

Para adaptar el sistema a la reducida capacidad corporal de las personas mayores, se han relajado todos los márgenes implicados en la evaluación de los ejercicios implementados. Por ejemplo, en los usuarios mayores, una abducción o flexión del brazo generalmente implica una inclinación compensatoria del torso que afecta la postura del cuerpo. En este caso, la tolerancia a la inclinación del torso se ha ampliado de 5 a 20 grados, es decir, 15 grados por encima del margen establecido para adultos jóvenes sin lesiones. De esta manera, las personas mayores pueden realizar ejercicios de hombros de manera más cómoda.

Otro ejemplo es la adaptación del margen establecido para el ejercicio de sentadilla. La Ilustración 48 muestra (en negro) la posición correcta de las rodillas durante una ejecución estándar, donde no se permite que ninguna de la articulación de la rodilla exceda la punta de los pies para que se considere válida. Sin embargo, esta restricción se ha relajado para las personas mayores, permitiendo una desviación de hasta 10 cm (segmentos en color naranja).



*Ilustración 48 - Corrección de la posición de las rodillas durante la ejecución del ejercicio de sentadilla.*

## 5.7 Adaptación de los sistemas gráficos (interfaz, elementos de los juegos)

A raíz de los experimentos que se realizaron durante la adaptación del sistema a las condiciones físicas de los usuarios de la tercera edad, nos percatamos de las enormes diferencias que existían entre los usuarios que habían probado inicialmente la primera versión del sistema y la segunda: las personas mayores son mucho más sensibles a los elementos gráficos, así como a los mensajes y a la forma de incentivar los movimientos dentro de la ejecución de los ejercicios.

Además, se pensó en cambiar la disposición y la interfaz por completo, con el fin de hacer más sencilla y amena la interacción con los usuarios. Así pues, se adaptó la pantalla de una orientación convencional en horizontal a un diseño “vertical”, con el fin de que se asemeje a un teléfono móvil, que, dentro de las nuevas tecnologías, es sin dudas un entorno más familiar o reconocible, o incluso tengan la sensación de verse dentro de un espejo vertical, un objeto cotidiano del que sí que están más habituados.

Con esa nueva filosofía y cambio de orientación, se decidió cambiar el diseño de todo el sistema, rehaciendo por completo todas las pantallas y los juegos asociados a cada movimiento. Incluso la automatización entre las pantallas se modificó para que ocurriese de una manera más suave e intuitiva, menos invasiva y mejor adaptada a las personas de la tercera edad.

A continuación, vamos a destacar las ventajas y los beneficios de los nuevos diseños, los nuevos elementos gráficos y las nuevas estrategias de interacción. Por ejemplo, la pantalla inicial con la orientación en vertical se vería como se puede apreciar en la Ilustración 49 .



*Ilustración 49 - Nueva pantalla inicial KineActiv.*

La Ilustración 50 corresponde a la explicación de las instrucciones de uso y cómo se puede salir de una pantalla, ya que en cada una de ellas se les muestra un video explicativo de las acciones que se pueden hacer en cada uno de los casos. A estos videos, se les incorporaron elementos sonoros que ayudan a la comprensión de las instrucciones, con el fin de que las personas con algún problema visual o que precisen gafas específicamente para leer disfruten de un canal de información adecuado.



Ilustración 50 - Pantalla de instrucciones de uso de KineActiv.

También se desarrollaron avatares nuevos para hacer más atractivo y amigable el entorno y que las personas mayores se sintieran más identificadas como se puede observar en la Ilustración 51.

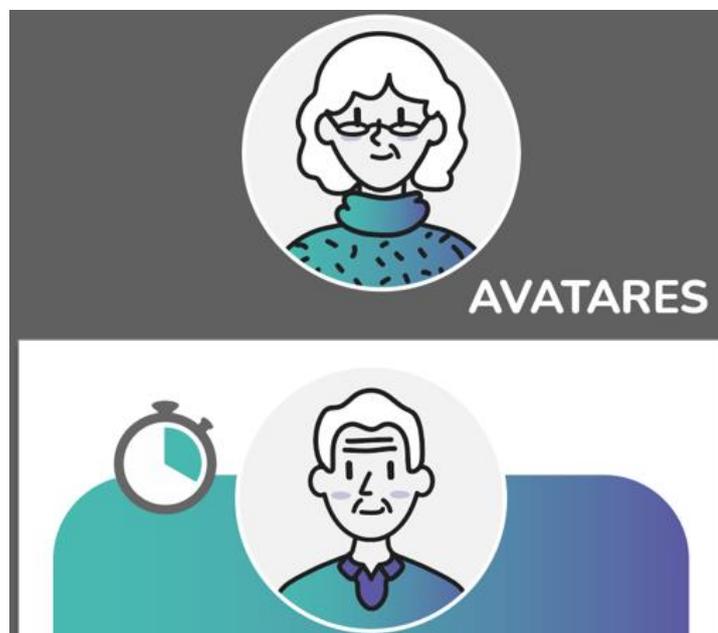


Ilustración 51 - Diseño de avatares.

Además, en esta nueva adaptación, se ha sustituido el listado de ejercicios a realizar en la sesión, que anteriormente era una lista escrita, por un conjunto de iconos que ilustran la temática del juego a realizar. A su vez, estos juegos también han sido totalmente rediseñados,

adoptando actividades que han realizado a lo largo de toda su vida, tales como jugar al parchís, al dominó, o a la bajara española, tal y como se muestra en Ilustración 52.

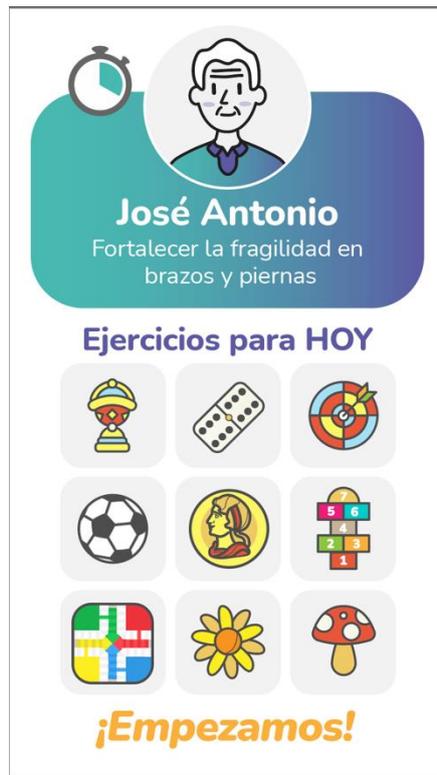


Ilustración 52 - Conjunto de ejercicios a realizar por el usuario de la tercera edad.

Continuando con los cambios en la interfaz, es el momento de especificar las pantallas previas al comienzo del ejercicio, así como las pantallas que muestran el resultado de este, manteniendo la puntuación de estrellas que ya se estaba utilizando en la versión anterior. Como puede observarse en la Ilustración 53 y la Ilustración 54 se mantiene en esencia el aspecto de elementos gráficos del primer sistema, aunque con una ligera adaptación para mantener la coherencia estética de la nueva aplicación.



Ilustración 53 - Pantalla de preejercicio y ejercicio.



Ilustración 54 - Sistema de puntuación del ejercicio.

Una vez terminado un ejercicio, se vuelve a mostrar el listado de los ejercicios a realizar, solo que, como se ha comentado anteriormente, ahora no es un listado, sino un conjunto de iconos que simbolizan el listado de ejercicios. En este conjunto de iconos, se hace una diferenciación entre los ejercicios que se han ejecutado correctamente y los que no, es decir, se distinguen aquellos con una puntuación superior al 50 % de aquellos con puntuación inferior a ese porcentaje. Los ejercicios que superen el 50 % se mostrarán con una “V” y el color verde y los que no, con una “X” y el color rojo, como se observa en Ilustración 55 .



Ilustración 55 - Conjunto donde se muestran los ejercicios realizados correctamente y los que no.

En cuanto a las pantallas previas de los ejercicios, así como las dedicadas a los juegos, siguiendo la línea de cambios, también han sido totalmente rediseñadas, adaptándolas estéticamente y funcionalmente tanto a la nueva orientación como a la actividad que se va a realizar en ellas, tal y como muestran la Ilustración 56 y la Ilustración 57.



Ilustración 56 - Explicación previa al juego de la rayuela y el propio juego.



Ilustración 57 - Pantalla previa al juego del dominó y el propio juego.

## 5.8 Evaluación del movimiento

Como evolución respecto a la anterior versión de rehabilitación, se ha añadido un elemento que hasta el momento no se había tenido en cuenta: la velocidad de reacción. Este factor es un elemento muy importante para medir el progreso de las personas mayores y ver si evolucionan favorable o desfavorablemente, con el fin de que el personal sanitario especializado (p. ej. geriatras, fisioterapeutas, etc.) determine estrategias para mejorar la condición física del paciente. Este tiempo de reacción se mide desde el instante de tiempo en que aparece un estímulo en la pantalla hasta que este es ejecutado por el usuario, midiendo así su tiempo y velocidad de reacción. Hay que tener en cuenta que los estímulos aparecerán en diferentes posiciones de la pantalla de manera aleatoria, y en todos se llevará a cabo la citada medición. Esta aleatoriedad se lleva a cabo con el fin de evitar que el usuario aprenda el patrón de apariciones de los estímulos a lo largo del tiempo y pueda llegar a adelantarse, con lo que el resultado obtenido no sería real, aunque este ejercicio memorístico sirviese finalmente para conseguir una mejora cognitiva.

A modo de resumen del capítulo, destaca el cambio de perspectiva hacia la tercera edad, así como una explicación motivada en base a la necesidad de la sociedad, sobre todo en las zonas más deprimidas geográficamente. También se ha analizado el mercado en busca de proyectos similares dentro del sector, así como su comparativa con KineActiv. Además, se han mostrado los cambios y adaptaciones tanto a nivel visual de interfaz, como de análisis y adaptación del movimiento. Esta adaptación hace referencia, principalmente, a la permisividad de los márgenes de tolerancia, ya que el objetivo principal ahora es que se ejecute el movimiento. Debido a las características de los usuarios a los que va dirigido este sistema, se ha rediseñado completamente la interfaz y el método de interacción.

En los siguientes capítulos, se presentan los distintos experimentos realizados, así como el análisis de los resultados.



## 6 Evaluación experimental de KineActiv para rehabilitación

A lo largo de toda la investigación se realizaron varios estudios para evaluar el sistema de KineActiv. Por un lado, se realizó un estudio de usabilidad a través de un cuestionario presentado a pacientes, el cual se describirá más adelante. Por otro lado, se realizó un estudio de rendimiento para demostrar empíricamente la exactitud del sistema y la sensibilidad del sistema en la evaluación del estado físico de extremidades superiores afectadas por lesiones, el cual también será presentado en las próximas secciones.

Las muestras se registraron utilizando un dispositivo MS Kinect bajo una resolución espacial de 1920 × 1080 píxeles, una distancia media al sensor de 2,5 m, un campo de visión horizontal de 70°, un campo de visión vertical de 60° y una velocidad de fotogramas de 30 fotogramas/seg.

### 6.1 Diseño experimental

A continuación, se va a exponer el protocolo experimental correspondiente a la rehabilitación de personas diagnosticadas con una lesión en el tren superior, concretamente en la articulación del hombro. Además, se explicarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones.

Se diseñó un experimento que involucró diez pacientes adultos con alguna lesión en el brazo, divididos en seis hombres y cuatro mujeres con edades comprendidas entre los 38 y los 83 años. Todos ellos fueron cuidadosamente elegidos, seleccionados y reclutados en el Centro Policlínico SEAP de Teruel (<http://www.policlinicasseap.com/centros/policlinica-teruel/>), centro colaborador que está evaluando KineActiv en su servicio de fisioterapia.

Los datos consisten en series de mediciones cuantitativas obtenidas de cada paciente, al realizar cuatro ejercicios de miembros superiores. Los pacientes elegibles fueron aquellos que mostraron un patrón claro de mejora de la salud a lo largo de las sesiones, lo cual fue importante para evaluar las mediciones proporcionadas por el sistema cuando se trata de diferentes estados de recuperación. También se obtuvieron datos de un fisioterapeuta profesional sano que realizó los mismos ejercicios prescritos a los pacientes, para ayudar a establecer la precisión del sistema y para usar sus mediciones como datos de control. Los participantes firmaron un formulario de consentimiento por escrito, aceptando participar en el estudio sujeto a que sus datos personales permanezcan confidenciales. La Tabla 4 muestra los perfiles de los pacientes.

La adquisición de datos tuvo lugar en un laboratorio de investigación donde el fondo y la iluminación eran constantes. Se instruyó a los pacientes sobre el diseño del ejercicio (3 semanas × 2 sesiones semanales × 4 ejercicios × 3 series), y se les pidió que se dejaran guiar a través de la interfaz de usuario. Los cuatro ejercicios son combinaciones de dos tipos de movimiento de las extremidades superiores (abducción, flexión) y dos dinámicas (isométrica, concéntrica). Cada ejercicio condujo a una medida particular.

Tabla 4 - Perfiles de los pacientes.

Identificación del paciente	Género	Edad	Lesión
1	masculino	42	dislocación articular
2	masculino	47	tendinopatía
3	femenino	64	fractura de húmero
4	masculino	67	dislocación articular
5	masculino	38	tendinopatía
6	femenino	55	tendinopatía
7	femenino	57	calcificación
8	masculino	83	osteoartritis
9	masculino	45	pinzamiento del hombro
10	femenino	50	pinzamiento del hombro

## 6.2 Estudio de usabilidad

Después de analizar cuestionarios utilizados para fines similares en el campo de la rehabilitación y la salud que usan elementos virtuales (Nielsen, 1994) (Parmanto, Lewis, Graham, & Bertolet, 2016) (Gil-Gómez, y otros, 2013), nuestro cuestionario de usabilidad se diseñó combinando los ítems presentes en dos de los revisados que son consistentes con los objetivos perseguidos en este estudio. En primer lugar, adoptamos los diez ítems definidos en el cuestionario SUS (*System Usability Scale*) (Brooke, 1996), que han sido utilizados en la evaluación de usabilidad de un sistema de rehabilitación para las extremidades superiores (Pei, Chen, Wong, & Tseng, 2017). Además, con el fin de recopilar más información, agregamos los seis elementos utilizados en Shin, J. et al. (Shin, Ryu, & Jang, 2014) para evaluar la secuencia de acciones en un sistema de rehabilitación de realidad virtual adoptado de Park, J. et al. (Park, Parsons, & Ryu, 2010). Estos ítems fueron tenidos en cuenta ya que se pretende que el enfoque de gamificación provoque una inmersión total en el sistema, mientras guía a un paciente a alcanzar los objetivos marcados por el fisioterapeuta.

De esta forma, hemos podido probar tanto la usabilidad como la capacidad inmersiva, a la hora de jugar con los juegos incluidos en nuestro sistema. Se reunieron un total de 16 ítems en un cuestionario, donde cada ítem debe ser calificado entre 1 y 5, siendo 1 y 5 los valores más bajo y los más alto, respectivamente. La Tabla 5 muestra los valores promedio y las desviaciones estándar de todos los ítems. Los ítems del 1 al 10 son los del cuestionario del SUS, mientras que los ítems del 11 al 16 son los correspondientes a la capacidad inmersiva. A partir de los resultados de los diez primeros ítems, se calculó la puntuación SUS del sistema, una medida de usabilidad que oscila entre 0 y 100. El resultado global fue de 84,5, un valor que establece la idoneidad de KineActiv como sistema utilizable.

Tabla 5 - Resultados del estudio de usabilidad.

Pregunta	Valor medio	Desviación estándar
<b>1. Creo que me gustaría usar KineActiv con frecuencia</b>	4.7	0.48
<b>2. Creo que KineActiv es innecesariamente complejo</b>	1.4	0.52
<b>3. Creo que KineActiv es fácil de usar</b>	4.5	0.53
<b>4. Creo que necesitaría ayuda para usar KineActiv</b>	2.3	1.06
<b>5. Creo que las diversas funciones de KineActiv están bien integradas</b>	4.3	0.67
<b>6. Creo que hay demasiada inconsistencia en KineActiv</b>	1.4	0.52
<b>7. Imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar KineActiv muy rápidamente</b>	4.6	0.52
<b>8. Encontré KineActiv muy engorroso de usar</b>	1.5	0.53
<b>9. Me sentí muy seguro usando KineActiv</b>	4.4	0.52
<b>10. Habría necesitado aprender muchas cosas antes de usar KineActiv</b>	2.1	0.88
<b>11. Pensé en otras cosas al usar KineActiv</b>	2.5	0.85
<b>12. Era consciente de las distracciones al usar KineActiv</b>	3.0	0.47
<b>13. Usar KineActiv fue aburrido para mí</b>	1.6	0.52
<b>14. KineActiv fue divertido para mí usar</b>	4.4	0.52
<b>15. Sentí que tenía el control sobre mi proceso de rehabilitación con KineActiv</b>	3.9	0.74
<b>16. Estaba frustrado con lo que estaba haciendo al usar KineActiv</b>	1.4	0.52

La segunda parte del cuestionario, como ya hemos dicho, es sobre la capacidad inmersiva cuando se utiliza el sistema. Los elementos de flujo (11–16) evalúan tres factores diferentes. El primero es el enfoque atencional (ítems 11 y 12). En este caso, los valores obtenidos no fueron los deseados, lo que sugiere que el juego puede no mantener la atención de una manera fuerte. El segundo factor es el interés o placer intrínseco (ítems 13 y 14). En este caso, los valores recibidos por los ítems son buenos (1,6 en una pregunta donde se valoraba el aburrimiento y 4,4 en la opuesta, donde se preguntaban por diversión). Por lo tanto, el sistema se consideró agradable. Por último, también se evaluó el control (ítems 15 y 16). Aquí, los valores también fueron buenos, mostrando que el uso de KineActiv no causó ningún sentimiento negativo.

De acuerdo con toda la discusión anterior, la validación de la usabilidad de KineActiv arrojó resultados satisfactorios. El sistema demostró ser fácil de usar y la experiencia de flujo se consideró interesante y divertida. Asimismo, considerando los resultados de este estudio, podemos afirmar que las actividades gamificadas incluidas en el sistema atraen a los usuarios y captan su atención. Esta conclusión se justifica a partir del valor de los ítems sobre el enfoque atencional y el interés intrínseco, los cuales recibieron valores aceptables en el estudio.

### 6.3 Estudio de rendimiento

Este segundo estudio tiene como objetivo establecer la precisión y la sensibilidad de KineActiv, mediante el análisis de las distribuciones de cuatro medidas de rendimiento obtenidas durante la ejecución de las cuatro actividades previstas por todos los pacientes a lo

largo de distintas sesiones de rehabilitación. Como se mencionó anteriormente, estas medidas se definieron para cuantificar el progreso de los pacientes en el logro de objetivos al realizar los cuatro ejercicios de miembros superiores. Estas cuatro medidas se formularon de la siguiente manera:

- **Medidas isométricas.** Se definieron dos medidas a partir de la evaluación isométrica de ambos tipos de movimiento: el Índice de Abducción Isométrica (IAI) y el Índice de Flexión Isométrica (IFI). En cada caso, se le pidió al participante que mantuviera la mano dentro de la región 3D generada por computadora (la jaula) durante 45 seg, mientras que el sistema proporcionaba retroalimentación visual en tiempo real sobre la corrección del ejercicio y el tiempo de ejecución. La cantidad de segundos en los que se verificó este objetivo se consideró el valor de la medida.
- **Medidas de base concéntrica.** Se definieron dos medidas a partir de la evaluación concéntrica de los dos movimientos: el Índice de Abducción Concéntrica (CAI) y el Índice de Flexión Concéntrica (CFI). Se pidió al participante que repitiera el ejercicio correspondiente 20 veces, y se midió el ángulo del brazo con respecto al cuerpo en cada repetición.

En resumen, los datos de cada paciente se componen de los siguientes elementos:

- **IAI** Seis sesiones con una frecuencia de dos días a la semana de tres series de una sola abducción isométrica cada una, lo que resulta en 18 mediciones de IAI en total.
- **IFI** Seis sesiones con una frecuencia de dos días a la semana de tres series de una sola flexión isométrica cada una, lo que resulta en 18 mediciones de IFI en total.
- **CAI** Seis sesiones con una frecuencia de dos días a la semana de tres series de 20 abducciones concéntricas cada una, lo que resulta en 360 mediciones de CAI en total.
- **CFI** Seis sesiones con una frecuencia de dos días a la semana de tres series de 20 flexiones concéntricas cada una, lo que resulta en 360 mediciones de CFI en total.

## 6.4 Resultados

Esta sección incluye dos análisis diseñados para proporcionar evidencia sobre la precisión de KineActiv. El primero involucra a un fisioterapeuta sano, a quien se le pidió que realizara una abducción y una flexión de hasta 80°, según la medición de un goniómetro. Ambos ejercicios también fueron medidos por el sistema basado en Kinect, obteniéndose 80.12° y 80.06° en abducción y flexión, respectivamente. Es decir, los errores relativos del KineActiv con respecto al goniómetro fueron de 0,15 % y 0,075 % en cada caso. El fisioterapeuta también realizó los mismos ejercicios indicados a los pacientes, siguiendo cuidadosamente las instrucciones. Los resultados medios, medidos por el sistema, fueron IAI = 43,65 seg, IFI = 44,05 seg, CAI = 120° y CFI = 120°. Es decir, las mediciones estuvieron muy cerca de las expectativas, lo que puede considerarse una primera prueba favorable sobre la exactitud del sistema.

La segunda perspectiva de análisis se basa en la distribución de las desviaciones estándar de CAI y CFI sobre los pacientes como funciones del número de la sesión de rehabilitación. Cada desviación estándar, elemento de una distribución de una sesión específica, corresponde a las repeticiones realizadas por un paciente particular con respecto a su media de sesión. Estas medidas fueron elegidas debido a que incluyen más repeticiones que las otras dos, lo que las hace más apropiadas para la estadística descriptiva.

La motivación de este tipo de análisis es que distribuciones estrechas de pequeñas desviaciones demostrarían empíricamente la estabilidad del sistema, pues cada una considera múltiples ejecuciones de un mismo ejercicio por un mismo paciente en una misma sesión. Debe tenerse en cuenta que cada medición individual es el resultado de una ejecución particular de una acción dada, única. Por lo tanto, se puede suponer razonablemente que pequeñas desviaciones del promedio reflejan un sistema confiable.

La Ilustración 58 muestra diagramas de caja que representan las distribuciones de las desviaciones estándar entre los pacientes para cada medida y sesión. Como se observa, son distribuciones estrechas compuestas por pequeñas desviaciones, la mayoría de ellas entre 1 y 2 grados en mediciones de ángulo en el rango de 80-120°. Este nivel de desviación es consistente con el error de Kinect de 2.09° reportado por Naeemabadi, M. et al. (Naeemabadi, Dinesen, Andersen, Najafi, & Hansen, 2018). Las desviaciones tienden a disminuir con el progreso de la rehabilitación (con la mejora del rendimiento de los pacientes), con la excepción de la última sesión, posiblemente la más exigente. Este segundo análisis también muestra un comportamiento muy consistente del sistema.

Las cajas se extienden de los valores del cuartil  $Q_1$  (25 % de los datos) al  $Q_3$  (75 % de los datos), las marcas naranjas ilustran las ubicaciones de las medianas  $Q_2$ , los bigotes se han establecido en los percentiles 10 y 90, y los valores extremos están representados por puntos más allá de los bigotes.

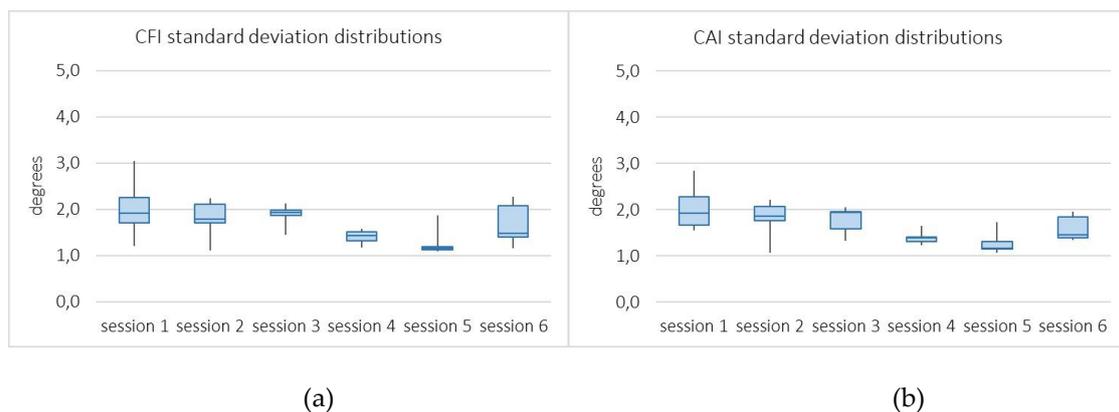
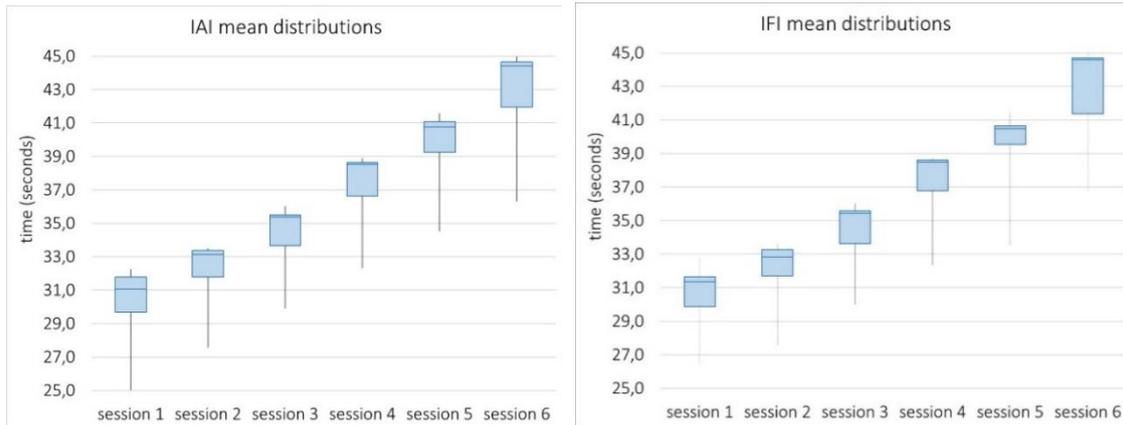


Ilustración 58 - Diagramas de caja a partir de distribuciones de las desviaciones estándar del Índice de Abducción Concéntrica (a) y el Índice de Flexión Concéntrica (b) entre los pacientes durante las seis sesiones. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

La Ilustración 59 muestra las distribuciones de los valores medios de las mediciones isométricas de los pacientes en función de la sesión. El dominio de estas medidas oscila entre 0 y 45 seg, siendo este último el objetivo establecido por el fisioterapeuta en este estudio. Por lo tanto, cuanto mayor sea el valor, mejor será la ejecución. Las cajas resultantes pueden considerarse estrechas, excepto por el bigote inferior, lo que sugiere un alto nivel de acuerdo entre la mayoría de los pacientes. En particular, el bigote inferior es afectado por el paciente número ocho, el de mayor edad, que se desempeñó considerablemente por debajo del resto.

Al observar más de cerca los resultados, la mayoría de las distribuciones (diagramas de caja) están fuertemente sesgadas hacia valores más bajos. Esto significa que la mitad de los pacientes con peor rendimiento (por debajo de la mediana) progresan de manera más desigual, mientras que los pacientes que están más cerca de los objetivos progresan de manera más uniforme.

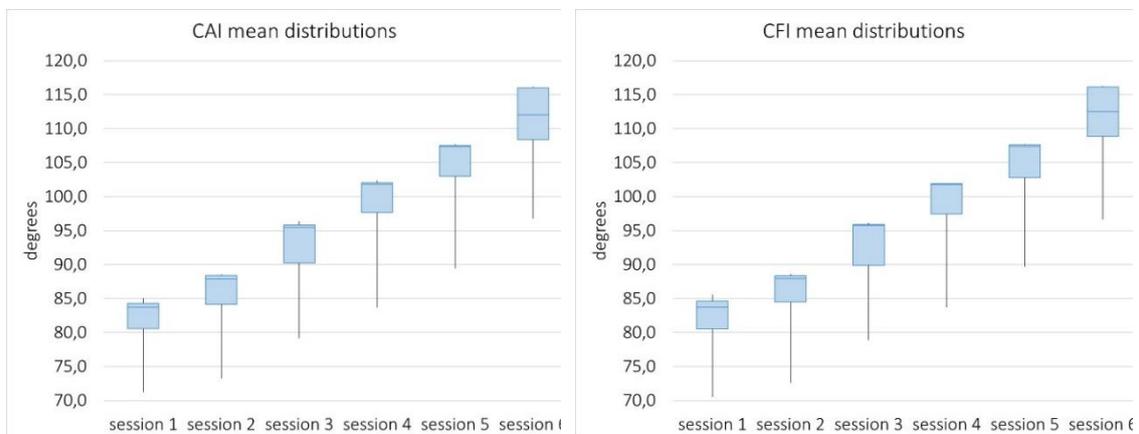


(a)

(b)

*Ilustración 59 - Diagramas de caja a partir de distribuciones de los valores medios del Índice de Abducción Isométrica (a) y el Índice de Flexión Isométrica (b) entre los pacientes durante las seis sesiones. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).*

Este resultado es consistente con la intuición: hay más dispersión entre los pacientes con mayores trastornos. La Ilustración 60 muestra patrones de distribución similares de los dos índices concéntricos. El dominio de estos índices oscila entre 0 y 120°, siendo este último el objetivo establecido por el fisioterapeuta en este estudio. Por lo tanto, cuanto mayor sea el valor, mejor será la ejecución.



(a)

(b)

*Ilustración 60 - Diagramas de caja a partir de distribuciones de los valores medios del Índice de Abducción Concéntrica (a) y el Índice de Flexión Concéntrica (b) entre los pacientes durante las seis sesiones. (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).*

Como se ha visto en este capítulo, se demuestra en base a los resultados de los experimentos que KineActiv es aceptado en términos de usabilidad y, por otro lado, muestra una alta precisión y consistencia en las mediciones. Se observa también que a medida que se realiza un uso prolongado en el tiempo, la mayoría de los usuarios, evolucionan favorablemente cumpliendo objetivos marcados y mostrando una mejoría en el movimiento.

Como continuación del proceso de experimentación y validación del sistema realizado, el siguiente capítulo se centra en los experimentos realizados en la versión desarrollada para la tercera edad.



## 7 Evaluación experimental de KineActiv para envejecimiento activo

Para la realización de los experimentos de las personas mayores se creó un conjunto totalmente distinto al correspondiente en la otra versión, ya que, como es evidente, el perfil de los participantes es completamente diferente (personas mayores sin lesiones diagnosticadas), así como la interfaz gráfica de usuarios, en particular, la forma de mostrar los objetivos y resultados. En esta sección se explicará un nuevo diseño experimental adaptado a la nueva muestra, así como los test de usabilidad que se realizaron a través de encuestas con sistemas de puntuación, siguiendo los estándares del modelo SUS (*System Usability Scale / Escala de Usabilidad de Sistema*). Además, se presentarán resultados de rendimiento y una discusión de los resultados obtenidos de los estudios.

### 7.1 Diseño experimental

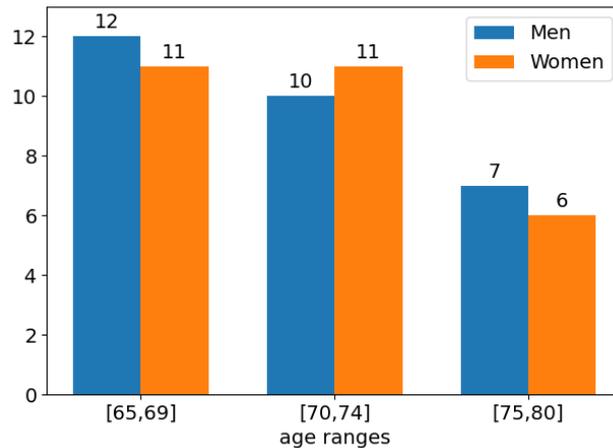
Los experimentos tenían la intención de cumplir un doble propósito: medir el grado de aceptación del sistema por parte de las personas mayores y evaluar la efectividad del sistema para guiar a los ancianos en la realización de los ejercicios y para medir su rendimiento físico. La aceptabilidad se juzgó a través de una encuesta de usabilidad de nueve preguntas, mientras que la efectividad del sistema, en términos de progreso estadísticamente verificado del logro físico durante una serie de sesiones con dificultad creciente.

El criterio clave para establecer que se cumplen las expectativas será la presencia de mejoras estadísticamente significativas entre las mediciones (respuestas a la encuesta, logros físicos) repartidas en un período de 15 días.

Cada participante participó en seis sesiones durante una estancia de 15 días en un centro especializado en el cuidado de personas mayores, completando la misma rutina física y la misma encuesta en cada sesión. Una vez realizada la rutina, se pidió a los participantes que completaran la encuesta para evaluar si su percepción del sistema cambiaba en función de la cantidad de veces que lo usaban.

A continuación, se presenta el perfil demográfico de los participantes, los fundamentos del estudio de aceptabilidad, los ejercicios físicos utilizados para medir la eficacia del sistema, y las pruebas estadísticas que establecerán la significación de los resultados.

El estudio involucró a 57 participantes de entre 65 y 80 años, de los cuales 29 eran hombres y 28 eran mujeres. La Ilustración 61 muestra la distribución de hombres y mujeres por rangos de edad. Como se observa, el número de hombres y mujeres en cada rango de edad se mantiene equilibrado.



*Ilustración 61 - Distribución de los participantes por rango de edad (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).*

Para participar en el estudio, se eligieron personas sin trastornos neurológicos ni físicos, ya que el objetivo es evaluar rutinas para mejorar las capacidades físicas en adultos mayores sanos. Los participantes firmaron un formulario de consentimiento por escrito, aceptando participar en el estudio siempre que sus datos personales permanezcan confidenciales y seguros de acuerdo con las regulaciones actuales.

## 7.2 Usabilidad

El estudio de aceptabilidad se formuló en términos de una encuesta de usabilidad, la cual se diseñó teniendo en cuenta tanto la conocida Escala de Usabilidad del Sistema (SUS) (Shin, Ryu, & Jang, 2014) como algunas categorías populares: satisfacción, facilidad de uso, felicidad, importancia y utilidad. Debido al hecho de que el modelo SUS (véase Tabla 6) carece de exclusiones mutuas (p. ej. los puntos 2 y 8) y contiene preguntas tanto negativas como positivas (por ejemplo, los puntos 2 y 3), se descartó su uso directo. Ambos factores podrían añadir una complejidad innecesaria a un cuestionario dirigido a usuarios mayores. La encuesta resultante se resume en la Tabla 7, donde cada pregunta está relacionada con una categoría y con uno o más ítems del SUS.

En aras de la coherencia con respecto a la comprensión del usuario, todas las preguntas se enmarcaron en términos positivos y se calificaron de 1 a 5, y cada puntuación representó el acuerdo del usuario con la cuestión / afirmación relacionada. De esta manera, la Tabla 7 propone un cuestionario más sencillo, consistente y completo que una simple adaptación del modelo SUS. Como se puede ver, incluye preguntas para juzgar la importancia de los entornos gamificados y el valor del sistema para el usuario, que son aspectos que no se consideran en la plantilla original del SUS. Se espera que este diseño contribuya significativamente a recopilar información más confiable de personas con deterioro cognitivo.

Completar la encuesta después de cada sesión nos proporcionó retroalimentación sobre la evolución de la percepción de los participantes sobre la usabilidad y los beneficios terapéuticos, en comparación con el progreso objetivo medido al realizar los ejercicios programados. Las encuestas también tenían por objeto contribuir a detectar las debilidades del sistema e identificar futuras áreas de mejora.

Tabla 6 - Los modelos de la escala de usabilidad del sistema (SUS).

Preguntas	
1	Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia
2	Encontré el sistema innecesariamente complejo
3	Pensé que el sistema era fácil de usar
4	Creo que necesitaría el apoyo de una persona técnica para poder utilizar este sistema.
5	Encontré que las diversas funciones de este sistema estaban bien integradas.
6	Pensé que había demasiada inconsistencia en este sistema.
7	Me imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar este sistema muy rápidamente.
8	Encontré el sistema muy engorroso de usar
9	Me sentí muy seguro usando el sistema
10	Necesitaba aprender muchas cosas antes de poder ponerme en marcha con este sistema.

Tabla 7 - Cuestionario diseñado para el estudio de aceptabilidad. Cada pregunta se clasifica en categorías de usabilidad y está relacionada con los elementos del SUS.

Pregunta	Categoría	Cobertura SUS
<b>Volvería a usar el sistema</b>	Satisfacción	1
<b>He entendido correctamente los mensajes mientras hacía el ejercicio</b>	Facilidad de uso	2,3,7,8
<b>Las imágenes han sido suficientemente explicativas y me han ayudado a corregir mi postura.</b>	Facilidad de uso	2,3,7,8
<b>Las reglas de los juegos son claras y comprensibles</b>	Facilidad de uso	2,3,7,8
<b>Fue fácil para mí seguir las instrucciones de los ejercicios.</b>	Facilidad de uso	2,3,7,8,10
<b>En futuras ocasiones podría usar el sistema sin la supervisión de un fisioterapeuta.</b>	Facilidad de uso	2,3,4,7,8,10
<b>Me he sentido muy bien, y he disfrutado haciendo los ejercicios</b>	Felicidad	9
<b>El uso de juegos en rehabilitación es motivador para mí</b>	Importancia	-
<b>Este tipo de herramientas ayudan a mi recuperación</b>	Utilidad	-

### 7.3 Rendimiento

Se pidió a los pacientes que realizaran 20 tipos de ejercicios diferentes de hombro que cubrieron los movimientos de flexión, abducción y rotación de las articulaciones y seis tipos de ejercicios distintos de rodilla que cubrieron la retracción, la extensión y la protracción. Cada usuario realizaba en cada sesión una serie de ejercicios en función de su condición física, que podría incluir diferentes combinaciones de ejercicios, sin que todos tuvieran el mismo patrón, en base a sus patologías. Los participantes siempre fueron supervisados por un fisioterapeuta profesional.

Los experimentos se centraron en dos ejercicios particulares para hombro y rodilla, respectivamente, los cuales fueron realizados por todos los participantes en las seis sesiones. Los ejercicios consistieron en la abducción del hombro y la sentadilla de doble pierna. Una rutina

de sesión estándar para ambos ejercicios consistió en tres series, cada una de 10 a 15 repeticiones con ángulos objetivo establecidos por el fisioterapeuta. El sistema monitoreó cada repetición, controló la corrección de movimiento durante la ejecución del ejercicio y midió el ángulo del rango máximo de movimiento.

En el caso de abducción del hombro, el ángulo del brazo con respecto al cuerpo se midió en cada repetición (a mayor ángulo, mayor rendimiento). En el caso de la sentadilla de doble pierna, el ángulo entre el muslo y la parte inferior de la pierna se midió en cada repetición. El rango de movimiento correcto es de 180° (posición vertical) a 90° (los muslos están paralelos al suelo). Por lo tanto, a diferencia del ejercicio del hombro, cuanto menor sea el ángulo, mejor se considera el rendimiento. El ángulo promedio sobre todas las repeticiones de un ejercicio realizado por un participante en una sesión se consideró la medida del rendimiento de ese participante en esa sesión.

Teniendo en cuenta la presencia de valores atípicos y las diferencias notables en las varianzas de la muestra entre sesiones, géneros y rangos de edad, se eligió la prueba U de Mann-Whitney no paramétrica para determinar si puede asumirse (o no) que dos series de resultados provienen de la misma distribución (hipótesis nula  $H_0$ ). Además, para mitigar el impacto de la variabilidad del sujeto, también se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon a las series pareadas. Las implementaciones de las pruebas estadísticas fueron proporcionadas por el módulo `scipy.stats` de la biblioteca de Python SciPy.

## 7.4 Resultados

Los resultados se examinaron desde tres perspectivas diferentes de análisis:

- Análisis de las puntuaciones de la encuesta.
- Análisis de logros físicos.
- Correlaciones entre las puntuaciones de la encuesta y los logros físicos.

Se realizaron estudios por edad y por género bajo las tres perspectivas con el fin de averiguar si alguno de estos factores conlleva diferencias significativas en el grado de aceptación o en la efectividad del sistema. Esta información también podría determinar cómo adaptar la herramienta para acercarla a las expectativas de las personas que se ajustan a un perfil demográfico particular.

Los resultados de la encuesta se analizaron por separado por rango de edad (Ilustración 62) y género (Ilustración 63). En ambas figuras, las distribuciones de puntuaciones por sesiones se muestran a través de diagramas de caja. Las cajas se extienden de los valores del cuartil  $Q_1$  (25 % de los datos) al  $Q_3$  (75 % de los datos), las marcas naranjas ilustran las ubicaciones de las medianas  $Q_2$ , los bigotes se han establecido en los percentiles 10 y 90, y los valores extremos están representados por puntos más allá de los bigotes.

La Ilustración 62 muestra la evolución de las distribuciones de puntuaciones de la encuesta a lo largo del tiempo para cada rango de edad considerado. Al centrarse en el diagrama correspondiente al rango [65, 69], se observa una serie creciente de medianas de distribución (marcas naranjas), lo que sugiere una aprobación progresiva de la herramienta por parte de los participantes de estas edades a lo largo del tiempo. En los otros dos rangos, la serie de medianas no mostró un comportamiento regular en las primeras sesiones, pero ambas series terminaron mostrando altos valores de aceptación (4-5) de todos los participantes en las sesiones 5 y 6. Las

pequeñas variaciones de las distribuciones de las sesiones 5 y 6 en los tres diagramas (representadas por recuadros estrechos) significan que los participantes acordaron asignar puntuaciones altas de aceptación (4-5) a todas las preguntas de la encuesta.

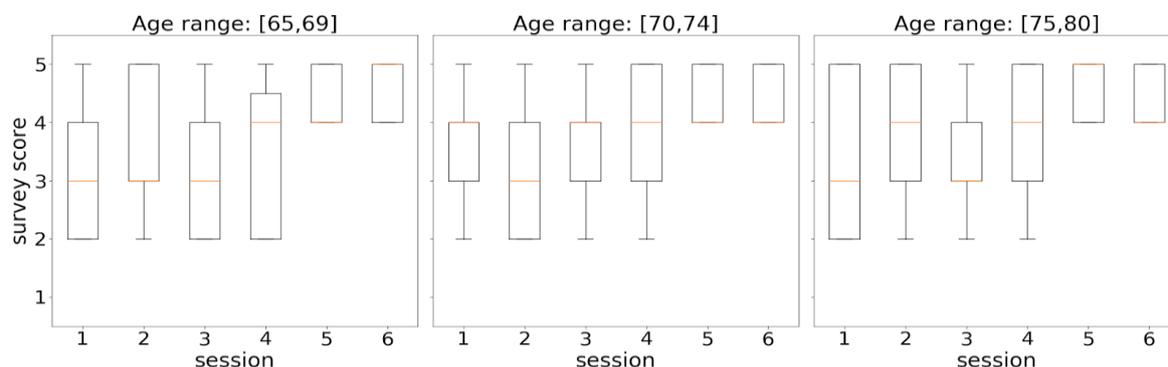


Ilustración 62 - Distribuciones de las respuestas a la encuesta por sesión desde una perspectiva de edad (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

Las diferencias observadas se evaluaron estadísticamente tomando como puntos de referencia las sesiones 2, 4 y 6. Estas sesiones fueron elegidas para discernir mejor las tendencias en la evolución del grado de aceptación del sistema, evitando así la inestabilidad inherente a las mediciones consecutivas en series temporales, así como posibles malentendidos de la primera sesión. La Tabla 8 resume los valores  $p$  obtenidos al contrastar las sesiones seleccionadas utilizando las pruebas  $U$  de Mann-Whitney y Wilcoxon. Las diferencias no fueron relevantes (para  $\alpha = 0,05$ ) entre las sesiones 2 y 4, pero sí fueron muy significativas entre las sesiones 4 y 6, donde el margen para rechazar la hipótesis nula (que no establece diferencia) se reduce claramente con el aumento de la edad. Es decir, hasta la sesión 4, no hubo cambios significativos en las puntuaciones asignadas a las preguntas de la encuesta de usabilidad, lo que sugiere dudas iniciales en el uso del sistema. Por el contrario, los incrementos altamente significativos en la evaluación del sistema encontrados en la sesión 6 indican que los participantes finalmente entendieron y disfrutaron del sistema.

Tabla 8 - Pruebas estadísticas ( $U$  de Mann-Whitney/Wilcoxon) para evaluar los cambios en las respuestas de la encuesta a lo largo del tiempo (sesiones 2, 4 y 6). Los valores de  $p$  en negrita representan diferencias significativas para  $\alpha = 0,05$ .

p-Valores	Sesión 2 vs. Sesión 4	Sesión 4 vs. Sesión 6
[65, 69]	0,96 / 0,99	<b><math>3,2 \times 10^{-22}</math> / <math>3,2 \times 10^{-21}</math></b>
[70, 74]	0,08 / 0,12	<b><math>6,8 \times 10^{-16}</math> / <math>2,0 \times 10^{-16}</math></b>
[75, 80]	0,20 / 0,25	<b><math>7,4 \times 10^{-10}</math> / <math>2,9 \times 10^{-10}</math></b>

La Ilustración 63 muestra las distribuciones de puntuación de las preguntas respondidas por mujeres (izquierda) y hombres (derecha) en las seis sesiones programadas a lo largo del tiempo. A primera vista, los diagramas revelan diferencias entre ambas series de puntuaciones. La serie de medianas (marcas naranjas) en la vista femenina (izquierda), que puede interpretarse como una serie de la puntuación media que las mujeres dieron al sistema, muestra una tendencia claramente creciente. La misma serie en la vista masculina (derecha) muestra un comportamiento más irregular. Sin embargo, ambas series de medianas finalmente convergieron a la puntuación máxima (5) en la sexta sesión.

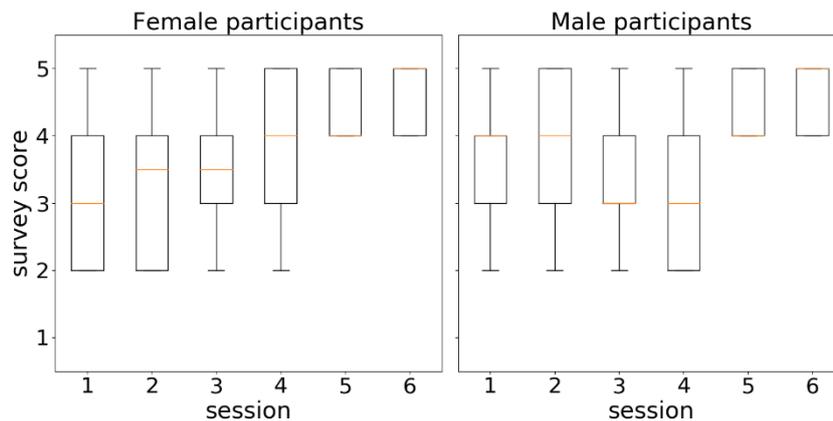


Ilustración 63 - Distribuciones de las respuestas a las encuestas por sesión desde una perspectiva de género (Fuentes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

La Tabla 9 incluye los valores  $p$  resultantes de la aplicación de las dos pruebas estadísticas no paramétricas ( $U$  de Mann-Whitney y Wilcoxon) en la evaluación de las diferencias entre las distribuciones de puntuación de las sesiones 2 y 4 y de las sesiones 4 y 6. La prueba  $U$  de Mann-Whitney identificó ganancias significativas (valor  $p < 0,05$ ) en las puntuaciones femeninas de la sesión 2 a 4 y de la sesión 4 a la 6, mientras que en el caso de las puntuaciones masculinas, los únicos cambios que se encontraron significativos fueron aquellos identificados entre las sesiones 4 y 6. La prueba de Wilcoxon confirmó los cambios significativos entre las sesiones 4 y 6. El hecho de que la prueba  $U$  de Mann-Whitney encontrara significativas las dos transiciones estudiadas (2-4, 4-6) en la serie de puntuaciones femeninas, en lugar de una sola transición (4-6) en la serie de puntuaciones masculinas sugiere una aceptación más progresiva del sistema por parte de las mujeres.

Tabla 9 - Pruebas estadísticas ( $U$  de Mann-Whitney/Wilcoxon) para evaluar los cambios en las respuestas de la encuesta a lo largo del tiempo (sesiones 2, 4, 6). Los valores de  $p$  en negrita representan diferencias significativas para  $\alpha = 0,05$ .

p-Valores	Sesión 2 vs. Sesión 4	Sesión 4 vs. Sesión 6
Femeninos	<b>0,042</b> / 0,054	<b>7,9 x<sup>10-17</sup></b> / <b>1,3 x<sup>10-19</sup></b>
Masculinos	0,166 / 0,183	<b>1,8 x<sup>10-30</sup></b> / <b>9,7 x<sup>10-27</sup></b>

Como se describió anteriormente, cada participante intervino en seis sesiones durante 15 días, realizando dos rutinas físicas (abducción de hombros y sentadilla de doble pierna) en cada sesión, con cada rutina compuesta por entre de 10 y 15 repeticiones destinadas a alcanzar un ángulo objetivo. Este ángulo objetivo varió entre los diferentes pacientes, debido a que cada uno tiene unas condiciones físicas particulares, con lo que el ángulo objetivo es personal para cada uno y no tiene por qué coincidir. Además, este ángulo, puede ir variando a lo largo de las sesiones que se realizan a lo largo del tiempo. Durante la ejecución de cada repetición, el sistema controló la corrección del ejercicio y midió el ángulo del rango máximo de movimiento. El ángulo promedio sobre todas las repeticiones se consideró el logro físico del participante para la rutina y la sesión involucrada. Los datos de rendimiento físico recopilados en este estudio están disponibles públicamente en <http://bit.ly/386bEDQ>. Los datos pueden consultarse en un archivo CSV que comprende los ángulos promedio calculados para cada participante, ejercicio y sesión.

Asumiendo técnicas de medición precisas (Flynn & Lange, 2010), el sistema se considerará efectivo o válido con respecto al objetivo de guiar a los usuarios mayores en la realización de ejercicios físicos si es posible verificar estadísticamente el progreso en el logro físico de los

participantes a lo largo de las sesiones (a lo largo del tiempo), considerando sus ángulos promedio en los ejercicios y sesiones involucradas.

Al igual que en la perspectiva de análisis anterior (puntuaciones de encuestas de aceptabilidad), el rendimiento físico de los participantes se estudió tanto en términos de edad (Ilustración 64) como en términos de género (Ilustración 65). Cada diagrama de caja representa la distribución de ángulos promedio calculados para una rutina física en una sesión en particular.

La Ilustración 64 muestra la evolución de los logros físicos (ángulos promedio) a lo largo de las sesiones para cada ejercicio: abducción de hombros en la fila superior y sentadilla de doble pierna en la fila inferior. Como se explica en la Sección 3.3, cuanto mayor sea el ángulo en la abducción del hombro, mejor será el rendimiento, mientras que, en el caso de la sentadilla de doble pierna, cuanto menor sea el ángulo, mejor será el rendimiento. Se observa un patrón de comportamiento común en ambos ejercicios, que se puede resumir de la siguiente manera: (1) hay un progreso continuo en el rendimiento físico para los tres rangos de edad a lo largo de las sesiones; (2) los logros absolutos disminuyen con la edad; (3) la mejora en los logros (diferencias entre dos sesiones consecutivas) aumenta con la edad. El último punto es particularmente importante, ya que sugiere que los beneficios de usar el sistema aumentan con la edad.

También es notable que la mayoría de las distribuciones (diagramas de caja) son muy compactas. Este patrón, observado anteriormente en (Flynn & Lange, 2010), confirma la precisión del sistema en el seguimiento y la medición del movimiento, particularmente en este contexto en el que se supone que los adultos mayores tienen movimientos menos regulares y coordinados.

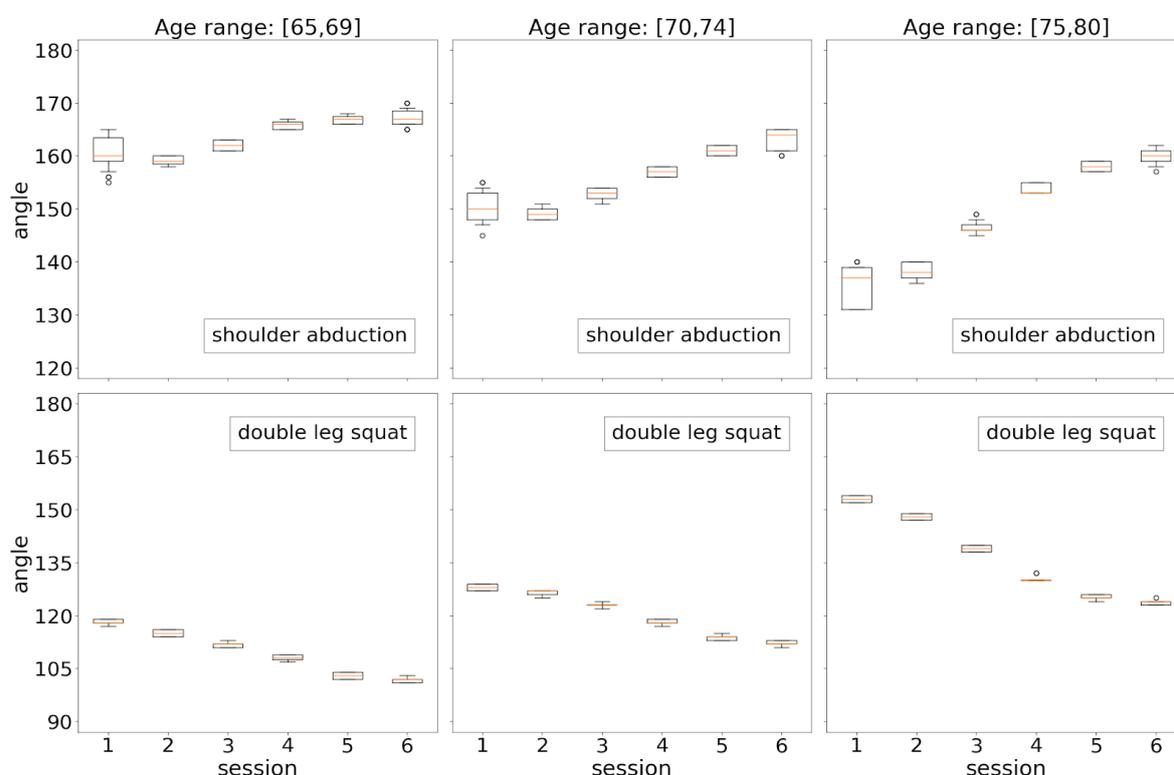


Ilustración 64 - Distribuciones de los resultados del ejercicio por sesión desde una perspectiva de edad (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

Se realizaron dos análisis estadísticos basados en las pruebas  $U$  de Mann-Whitney y de rangos con signo de Wilcoxon a partir de los resultados resumidos en la Ilustración 64:

- Para cada combinación de un ejercicio dado y un rango de edad dado (es decir, cada gráfica de la Ilustración 64), las diferencias entre las distribuciones (sesión 2, sesión 4), (sesión 2, sesión 6) y (sesión 4, sesión 6) fueron validadas estadísticamente tanto por la prueba U de Mann-Whitney como por la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. Todos los valores  $p$  resultantes de la aplicación de ambas pruebas en todos los escenarios fueron holgadamente inferiores a  $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ , lo que demuestra las mejoras significativas en el rendimiento físico con el paso de las sesiones. Tenga en cuenta que esto se verifica en todos los rangos de edades en los dos tipos de ejercicios.
- Para cada tipo de ejercicio, las diferencias entre cada par de sesiones análogas en grupos de edad consecutivos se evaluaron estadísticamente mediante la prueba  $U$  de Mann-Whitney (en este escenario, la prueba de rango con signo de Wilcoxon no es aplicable). Esto tuvo como objetivo averiguar si el sistema detecta diferencias significativas en el rendimiento físico de dos grupos de edad contiguos en la misma sesión. Aunque todos los valores de  $p$  fueron sensiblemente inferiores a  $\alpha = 1 \times 10^{-3}$  (verificación rigurosa de cambios significativos), las diferencias más relevantes se encontraron entre los grupos 65-69 y 70-74 con respecto a las diferencias entre los grupos 70-74 y 75-80. Más allá de confirmar el empeoramiento esperado de la condición física con la edad, estos resultados proporcionan una clara evidencia a favor del valor del sistema como una herramienta doméstica para ayudar a los adultos mayores de diferentes edades a realizar rutinas de envejecimiento activo.

La Ilustración 65 muestra la evolución de la condición física desde una perspectiva de género. Las diferencias se analizaron a través de los mismos estudios estadísticos descritos anteriormente. Se encontraron diferencias muy significativas (valores  $p < 1 \times 10^{-4}$ ) en todas las comparaciones que involucraron sesiones pares (2, 4 y 6) dentro de cada gráfica (un género y un ejercicio), mostrando la mejora continua en el logro físico también desde la perspectiva de cada género. Por el contrario, no se encontraron diferencias significativas entre los resultados de mujeres y hombres en ninguna sesión de cualquier ejercicio.

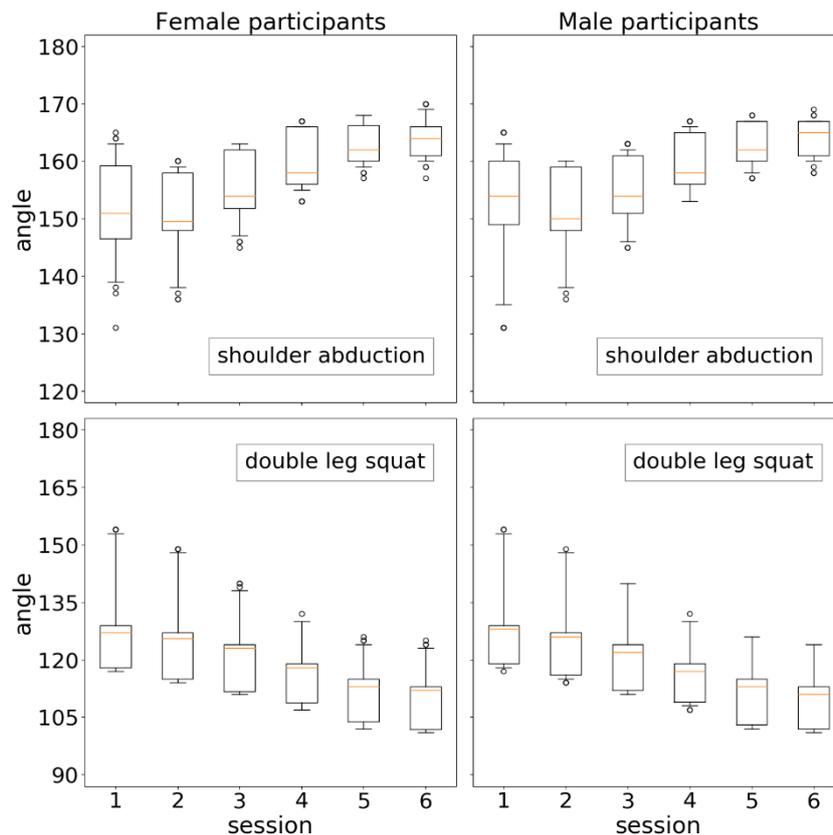


Ilustración 65 - Distribución de los resultados del ejercicio por sesión desde una perspectiva de género (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019).

El último estudio evalúa la relación entre el beneficio percibido (puntuaciones de la encuesta) y el beneficio medido (logros físicos). Dado un subconjunto de participantes que cumplen con determinados criterios de edad o género y un ejercicio en particular, la dependencia estadística entre la serie de medianas de las puntuaciones de sus encuestas y la serie de sus ángulos promedio medidos por el sistema en todas las sesiones se evaluó mediante el coeficiente de correlación de rango de Spearman. Por ejemplo, en el caso de las 23 personas con edades en el rango [65, 69] y uno de los dos ejercicios considerados, ambas series estaban compuestas por 138 elementos (23 personas x 6 sesiones). El método de Spearman es una medida no paramétrica de la correlación de rango entre dos variables, que no asume nada sobre la distribución de las variables o sobre la naturaleza de la relación entre ellas.

Las Tabla 10 y Tabla 11 muestran los coeficientes de correlación de rango de Spearman correspondientes a las series de datos determinadas por rangos de edad y géneros, respectivamente. Se obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas en todos los escenarios, aunque fueron menos relevantes (valores  $p$  más altos) en el análisis por género. Este es un resultado esperado, porque las personas del mismo sexo involucran a todas las edades consideradas en el estudio, de 65 a 80 años. Las correlaciones más débiles determinadas por los valores  $p$  más grandes ocurrieron para las edades mayores [75, 80] y para los participantes masculinos. Por el contrario, en mujeres de 65 a 69 años, se obtuvo una correlación de  $-0,70$  (valor  $p = 7,0 \times 10^{-11}$ ) a partir de sus resultados en la sentadilla de doble pierna, demostrando un alto nivel de coincidencias entre las respuestas al cuestionario y los logros físicos. El signo menos en este ejercicio significa que un ángulo más pequeño corresponde a un mejor rendimiento. Los resultados anteriores demuestran que las personas mayores, a pesar de su

escasa formación tecnológica, pueden aprovechar positivamente las herramientas multimedia destinadas a fomentar el envejecimiento activo si experimentan beneficios visibles.

*Tabla 10 - Coeficientes de correlación de rango de Spearman (valores p) para evaluar la dependencia estadística entre las puntuaciones de las respuestas a la encuesta y los logros físicos por rango de edad.*

	<b>[65, 69]</b>	<b>[70, 74]</b>	<b>[75, 80]</b>
Abducción del hombro	0,50 ( $6,3 \times 10^{-10}$ )	0,56 ( $1,4 \times 10^{-11}$ )	0,43 ( $7,3 \times 10^{-5}$ )
Sentadilla de doble pierna	-0,57 ( $4,3 \times 10^{-13}$ )	-0,55 ( $4,1 \times 10^{-11}$ )	-0,48 ( $9,4 \times 10^{-6}$ )

*Tabla 11 - Coeficientes de correlación de rango de Spearman (valores p) para evaluar la dependencia estadística entre las clasificaciones de las respuestas a la encuesta y los logros físicos por género.*

	<b>Femenino</b>	<b>Masculino</b>
Abducción del hombro	0,37 ( $9,2 \times 10^{-7}$ )	0,35 ( $3,0 \times 10^{-6}$ )
Sentadilla de doble pierna	-0,34 ( $5,1 \times 10^{-6}$ )	-0,27 ( $2,6 \times 10^{-4}$ )

A modo de resumen, se muestra que al igual que ocurría en la versión de rehabilitación, el sistema tiene una aceptación mayoritaria entre los encuestados a nivel de usabilidad y confiabilidad. Esto es sumamente importante debido a la tipología de los usuarios, pues es un núcleo poblacional que no tiene la tecnología tan asimilada como otros sectores. En cuanto a la ejecución de los ejercicios, se observan también resultados positivos en ambos géneros, siendo las mujeres las que más aceptan tanto la tecnología como la ejecución de los ejercicios.

## 8 Conclusiones

En esta última sección se exponen las conclusiones tras la investigación realizada y sistema desarrollado, así como las principales contribuciones que se aportan ya sea a la comunidad científica o a la sociedad. Además, se proponen líneas de desarrollo futuro, tanto a nivel académico como en términos de posibles evoluciones del sistema a otros ámbitos de aplicación ya que, como se ha demostrado, la misma base tecnológica y de conocimientos puede adaptarse a la solución de tareas de control y evaluación del movimiento totalmente dispares.

### 8.1 Principales contribuciones

A lo largo de toda esta tesis se ha presentado un sistema interactivo basado en cámaras RGB-D, el sistema KineActiv, que propone un enfoque holístico para la rehabilitación de los miembros superiores. En este sentido KineActiv proporciona:

- Modelos avanzados de interacción. Una interfaz de usuario gamificada y de realidad aumentada diseñada para reemplazar a los fisioterapeutas en la supervisión de los ejercicios de las extremidades superiores. El sistema guía a los pacientes a través de juegos personalizados en escenas de realidad aumentada, cuyo objetivo es alentar a los pacientes a lograr una serie de objetivos establecidos por el fisioterapeuta.
- Monitorización y control preciso de movimientos del cuerpo. KineActiv rastrea y mide los movimientos de las extremidades, los compara con los objetivos y proporciona información en tiempo real a los pacientes sobre si el ejercicio está cumpliendo los objetivos esperados. Nuestro enfoque incluye una plataforma web que le permite al especialista monitorear el progreso de los pacientes por medio de estadísticas, tablas y gráficos. El objetivo principal ha sido crear entornos interactivos, fáciles de usar y divertidos que favorezcan procesos de rehabilitación más efectivos y rápidos, manteniendo a los pacientes comprometidos.
- Alto grado de aceptación de los usuarios. Los resultados prueban empíricamente que KineActiv es un sistema utilizable, agradable y eficaz, que no provoca ningún sentimiento negativo ni de rechazo.

Estas capacidades de interacción, monitorización y control en tiempo real satisfacen los objetivos 1 y 2 descritos en la sección 1.2, los cuales establecen el alcance tecnológico principal del sistema.

Así mismo, se ha propuesto una metodología y herramientas de evaluación experimental. Se realizaron dos estudios para evaluar KineActiv en base a la experiencia de diez pacientes. En primer lugar, se diseñó un cuestionario de usabilidad para medir tanto la usabilidad como el flujo al utilizar los entornos gamificados. En segundo lugar, se realizó un estudio de funcionalidad para establecer la precisión y la sensibilidad de KineActiv, examinando la distribución de cuatro medidas de ejercicios de extremidades sobre pacientes en función de la sesión de rehabilitación.

Por otro lado, con la evolución del sistema se ha presentado una aplicación interactiva para ayudar a los adultos mayores en la realización de ejercicios físicos en entornos domésticos, donde cabe destacar las siguientes contribuciones,

- El sistema combina las capacidades de adquisición de un sensor Kinect RGB-D con el potencial de comunicación de la gamificación y la realidad aumentada. Estas tecnologías interactivas han demostrado su eficacia en el contexto del envejecimiento saludable, siempre que los elementos interactivos resultantes se adapten a las habilidades y preferencias de las personas mayores y proporcionen una retroalimentación útil sobre el progreso objetivo de su condición física.
- Los experimentos llevados a cabo estaban orientados a un doble propósito, medir el grado de aceptación del sistema por parte de las personas mayores y evaluar la eficacia del sistema para medir el rendimiento físico de los usuarios mayores al realizar los ejercicios prescritos.
- La aceptabilidad y la eficacia del sistema se midieron en términos de una encuesta de usabilidad y el progreso del logro físico verificado estadísticamente durante una serie de sesiones con objetivos de complejidad creciente. Se consideraron tres áreas de análisis: puntuaciones de encuestas, logros físicos y correlaciones entre puntuaciones y logros físicos. Los estudios por edad y sexo se realizaron por separado. Los resultados sugieren varias conclusiones importantes:
  - El análisis estadístico de las puntuaciones de la encuesta mostró una aceptación progresiva de la herramienta por parte de los usuarios mayores.
  - Las pruebas estadísticas demostraron una mejora continua en la medición de los logros físicos en todos los rangos de edad y ambos géneros en los dos tipos de ejercicios. Sin embargo, el mayor progreso a lo largo de las sesiones se observó en el grupo de personas de mayor edad [75, 80].
  - Se obtuvieron coeficientes de correlación entre los beneficios percibidos, expresados a través de puntuaciones de encuestas, y los beneficios verificables, en términos de medidas objetivas de logros físicos. Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas en todos los escenarios, aunque las más relevantes se observaron en el grupo de mujeres de edad [65, 69].

Los protocolos y resultados experimentales antes descritos acreditan el cumplimiento de los objetivos 3, 4 y 5 definidos en la sección 1.2, los cuales fueron concebidos para garantizar que el sistema resultase fácil de usar por parte de usuarios con poca experiencia en el uso de tecnologías, y que fuese capaz de motivar lo suficiente para mejorar la adherencia a los tratamientos.

En resumen, el sistema interactivo basado en sensores RGB-D propuesto ha demostrado ser una herramienta valiosa para promover actividades de envejecimiento saludable, lo que permite mejoras físicas medibles en usuarios mayores a través de atractivas interfaces de usuario adaptadas a las características de las personas mayores.

## 8.2 Conclusiones finales

En base a todos los datos que hemos recabado a lo largo de la tesis, así como a todos los resultados experimentales y evaluaciones realizadas, podemos concluir que, tanto el sistema KineActiv para la rehabilitación de miembros lesionados, como el proyecto KineActiv adaptado a las personas mayores es efectivo en ambos casos. Además, no sólo han resultado herramientas

útiles en determinados contextos de aplicación, sino que se consideran necesarias en sociedades cada vez más complejas, interconectadas y envejecidas, tanto a corto como a medio plazo.

Como resumen de las principales conclusiones finales cabe destacar las siguientes:

- Aumento de la efectividad en tratamientos de rehabilitación. Por un lado, se confirma que el resultado de la rehabilitación es mucho más efectivo, teniendo además un control de todos los ejercicios ejecutados en tiempo real, durante todo el proceso, y creando una batería de datos sumamente importantes para el profesional de la salud, que le permiten valorar y personalizar la rehabilitación de todos y cada uno de sus pacientes. Además, el hecho de incluir tecnologías como realidad aumentada y gamificación en el diseño de interfaces avanzadas para la realización de ejercicios, promueve una mayor adherencia al tratamiento, disfrute y entretenimiento por parte de los pacientes, algunos de los cuales incluso mostraban su intención de continuar con las sesiones de rehabilitación una vez que habían terminado los ejercicios prescritos.

- Mejora del estado físico y emocional. Por otro lado, se ha verificado, siendo un hecho evidente, que el deporte es salud, que la actividad física diaria mejora la condición física de los usuarios, haciéndolos más resistentes al paso del tiempo, manteniendo a la persona más fuerte y activa, evitando así en la medida de lo posible los efectos del envejecimiento y la fragilidad. De esta manera, una persona activa mantendrá mejor tono muscular, mejor coordinación y, por ende, una vida más autónoma. Estas mejoras en la calidad de vida individual repercuten positivamente en la familia y, de manera transversal, en las administraciones públicas y servicios de residencia, pues una persona dependiente siempre genera unos costes asistenciales, tanto económicos como personales.

Uno de los principales problemas que nos hemos encontrado con el uso del sistema KineActiv por personas mayores es el denominado barrera tecnológica inicial, que, en determinadas personas, dependiendo de las circunstancias que han vivido y su entorno sociocultural, puede producir un cierto rechazo o miedo a las nuevas tecnologías. De ahí que debamos tener un especial cuidado en considerar las circunstancias de un nuevo usuario mayor del sistema, al proponerle su uso por primera vez. No obstante, con un trato sensible, una guía precisa y acompañando a nuevos usuarios en las primeras interacciones, observamos que, rota esa primera barrera, las personas se muestran mucho más agradecidas, abiertas a la experiencia, y manifiestan una mayor aceptación e incluso ilusión a la hora de hacer uso del sistema.

Finalmente, a título personal, he de añadir la enorme satisfacción que se obtiene al ver que el sistema es útil y que proporciona un beneficio para las personas que lo usan, mejorando su calidad de vida y por ende su felicidad, algo que con otro tipo de desarrollos que he realizado a lo largo de mi vida profesional, no ha sido posible.

### 8.3 Líneas de trabajo futuro

Quedan varias cuestiones para futuras investigaciones. El sistema está abierto a nuevos ejercicios y juegos asociados para rehabilitar cualquier parte del cuerpo, así como para mejorar la calidad de los juegos con mejores gráficos y objetivos más atractivos. Por ejemplo, sería interesante realizar concursos entre pacientes con lesiones similares, con el fin de mantener la adherencia al tratamiento.

Otras líneas de desarrollo futuras se podrían centrar en implementar métodos de autenticación más intuitivos basados en características biométricas (p. ej. rostro, voz), métodos de interacción basados en comandos de voz y rutinas de entrenamiento adaptativas en las que las actividades y los objetivos se ajustan automáticamente de acuerdo con la progresión del usuario.

El trabajo y sistema desarrollado en esta tesis permiten imaginar un mundo de posibilidades muy diversas, ya que lo que empezó siendo una herramienta de rehabilitación para miembros lesionados, se transformó en un proyecto que mejora el tono muscular y las capacidades cognitivas de las personas mayores, contribuyendo así a minimizar la fragilidad o prefragilidad de este colectivo.

De esta manera, además de seguir consolidando las líneas que ya se han abierto, creando nuevos ejercicios, mejorando las interfaces, creando nuevos elementos motivadores y adaptando las nuevas tecnologías que sigan apareciendo, se abren nuevas oportunidades tales como la evaluación de la fragilidad de las personas mayores, ya que ese punto no lo tratamos en el desarrollo actual, sino que ya viene diagnosticado por un profesional de la salud que ha llevado a cabo determinadas pruebas que han dado como resultado un nivel de fragilidad que, posteriormente, es tratado con el sistema actual.

Si pudiéramos incluir el paso previo de determinar el nivel de fragilidad de una persona, siempre supervisado por un profesional de la salud, seríamos capaces de proponer automáticamente el tratamiento posterior, adaptándolo desde la primera sesión y posteriormente, a través de la inteligencia artificial, modificar y prescribir ejercicios que mejoren la parte de la condición física que se muestre más débil de manera automatizada, con la configuración de ejercicios personalizados a cada usuario, antes de que se deteriore más.

Esta misma adaptación a través de las técnicas de inteligencia artificial, la podemos intentar incluir en el proyecto de rehabilitación, el cual crearía programas adaptados a cada paciente, haciendo que su rehabilitación sea más rápida y eficaz.

Por otro lado, podemos ampliar este conocimiento adquirido para abrir nuevas líneas de investigación, incluyendo ejercicios de mejora postural, así como a ámbitos más específicos como posturas de yoga o musculación, haciendo que el usuario cada vez aumente más su percepción corporal y realice ejecuciones de movimientos más precisos, con los beneficios que ello conlleva en términos de salud y rendimiento.

Además, también existe la posibilidad de abrir otra línea de investigación orientada a la mejora de habilidades físicas y cognitivas, tales como reflejos, ejercicios de acción-reacción, medición de tiempos de respuesta a estímulos, etc. Estas actividades estarían orientadas a mejorar la coordinación y los reflejos de las personas que usen el sistema.

Como se puede apreciar, las posibilidades son muchas y muy amplias, permitiendo crear varios equipos de personas multidisciplinares que usen una base de conocimiento común y creen desarrollos que sean vitales para la mejora de la salud y condición física y cognitiva de las personas.

Al margen de estas oportunidades, entre las líneas futuras de trabajo no se ha tenido en cuenta un elemento importantísimo que puede considerarse una de las claves del actual desarrollo, que es el uso de cámaras 3D basadas en tecnologías más recientes. Aunque se está avanzando mucho dentro de esa línea, aún no es posible vislumbrar su potencial real de

aplicación y si fuese posible un desarrollo de estos sistemas mucho más pequeño y accesible a toda la sociedad de una manera mucho más cómoda, como pudiera ser, por ejemplo, una integración con televisores inteligentes u otro dispositivo más popular y menos invasivo.

Estas aplicaciones también podrían combinarse con otros elementos o sistemas que nos permitan conocer las constantes vitales de los usuarios en tiempo real y ver cómo cambian durante la actividad, pudiendo conocer también en tiempo real si existe algún problema que pudiera requerir la atención urgente de un profesional de la salud.

## 9 Acciones de difusión de resultados

A lo largo de todo el proceso de doctorado se han llevado a cabo exposiciones, publicaciones y pruebas de especial relevancia que complementan y elevan el valor de todo el trabajo.

Por un lado, se han publicado varios artículos con experimentos y resultados que pueden ser consultados a través de Google Scholar, tales como:

- A RGBD-Based Interactive System for Gaming-Driven Rehabilitation of Upper Limbs (Fuertes Muñoz, Mollineda, Gallardo Casero, & Pla, 2019). Este trabajo presenta el sistema de ayuda a la rehabilitación, y ha sido previamente introducido en este documento.
- Usability study of a kinect-based rehabilitation tool for the upper limbs (Fuertes Muñoz, Gallardo Casero, & Mollineda Cárdenas, 2019). En este artículo se expone en detalle el diseño y resultados del estudio de usabilidad dentro del ámbito de la rehabilitación de los miembros superiores.
- A kinect-based interactive system for home-assisted active aging (Fuertes Muñoz, Mollineda Cardenas, & Pla, 2021). En este artículo se explica en el sistema de terapia asistida para personas mayores a través de KineActiv.
- Descripción y evaluación de una herramienta de rehabilitación para los miembros superiores con gamificación y realidad aumentada (Fuertes Muñoz, 2020). Este trabajo describe la herramienta KineActiv, y hace referencia a las primeras actividades de evaluación que se están llevando a cabo para comprobar su usabilidad y utilidad en escenarios reales de explotación.
- Kina: una herramienta para retrasar la fragilidad en personas mayores (Fuertes Muñoz, 2022). Se trata de una evolución del sistema KineActiv concebido para personas mayores, en el que se exponen las experiencias reales de los usuarios en la Residencia San Hermenegildo situada en la ciudad de Teruel.

Además de los artículos expuestos, también se ha asistido y presentado artículos en congresos de carácter internacional como los siguientes:

- Una herramienta de rehabilitación para los miembros superiores con gamificación y realidad aumentada: propuesta y validación inicial (Fuertes Muñoz & Gallardo Casero, 2019). En esta conferencia se realizó una exposición y propuesta inicial del sistema KineActiv.
- El artículo Usability study of a kinect-based rehabilitation tool for the upper limbs (Fuertes Muñoz, Gallardo Casero, & Mollineda Cárdenas, 2019), fue resultado de la asistencia y exposición en el congreso internacional WorldCIST'19, celebrado en La Toja, donde también se realizó una exposición y demostración del sistema KineActiv.
- Finalmente, otro congreso internacional al que se asistió fue el V workshop de jóvenes investigadores en la ciudad de Jaca, donde se publicó el artículo Business models for telemedicine. A research proposal for a future framework (Fuertes

Muñoz & León Soriano, 2017), en el cual se abordó un estudio de modelos de telemedicina y se profundizó en las repercusiones a nivel económico.

Fuera del ámbito de congresos y artículos de investigación, se han realizado exposiciones en el ámbito empresarial a través de la empresa Edison Desarrollos. De esta manera, se ha presentado una vez en la Cámara de Comercio e Industria de Teruel, y dos veces más en la Cámara de Comercio e Industria de Zaragoza. A estos encuentros asistieron empresas relacionadas con el sector de la salud y bienestar social, así como empresas tecnológicas y aseguradoras.

Por otro lado, se han realizado demostraciones y desayunos tecnológicos dentro del clúster de salud de Aragón "Arahealth", al cual pertenece la empresa Edison Desarrollos. A raíz de estas presentaciones, se ha podido llegar a varios acuerdos de colaboración con distintas entidades de salud, como el Hospital MAZ de Zaragoza, el Hospital Universitario Carlos III de Madrid, la mutua de salud ASEPEYO de Barcelona y Fremap en Zaragoza.

Otro de los beneficios de estas presentaciones a través de la Cámara de Comercio e Industria de Teruel y Zaragoza junto con Arahealth ha sido la posibilidad de realizar pruebas reales con la policlínica SAEP de Teruel y el Balneario de Ariño con el sistema KineActiv y acceder a distintas personas para crear experimentos y estudios.

Además, también se han firmado acuerdos con la Residencia San Hermenegildo de Teruel y con la Fundación Rey Ardid, los cuales se han convertido en los primeros testadores del sistema estable KineActiv con posibilidad de adquisición. A estas dos entidades se les ha sumado la asociación ATADI, para personas con deficiencias físicas y cognitivas.

Finalmente, dentro del trabajo realizado, también hay que destacar la colaboración realizada con la Cátedra Cuatroochenta de Inteligencia Artificial, Salud y Bienestar de la Universitat Jaume I, con la que se han llevado a cabo varias actuaciones.

## 10 Bibliografía

- A, M., F, G., & F, P. (2006). Compact laser radar and three-dimensional camera. *J. Opt. Soc. Am. A*, 23(4), 800-805.
- Accenture. (s.f.). *Accenture*. Recuperado el 2020, de <https://www.accenture.com/us-en/insights/song/customer-experience-index>
- Agree, E. (2014). The potential for technology to enhance independence for those aging with a disability. En *Disabil. Health J.* (págs. 33-39).
- Ahmed, M., Espinosa, J., Reissner, A., Domingo, À., Banaee, H., Loutfi, A., & Palou, X. (2015). Self-serve ICT-based Health Monitoring to Support Active Ageing. En *En HEALTHINF* (págs. 374-382).
- Alankus, G., Lazar, A., May, M., & Kelleher, C. (2010). Towards Customizable Games for Stroke Rehabilitation. En *In Proceedings of the CHI 2010: Therapy and Rehabilitation* (págs. 2113-2122). Atlanta, GA, USA.
- Al-Khafajiy, M., Baker, T., Chalmers, C., Asim, M., Kolivand, H., Fahim, M., & Waraich, A. (2019). Remote health monitoring of elderly through wearable sensors. En *Multimed. Tools Appl* (págs. 24681-24706).
- Almasi, S. A. (2022). Kinect-based rehabilitation systems for stroke patients: a scoping review. *BioMed research international*.
- Alsawaier, R. S. (2018). The effect of gamification on motivation and engagement. *The International Journal of Information and Learning Technology*.
- Aoyagi, Y., & Shephard, R. (2011). A model to estimate the potential for a physical activity-induced reduction in healthcare costs for the. En *Sports Med* (págs. 695-708).
- Aparicio García-Molina, V. C.-B. (2010). Beneficios de la actividad física en personas mayores.
- Araya, A. X. (2018). Evaluación de la funcionalidad y fragilidad de las personas mayores asistentes a centros de día. *Revista médica de Chile*, 146(8), 864 - 871.
- Arch, A. (2008). Web accessibility for older users: A literature review. En *In Proceedings of the 2009 International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A)*. Madrid, Spain.
- Bacha, J., Gomes, G., de Freitas, T., Viveiro, L., da Silva, K., Bueno, G., . . . Luna, N. (2018). Effects of Kinect adventures games versus conventional physical therapy on postural control in elderly. En *Games Health J* (págs. 24-36).
- Bai, J., & Song, A. (2019). Development of a Novel Home Based Multi-Scene Upper Limb Rehabilitation Training and Evaluation System for Post-Stroke Patients. En *IEEE Access* (págs. 9667-9677).
- Bai, J., Song, A., Xu, B., Nie, J., & Li, H. (2017). A novel human-robot cooperative method for upper extremity rehabilitation. En *Int. J. Soc. Robot.* (págs. 265-275).
- Bartlett, R. M. (2007). Is movement variability important for. *Sports Biomechanics*, 6(2), 224 - 243.

- Baykal, G. E. (2020). Collaborative technologies for children with special needs: A systematic literature review. *Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems*.
- Betke, M., & Gips, J. (2002). The camera mouse: Visual tracking of body features to provide computer access for people with severe disabilities. En *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng* (págs. 1-10).
- Binder, E., Schechtman, K., Ehsani, A., Steger-May, K., Brown, M., Sinacore, D., . . . Holloszy, J. (2002). Effects of exercise training on frailty in community-dwelling older adults: Results of a randomized, controlled trial. En *J. Am. Geriatr. Soc* (págs. 1921-1928).
- Blažun, H., Saranto, K., & Rissanen, S. (2012). Impact of computer training courses on reduction of loneliness of older people in Finland. En *Comput. Hum. Behav* (págs. 1202-1212).
- BOE. (s.f.). BOE. (Gobierno de España) Recuperado el 2022, de <https://www.boe.es/eli/es/l/1986/04/25/14/con>
- Broeren, J., Bjorkdahl, A., Claesson, L., Goude, D., Lundgren-Nilsson, Å., Samuelsson, H., . . . Rydmark, M. (2008). Virtual rehabilitation after stroke. En *Stud. Health Technol. Inform.*
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. En *Usability Eval. Ind.* (págs. 4-7).
- Cabero-Almenara, J. V.-C.-M. (2018). Uso de la Realidad Aumentada como Recurso Didáctico en la Enseñanza Universitaria. *Formación universitaria*, 11(1), 25-34.
- Cabrera, R., Molina, A., Gómez, I., & García-Heras, J. (2017). Kinect as an access device for people with cerebral palsy: A preliminary study. En *Int. J. Hum. Comput. Stud* (págs. 62-69).
- Cadore, E., Casas-Herrero, A., Zambom-Ferraresi, F., Idoate, F., Millor, N., Gómez, M., . . . Izquierdo, M. (2014). Multicomponent exercises including muscle power training enhance muscle mass, power output, and functional outcomes in institutionalized frail nonagenarians. En *Age* (págs. 773-785).
- Carolina Garcés, U. d. (27 de Mayo de 2021). *Univesidad de Chile*. Recuperado el 2022, de Cuerpo sano y mente sana: La actividad física como aliada de la salud mental: <https://uchile.cl/u176421>
- Chang, Y., Chou, L., Wang, F., & Chen, S. (2013). A Kinect-based vocational task prompting system for individuals with cognitive impairments. En *Pers. Ubiquitous Comput* (págs. 351-358).
- Chapman, S. B. (2013). Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging. *Frontiers in aging neuroscience*, 5(75).
- Chen, M., Huang, L., & Wang, C. (2015). Developing a Digital Game for Stroke Patients' Upper Extremity Rehabilitation—Design, Usability and Effectiveness Assessment. En *Procedia Manuf.* (págs. 6-12).
- Cheng, V. W. (2019). Gamification in apps and technologies for improving mental health and well-being: systematic review. *JMIR mental health*, 6(6).

- Clegg, A., Young, J., Iliffe, S., Rikkert, M., & Rockwood, K. (2013). Frailty in elderly people. En *Lancet* (págs. 752-762).
- Córdoba, L. T. (2018). Hacia una propuesta de diseño de interacción de personas con discapacidad auditiva orientado al desarrollo de software accesible. *Aplicación de Tecnologías de la Información y Comunicaciones Avanzadas y Accesibilidad*.
- Croon, R. D. (2021). A systematic review of the effect of gamification on adherence across disciplines. *International Conference on Human-Computer Interaction*.
- Cross4Health. (s.f.). *Cross4Health*. Recuperado el 2022, de <https://www.cross4health.eu/>
- Cyarto, E., Batchelor, F., Baker, S., & Dow, B. (2016). Active ageing with avatars: A virtual exercise class for older adults. En *In Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI'16)*, (págs. 302-309). New York, NY, USA.
- Da Costa, R., & de Carvalho, L. (2004). The acceptance of virtual reality devices for cognitive rehabilitation: A report of positive results with schizophrenia. En *Comput. Methods Programs Biomed.* (págs. 173-182).
- De Angeli, A., Jovanović, M., McNeill, A., & Coventry, L. (2020). Desires for active ageing technology. En *Int. J. Hum. Comput. Stud.*
- de Melo Cerqueira, T. M. (2020). Cognitive and motor effects of Kinect-based games training in people with and without Parkinson disease: A preliminary study. *Physiotherapy Research International*, 25(1).
- Dehkordi, S. R. (2018). A review of kinect computing research in education and rehabilitation. *Int. J. Eng. Technol.*, 7(3), 19 - 23.
- Edmans, J., Gladman, J., Cobb, S., Sunderland, A., Pridmore, T., Hilton, D., & Walker, M. (2006). Validity of a virtual environment for stroke rehabilitation. En *Stroke* (págs. 2770-2775).
- Elaraby, A. F. (2018). A kinect-based 3d object detection and recognition system with enhanced depth estimation algorithm. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*.
- Erickson, K. I. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(7), 3017-3022.
- Estadística, I. N. (s.f.). *Instituto Nacional de Estadística*. Obtenido de Una población envejecida: [https://www.ine.es/prodyser/demografia\\_UE/bloc-1c.html?lang=es](https://www.ine.es/prodyser/demografia_UE/bloc-1c.html?lang=es)
- Flick, C., Zamani, E., Stahl, B., & Brem, A. (2020). The future of ICT for health and ageing: Unveiling ethical and social issues through horizon scanning foresight. En *Technol. Forecast. Soc. Chang.*
- Flynn, S., & Lange, B. (2010). Games for the rehabilitation: The voice of the players. En *In Proceedings of the Intl. Conf. Disability, Virtual Reality & Associated Technologies (ICDVRAT 2010)* (págs. 185-194). Serpa, Portugal.
- Fofi, D., & Sliwa, T. (s.f.). A comparative survey on invisible structured light. *IUT LeCreusot*.
- Fritz, F. S. (2005). Enhancing cultural tourism experiences with augmented reality technologies.

- Fuertes Muñoz, G. (2020). Descripción y evaluación de una herramienta de rehabilitación para los miembros superiores con gamificación y realidad aumentada. *Revista de la Asociación Interacción Persona Ordenador (AIPO) 1 (1)*, 22-31.
- Fuertes Muñoz, G. (2022). Kina: una herramienta para retrasar la fragilidad en personas mayores. *Actas del XXII Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador. Interacción 2022*. (págs. 143-143). Teruel: Universidad de Zaragoza.
- Fuertes Muñoz, G., & Gallardo Casero, J. (2019). Una herramienta de rehabilitación para los miembros superiores con gamificación y realidad aumentada: propuesta y validación inicial. *Actas del XX Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador, Interacción 2019*. San Sebastián.
- Fuertes Muñoz, G., & León Soriano, R. (2017). Business models for telemedicine. A research proposal for a future framework. *V workshp de jóvenes investigadores* (págs. 22-27). Jaca: Universidad de Zaragoza.
- Fuertes Muñoz, G., Gallardo Casero, J., & Mollineda Cárdenas, R. A. (2019). Usability study of a kinect-based rehabilitation tool for the upper limbs. *New Knowledge in Information Systems and Technologies: Volume 2*, 755-763.
- Fuertes Muñoz, G., Mollineda Cardenas, R., & Pla, F. (2021). A kinect-based interactive system for home-assisted active aging. *Sensors*, 417.
- Fuertes Muñoz, G., Mollineda, R., Gallardo Casero, J., & Pla, F. (2019). A RGBD-Based Interactive System for Gaming-Driven Rehabilitation of Upper Limbs.
- Funaya, H., Shibata, T., Wada, Y., & Yamanaka, T. (2013). Accuracy assessment of Kinect body tracker in instant posturography for balance disorders. En *In Proceedings of the 7th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)* (págs. 213-217). Tokyo, Japan.
- Futurist, M. (s.f.). *Medical Futurist*. Obtenido de <https://medicalfuturist.com/augmented-reality-in-healthcare-will-be-revolutionary/>
- Gallego-Durán, F. J.-A.-C. (2014). *Panorámica: serious games, gamification y mucho más*. Universidad de La Rioja.
- Gao, Y. L. (2015). An empirical study of wearable technology acceptance in healthcare. *Ind. Manage. Data Syst*, 115(9), 1704-1723.
- Garcia-Agundez, A. F. (2019). Recent advances in rehabilitation for Parkinson's Disease with Exergames: A Systematic Review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 16(1), 1 - 17.
- Gil-Gómez, J., Gil-Gómez, H., Lozano-Quilis, J., Manzano-Hernández, P., Albiol-Pérez, S., & Aula-Valero, C. (2013). SEQ: Suitability evaluation questionnaire for virtual rehabilitation systems. Application in a virtual rehabilitation system for balance rehabilitation. En *In Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare* (págs. 335-338). Venice, Italy.
- Golant, S. (2017). A theoretical model to explain the smart technology adoption behaviors of elder consumers (Elderadopt). En *J. Aging* (págs. 56-73).

- Guoqing, S., Kun, D., Hao, C., & Jingwei, X. (2020). A Study of Fall Risk Assessment in the Elderly. En *In Proceedings of the 2020 9th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2020)* (págs. 176-183). Qingdao, China.
- Guzsvinecz, T. S.-L. (2019). Suitability of the kinect sensor and leap motion controller—a literature review. *Sensors*, 19(5).
- Hsiao, M., Li, C., Lu, I., Lin, Y., Wang, T., & Han, D. (2018). An investigation of the use of the Kinect system as a measure of dynamic balance and forward reach in the elderly. En *Clin. Rehabil* (págs. 473-482).
- Hurtado, J. S. (s.f.). *Clasificación de articulaciones*. Obtenido de Anatomía Humana: Sistema Locomotor: <https://paradigmia.com/curso/locomotor/>
- Jonsdottir, J., Bertoni, R., Lawo, M., Montesano, A., Bowman, T., & Gabrielli, S. (2018). Serious games for arm rehabilitation of persons with multiple sclerosis. A randomized controlled pilot study. En *Mult. Scler. Relat. Disord* (págs. 25-29).
- Jung, I., Lee, J., Kim, J., & Choi, C. (2014). Ubiquitous gamification framework for stroke rehabilitation treatment based on the web service. En *In Proceedings of the 4th Workshop on ICTs for improving Patients Rehabilitation Research Techniques* (págs. 117-120). Oldenburg, Germany.
- Kamphuis, C. B. (2014). Augmented reality in medical education? *Perspectives on medical education*, 3(4), 300-311.
- Kaur, G. E. (2013). Physiotherapists systematically overestimate the amount of time stroke survivors spend engaged in active therapy rehabilitation: an observational study. *Journal of physiotherapy*, 59(1), 45 - 51.
- Khosravi, P., & Ghapanchi, A. (2015). Investigating the effectiveness of technologies applied to assist seniors: A systematic literature review. En *Int. J. Med. Inform* (págs. 17-26).
- Khosravi, P., Rezvani, A., & Wiewiora, A. (2016). The impact of technology on older adults' social isolation. En *Comput. Hum. Behav* (págs. 594-603).
- Kim, S. S. (2018). What is gamification in learning and education? *Gamification in learning and education*, (págs. 25 - 38).
- Koen Buys, C. C. (2014). An adaptable system for RGB-D based human body detection and pose estimation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 25(1), 39 - 52.
- Krath, J. S. (2021). Revealing the theoretical basis of gamification: A systematic review and analysis of theory in research on gamification, serious games and game-based learning. *Computers in Human Behavior*, 125.
- Lahiani, H., & Neji, M. (2020). A survey on hand gesture recognition for mobile devices. En *Int. J. Intell. Syst. Technol. Appl* (págs. 458-485).
- Lange, B., Flynn, S., Proffitt, R., Chang, C., & "Skip" Rizzo, A. (2010). Development of an interactive game-based rehabilitation tool for dynamic balance training. En *Top. Stroke Rehabil* (págs. 345-352).
- Lanman, D. (2007). Structured Light for 3D Scanning (book 3d photography). *University of Brown*.

- Lee, I. J. (2021). Kinect-for-windows with augmented reality in an interactive roleplay system for children with an autism spectrum disorder. *Interactive Learning Environments*, 29(4), 688 - 704.
- Li, C., Chang, C., Yu, W., Yang, W., Hsu, C., & Chen, C. (2017). Enhancing elderly health examination effectiveness by adding physical function evaluations and interventions. *En Arch. Gerontol. Geriatr.* (págs. 38-43).
- Li, K. C. (2015). The design of immersive English learning environment using augmented reality. *8th International Conference on Ubi-Media Computing (UMEDIA)*.
- Liao, Y., Chen, I., & Wang, R. (2019). Effects of Kinect-based exergaming on frailty status and physical performance in prefrail and frail elderly: A randomized controlled trial. *En Sci. Rep* (págs. 1-9).
- Lozano, J., Montesa, J., Juan, M., Alcañiz, M., Rey, B., Gil, J., . . . Morganti, F. (2005). VR-Mirror: A virtual reality system for mental practice in post-stroke rehabilitation. *En In International Symposium on Smart Graphics* (págs. 241-245). Berlin/Heidelberg, Germany.
- Lun, R., & Zhao, W. (2015). A survey of applications and human motion recognition with Microsoft Kinect. *En Int. J. Pattern Recognition, Artif. Intell.* (pág. 29).
- Marston, H. R. (2016). Gamification: Applications for health promotion and health information technology engagement. *Handbook of research on holistic perspectives in gamification for clinical practice*, 78 - 104.
- Martínez José, J. M. (2018). *Sistema de Visión Artificial para la Detección y Corrección de Posturas en Ejercicios realizados por Fisicoculturistas*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mccluskey, M. (28 de 1 de 2022). Augmented Reality is the Future of Online Shopping. *Time*.
- McGinnis, P. M. (2005). Biomechanics of sport and exercise . (2ª Ed.). *Champaign, Illinois: Human Kinetics*. Illinois.
- Mekni, M. &. (2014). Augmented reality: Applications, challenges and future trends. *Applied computational science*, 20, 205 - 214.
- Mente, C. y. (2020). *Cuerpo y Mente*. Recuperado el 2022, de [https://www.cuerpomente.com/salud-mental/beneficios-ejercicio-fisico-cerebro-memoria\\_6408](https://www.cuerpomente.com/salud-mental/beneficios-ejercicio-fisico-cerebro-memoria_6408)
- Mentiplay, B., Perraton, L., Bower, K., Pua, Y., McGaw, R., Heywood, S., & Clark, R. (2015). Gait assessment using the Microsoft Xbox One Kinect: Concurrent validity and inter-day reliability of spatiotemporal and kinematic variables. *En J. Biomech* (págs. 2166-2170).
- Mogollón, C., Solorzano, Y., González, A., & Ilaquiche, L. (2018). La actividad física como estrategia para la promoción de la salud en el adulto mayor. *En Enfermería Investig* (págs. 32-37).
- movements, B. (s.f.). *Boimecanic movements*. Obtenido de <https://armurabody.com>
- Naeemabadi, M., Dinesen, B., Andersen, O., Najafi, S., & Hansen, J. (2018). Evaluating Accuracy and Usability of Microsoft Kinect Sensors and Wearable Sensor for Tele Knee

- Rehabilitation after Knee Operation. En *In Proceedings of the BIODEVICES* (págs. 128-135). Funchal, Portugal.
- Nakazawa, N., Takigawa, Y., & Matsui, T. (2020). Development of training software for elderly persons practicing a squat exercise. En *J.Mech. Elect. Intel. Syst.*
- Napoli, A., Glass, S., Ward, C., Tucker, C., & Obeid, I. (2017). Performance analysis of a generalized motion capture system using Microsoft Kinect 2.0. En *Biomed. Signal Process. Control* (págs. 265-280).
- Nguyen, A., Ong, Y., Luo, C., Thuraisingam, T., Rubino, M., Levin, M., & Archambault, P. (2019). Virtual reality exergaming as adjunctive therapy in a sub-acute stroke rehabilitation setting: Facilitators and barriers. En *Disabil. Rehabil. Assist. Technol* (págs. 317-324).
- Nielsen, J. (1994). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. En *In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (págs. 152-158). Boston, MA, USA.
- Nishchik, A., Geentjens, W., Medina, A., Klein, M., & Chen, W. (2020). An Augmented Reality Game for Helping Elderly to Perform Physical Exercises at Home. En *In Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs* (págs. 233-241). UC Santa Cruz.
- Nogal García, M. (2017). Revisión sistemática de la efectividad de la terapia activa en el tratamiento de fisioterapia sobre el Síndrome de Latigazo Cervical.
- Obdrzalek, S., Kurillo, G., Ofli, F., Bajcsy, R., Seto, E., Jimison, H., & Pavel, M. (2012). Accuracy and robustness of Kinect pose estimation in the context of coaching of elderly population. En *In Proceedings of the 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (págs. 1188-1193). San Diego, CA, USA.
- Olivares, J. J. (2015). El hipocampo: neurogénesis y aprendizaje. *Media Graphic*.
- Ono, T., Eguchi, R., & Takahashi, M. (2020). Dynamic Motion Tracking Based on Point Cloud Matching with Personalized Body Segmentation. En *In Proceedings of the 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)* (págs. 61-67). New York, NY, USA.
- Oudah, M., Al-Naji, A., & Chahl, J. (2020). Hand Gestures for Elderly Care Using a Microsoft Kinect. En *Nano Biomed. Eng* (págs. 197-204).
- Pandavenes, N. (2022). *La Razón*. Recuperado el 2022, de <https://www.larazon.es/espana/20220509/lkh3zxpdbd5jfuy4xcbc5yw5i.html>
- Park, J., Parsons, D., & Ryu, H. (2010). To flow and not to freeze: Applying flow experience to mobile learning. En *IEEE Trans. Learn. Technol* (págs. 56-67).
- Parmanto, B., Lewis, A., Graham, K., & Bertolet, M. (2016). Development of the telehealth usability questionnaire (TUQ). En *Int. J. Telerehabilitation*.
- Partners, E. (Septiembre de 2013). *Endeavour Partners*. Recuperado el 2020, de <https://blog.endeavour.partners/>

- Pastor, I., Hayes, H., & Bamberg, S. (2012). A feasibility study of an upper limb rehabilitation system using Kinect and computer games. En *In Proceedings of the 2012 annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (págs. 1286-1289). San Diego, CA, USA.
- Pei, Y.-C., Chen, J.-L., Wong, A., & Tseng, K. (2017). An Evaluation of the Design and Usability of a Novel Robotic Bilateral Arm Rehabilitation Device for Patients with Stroke. En *Front. Neurorobot.*
- Poław, D. (2018). Human-machine interaction in intelligent technologies using the augmented reality. *Information Technology and Control*, 47(4), 691 - 703.
- Pyk, P., Wille, D., Chevrier, E., Hauser, Y., Holper, L., Fatton, I., . . . Ruckriem, B. (2010). A pediatric interactive therapy system for arm and hand rehabilitation. En *In Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics* (págs. 127-132). Singapore.
- R. Hussain, A. L.-G. (2020). Contribution of Augmented Reality to Minimally Invasive Computer-Assisted Cranial Base Surgery. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 24(7), 2093 - 2106.
- Radovick, S. H. (2018). Gamification concepts to promote and maintain therapy adherence in children with growth hormone deficiency. *J. 1(1)*, 71 - 81.
- Rand, D., Kizony, R., & Weiss, P. (2004). Virtual reality rehabilitation for all: Vivid GX versus Sony PlayStation II Eye Toy. En *In Proceedings of the ICDVRAT* (págs. 87-94). Oxford, UK.
- Reeder, B., Meyer, E., Lazar, A., Chaudhuri, S., Thompson, H., & Demiris, G. (2013). Framing the evidence for health smart homes and home-based consumer health technologies as a public health intervention for independent aging: A systematic review. En *Int. J. Med. Inform.* (págs. 565-579).
- Rigueros Bello, C. (2017). La realidad aumentada: lo que debemos conocer. *Tecnología Investigación y Academia*, 5(2), 257-261.
- Rizzo, A., & Kim, G. (2005). A SWOT Analysis of the Field of Virtual Reality Rehabilitation and Therapy. En *Presence: Teleoperators Virtual Environ.* (págs. 119-146).
- Rossius, S. (2014). *Detección y seguimiento facial en tiempo real para un videojuego*. Valencia: UPV.
- Rubio-Tamayo, J. L. (2017). Immersive environments and virtual reality: Systematic review and advances in communication, interaction and simulation. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 21.
- Ruiz Torres, D. (2011). La realidad aumentada y dimensión en el arte. La obra aumentada. *Arte y políticas de identidad*, 5, 129-144.
- Sanabria, J. (2011). DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTO USANDO VISIÓN ARTIFICIAL. *Scientia et technica*.
- Sanidad, M. d. (s.f.). *Ministerio de Sanidad*. Recuperado el 2021, de <https://www.sanidad.gob.es>

- Santiago Pe, A. (2007). *Sistema de detección de objetos mediante cámaras. Aplicación en espacios inteligentes*. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá.
- Saposnik, G., Teasell, R., Mamdani, M., Hall, J., McIlroy, W., Cheung, D., . . . Bayley, M. (2010). Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: A pilot randomized clinical trial and proof of principle. En *Stroke* (págs. 1477-1484).
- Sardi, L. I.-A. (2017). A systematic review of gamification in e-Health. *Journal of biomedical informatics*, 71, 31 - 48.
- Scano, A. C. (2018). Kinect V2 implementation and testing of the reaching performance scale for motor evaluation of patients with neurological impairment. *Medical engineering & physics*, 56, 54 - 58.
- Scolari, C. A. (2021). *Las leyes de la interfaz: diseño, ecología, evolución, tecnología*. Editorial Gedisa.
- Sergueeva, K. S. (2017). Improving Healthcare with Wearables: Overcoming the Barriers to Adoption. *HCI in Business, Government and Organizations. Interacting with Information Systems*, 10293(1). doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-58481-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58481-2_17)
- Severo Malaspina, M. &. (2021). *Tecnologías de software para interfaz de usuario adaptativa y multiplataforma*.
- Shaughnessy, M., Resnick, B., & Macko, R. (2006). Testing a Model of Post-Stroke Exercise Behavior. En *Rehabil. Nurs.* (págs. 15-21).
- Sherhoff, D. J. (2014). Student engagement in high school classrooms from the perspective of flow theory. *Applications of flow in human development and education*, 475 - 494.
- Shin, J., Ryu, H., & Jang, S. (2014). A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: A usability test and two clinical experiments. En *J. Neuroeng. Rehabil.*
- Silva Sprock, A. (s.f.). *Universidad Central de Venezuela*. (HCI Collab) Recuperado el 2021, de <https://hci-collab.com/s1c3-la-interaccion-humano-computador/>
- Statista. (s.f.). *Statista*. Recuperado el 2022, de <https://es.statista.com/estadisticas/632836/prevision-de-la-poblacion-mayor-de-65-en-aragon/>
- Suárez, N. T. (2018). Interacción gestual: desde los comienzos hasta nuestros días. *Avances en Informática y Automática*, 172.
- Sunkel, G. &. (2019). Las personas mayores de América Latina en la era digital: superación de la brecha digital. *Revista Cepal*.
- Sutherland, J. B. (2019). Applying modern virtual and augmented reality technologies to medical images and models. *Journal of digital imaging*, 32(1), 38 - 53.
- Tanaka, R., Ishikawa, Y., Yamasaki, T., & Diez, A. (2019). Accuracy of classifying the movement strategy in the functional reach test using a markerless motion capture system. En *J. Med. Eng. Technol* (págs. 133-138).

- Varona, J., Manresa-Yee, C., & Perales, F. (2008). Hands-free vision-based interface for computer accessibility. En *J. Netw. Comput. Appl* (págs. 357-374).
- Vásquez, A. P. (2020). Modelización de interfaces adaptativas a partir de aprendizaje de perfiles de usuario web mediante gramáticas probabilísticas. *Perfiles de Ingeniería*, 16(16), 43 - 56.
- Venkatesh, V. M. (2017). User acceptance of information technology: toward a unified view. *MIS Q*, 27(3), 425-478.
- Vlahakis, V. I. (2002). Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(5), 52 - 60.
- Volkswagen. (s.f.). *Grupo Volkswagen*. Obtenido de <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/augmented-reality-3951>
- Vukićević, S. Đ. (2019). A demonstration project for the utility of kinect-based educational games to benefit motor skills of children with ASD. *Perceptual and motor skills*, 126(6), 1117-1144.
- Wang, L. H. (2019). A comparative review of recent kinect-based action recognition algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 29, 15 - 28.
- Wang, P., Kreutzer, I., Bjärnemo, R., & Davies, R. (2004). A web-based cost-effective training tool with possible application to brain injury rehabilitation. En *Comput. Methods Programs Biomed* (págs. 235-243).
- Wang, Z., Walsh, K., & Verma, B. (2017). On-tree mango fruit size estimation using RGB-D images. En *Sensors*.
- Weekly, A. T. (s.f.). *American Times Weekly*. Recuperado el 2020, de <https://time.com/tag/augmented-reality/>
- Wiedemann, L., Planinc, R., Nemec, I., & Kappel, M. (2015). Performance Evaluation of Joint Angles obtained by the Kinect. In *Proceedings of the IET Conference Proceedings. En The Institution of Engineering & Technology*. England.
- WIRHED, J. A. (2001). *KINESIOLOGIA Y ANATOMIA APLICADA A LA ACTIVIDAD FISICA*. Paidrotibo.
- Wollersheim, D., Merkes, M., Shields, N., Liamputtong, P., Wallis, L., Reynolds, F., & Koh, L. (2010). Physical and psychosocial effects of Wii video game use among older women. En *Int. J. Emerg. Technol. Soc* (págs. 85-98).
- Wu, Q. S. (2016). How fitness trackers facilitate health behavior change. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. SAGE Publications*.
- Xavier-Rocha, T. B.-J.-J. (2020). The Xbox/Kinect use in poststroke rehabilitation settings: a systematic review. *Archivos de Neuro-Psiquiatria*, 78, 361 - 369.
- Yang, Y., Fang, P., Yan, L., Shuyu, L., Yubo, F., & Deyu, L. (2014). Reliability and validity of Kinect RGB-D sensor for assessing standing balance. En *IEEE Sens* (págs. 1633-1638).

- Yu, D. J. (2009). A useful visualization technique: A literature review for augmented reality and its application, limitation & future direction. *Visual information communication*, 311-337.
- Yukselturk, E. A. (2018). Using game-based learning with kinect technology in foreign language education course. *Journal of Educational Technology & Society*, 21(3), 159 - 173.
- Zainuddin, Z. C. (2020). The impact of gamification on learning and instruction: A systematic review of empirical evidence. *Educational Research Review*, 30.
- Zannatha, J., Tamayo, A., Sánchez, Á., Delgado, J., Cheu, L., & Arévalo, W. (2013). Development of a system based on 3D vision, interactive virtual environments, ergonomic signals and a humanoid for stroke rehabilitation. En *Comput. Methods Programs Biomed* (págs. 239-249).
- Zhang, M. Z. (2018). Recent developments in game-based virtual reality educational laboratories using the microsoft kinect. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 13(1), 138 - 159.
- Zhou, H., & Hu, H. (2008). Human motion tracking for rehabilitation—A survey. En *Biomed. Signal Process. Control* (pág. 18).