

Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad.



Universidad  
del Cauca

Juan Pablo Arango Dorado.  
David Mateo Martínez Rodríguez.

Universidad del Cauca.  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.  
Ingeniera en Automática Industrial.

Popayán, 2023.

Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con  
medición de los rangos de movilidad.

Juan Pablo Arango Dorado.  
David Mateo Martínez Rodríguez.

Trabajo de grado presentando como requisito para obtener  
el título de:  
Ingeniero en Automática Industrial.

Tutor:  
PhD Oscar Andrés Vivas Albán.

Universidad del Cauca.  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.  
Ingeniera en Automática Industrial.

Popayán, 2023.

## **Agradecimientos.**

En primer lugar queremos agradecer a nuestro tutor Oscar Andrés Vivas Albán Dr.(PhD) en Robótica, quien con sus conocimientos y apoyo nos guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que se buscaban.

También queremos agradecer a la Universidad del Cauca, en especial a la Docente Clara Inés Paz Peña y la estudiante Tania Vanessa Losada Garzón pertenecientes al Departamento de Fisioterapia de la Facultad de Salud por brindarnos todos los recursos y conocimientos que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación, recopilación de datos y desarrollo de este trabajo.

Por ultimo, nos gustaría expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros familiares y amigos por su constante apoyo y aliento a lo largo de nuestra trayectoria académica. Su inquebrantable apoyo emocional, financiero y moral nos ha permitido desarrollar este importante hito en nuestra vida. No habría sido posible sin su amor, paciencia y sacrificio. A todos ustedes, les debemos una deuda de gratitud que nunca podremos saldar. Además, extendemos nuestro agradecimiento a nuestras queridas mascotas, su presencia alegre y juguetona ha sido una inspiración constante para nosotros. Nos han recordado que, a pesar de los desafíos y el trabajo duro, la vida está llena de momentos felices y emocionantes. Gracias por llenar nuestras vidas de risas, juegos y alegría.

Muchas gracias a todos.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Conceptos generales.</b>	<b>4</b>
2.1	Rehabilitación. . . . .	4
2.2	Oculus / Meta Quest. . . . .	6
2.3	Realidad Virtual. . . . .	6
2.4	Gamificación. . . . .	7
2.5	Unity 3D. . . . .	7
<b>3</b>	<b>Estado del arte.</b>	<b>8</b>
3.1	Desarrollo de la temática a la fecha. . . . .	8
3.2	Objetivos . . . . .	12
3.2.1	Objetivo general . . . . .	12
3.2.2	Objetivos específicos . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Materiales y métodos.</b>	<b>13</b>
4.1	Descripción del hardware. . . . .	13
4.1.1	Oculus Quest 2. . . . .	13
4.2	Descripción del software. . . . .	15
4.3	Descripción del sistema realizado. . . . .	16
4.3.1	Diagrama de flujo. . . . .	16
4.3.2	Configuración inicial. . . . .	18
4.3.3	Configuración del entorno y testeo. . . . .	21
4.3.4	Configuración ejercicios de entrenamiento. . . . .	30
4.3.5	Base de datos. . . . .	42
<b>5</b>	<b>Pruebas.</b>	<b>45</b>
5.1	Prueba de la aplicación. . . . .	45
5.1.1	Instrumento evaluador . . . . .	45
5.1.2	Selección de la población . . . . .	53
5.1.3	Metodología . . . . .	57

5.1.4 Realización de las pruebas . . . . .	57
<b>6 Análisis de resultados.</b>	<b>68</b>
6.1 Análisis cuantitativo. . . . .	69
6.2 Análisis cualitativo. . . . .	94
<b>7 Conclusiones y trabajos futuros.</b>	<b>100</b>
7.1 Conclusiones. . . . .	100
7.2 Trabajos futuros. . . . .	102

# Índice de figuras

1	Oculus Quest 2. . . . .	14
2	Diagrama de flujo general de la plataforma. . . . .	17
3	Configuración inicial apartado Oculus. . . . .	19
4	Configuración inicial componentes SDK de movimiento. . . . .	19
5	Configuración inicial componentes SDK de interacción. . . . .	20
6	Plano 2D de distribución de la escena. . . . .	20
7	Botones de selección de usuario. . . . .	23
8	Canvas Login. . . . .	23
9	Inicio de sesión disposición final. . . . .	23
10	Canvas calibración. . . . .	24
11	Canvas Testeo. . . . .	24
12	Esferas Test. . . . .	25
13	Plataforma azul. . . . .	25
14	Señalización esferas Test. . . . .	25
15	Bloqueo de posiciones esferas Test. . . . .	26
16	Disposición final Test. . . . .	26
17	Canvas Logout. . . . .	26
18	Jerarquía de objetos Test. . . . .	27
19	Calibración vista frontal. . . . .	28
20	Calibración vista lateral. . . . .	28
21	Triángulos generados horizontalmente. . . . .	29
22	Triángulos generados verticalmente. . . . .	29
23	Movimiento del usuario Actividad Mesa. . . . .	31
24	Movimiento del usuario Actividad Reloj. . . . .	31
25	Movimiento del usuario Actividad Matriz. . . . .	32
26	Contenedores. . . . .	33
27	Plataforma. . . . .	33
28	Cubo violeta Interacción. . . . .	34
29	Actividad Mesa disposición final. . . . .	35
30	Canvas Actividad Mesa. . . . .	35

31	Jerarquía de objetos Actividad Mesa. . . . .	35
32	Reloj, esfera y minuterero. . . . .	36
33	Componente Rigidbody. . . . .	37
34	Esfera Cyan. . . . .	37
35	Actividad Reloj disposición final. . . . .	38
36	Canvas Actividad Reloj. . . . .	38
37	Jerarquía de objetos Actividad Reloj. . . . .	39
38	Esfera Violeta Inspector. . . . .	39
39	Lineas de referencia. . . . .	40
40	Esfera Roja. . . . .	40
41	Actividad Matriz disposición final. . . . .	41
42	Canvas Actividad Matriz. . . . .	41
43	Jerarquía de objetos Actividad Matriz. . . . .	41
44	Pagina principal login Web Hosting. . . . .	42
45	Pagina con sesión iniciada. . . . .	43
46	Gestión de archivos. . . . .	43
47	Códigos de conexión. . . . .	43
48	Gestión de bases de datos. . . . .	44
49	phpMyAdmin. . . . .	44
50	Instrumento Evaluador página 1. . . . .	50
51	Instrumento Evaluador página 2. . . . .	51
52	Uso del goniómetro en un usuario potencial. . . . .	52
53	Consentimiento informado página 1. . . . .	54
54	Consentimiento informado página 2. . . . .	55
55	Consentimiento informado página 3. . . . .	56
56	Habitación virtual. . . . .	59
57	Ubicación de aparición entorno virtual. . . . .	59
58	Perspectiva usuario Inicio de sesión. . . . .	60
59	Perspectiva usuario Calibración. . . . .	60
60	Vista lateral Calibración. . . . .	61
61	Perspectiva usuario Test movilización esfera roja. . . . .	61
62	Perspectiva usuario Test movilización esfera amarilla. . . . .	62
63	Perspectiva usuario Test movilización esfera verde. . . . .	62
64	Perspectiva usuario Actividad Mesa. . . . .	63
65	Perspectiva usuario Actividad Matriz. . . . .	63
66	Perspectiva usuario Actividad Reloj. . . . .	64
67	Perspectiva usuario Cerrar sesión. . . . .	64

68	Usuario en sesión. . . . .	65
69	Usuario en sesión. . . . .	66
70	Toma de pruebas Instrumento Evaluador. . . . .	67
71	Toma de pruebas Instrumento Evaluador. . . . .	67
72	Comparación de datos tomados por el instrumento evaluador y la plataforma diseñada de los 11 usuarios completados. . . . .	70
73	Representación del usuario en el ejercicio de testeo. . . . .	72
74	Desempeño del ejercicio Mesa por día del usuario 1. . . . .	73
75	Desempeño del ejercicio Matriz por día del usuario 1. . . . .	73
76	Desempeño del ejercicio Reloj por día del usuario 1. . . . .	73
77	Promedio del desempeño de los tres ejercicios por día del usuario 1. . . . .	74
78	Promedio puntuación por día de los tres ejercicios de los once usuarios. . . . .	75
79	Promedio tiempo máximo por día de los tres ejercicios de los once usuarios. . . . .	75
80	Promedio tiempo mínimo por día de los tres ejercicios de los once usuarios. . . . .	76
81	Promedio tiempo promedio por día de los tres ejercicios de los once usuarios. . . . .	76
82	Promedio puntuación por día de los once usuarios. . . . .	77
83	Promedio tiempo máximo por día de los once usuarios. . . . .	77
84	Promedio tiempo mínimo por día de los once usuarios. . . . .	78
85	Promedio tiempo promedio por día de los once usuarios. . . . .	78
86	Datos de las rectas generadas para el análisis de la evolución del usuario 1. . . . .	80
87	Método de medición de la plataforma y del instrumento evaluador . . . . .	81
88	Comparativa de la evolución en la flexión de hombro del usuario 1. . . . .	81
89	Comparativa de la evolución en la aducción horizontal de hombro del usuario 1. . . . .	82
90	Comparativa de la evolución promedio en la flexión de hombro de los 11 usuarios. . . . .	82
91	Comparativa de la evolución promedio en la aducción horizontal de hombro de los 11 usuarios. . . . .	83
92	Comparativa de la evolución en la flexión de hombro del usuario 8. . . . .	83
93	Correlación de Pearson para la evolución de la flexión. . . . .	84
94	Correlación de Pearson para la evolución de la aducción horizontal. . . . .	84
95	Regresión lineal para la evolución de la flexión. . . . .	85
96	Regresión lineal para la evolución de la aducción horizontal. . . . .	85



97	Datos de la recta generada para el análisis de la evolución del dolor para el usuario 1. . . . .	87
98	Relación del desempeño promedio por día y número de criterios de inclusión del usuario 1. . . . .	88
99	Promedio de la relación del desempeño promedio por día y número de criterios de inclusión de los 11 usuarios. . . . .	88
100	Correlación de Pearson para la evolución del dolor. . . . .	89
101	Regresión lineal para la evolución del dolor. . . . .	89
102	Datos de la recta generada para el análisis de la evolución de fuerza para el usuario 1. . . . .	91
103	Relación del promedio tiempo máximo por día y fuerza del usuario 1. . . . .	91
104	Promedio de la relación del tiempo máximo de agarre por día y fuerza de los 11 usuarios. . . . .	92
105	Correlación de Pearson para la evolución de la fuerza articular. . . . .	93
106	Regresión lineal para la evolución de la fuerza articular. . . . .	93
107	Percepción de los usuarios respecto al ejercicio que le generó más dificultad. . . . .	96
108	Percepción de los usuarios respecto a los síntomas desarrollados durante el uso de la plataforma. . . . .	98
109	Nube de palabras de cómo consideran los usuarios la plataforma diseñada. . . . .	98
110	Código QR para acceder repositorio en GitHub. . . . .	108
111	Código QR para acceder al documento utilizado como base de datos y análisis del proyecto de grado. . . . .	109

# Capítulo 1

## Introducción.

Las tendinopatías de hombro son una de las patologías más frecuentes en Latinoamérica, siendo las lesiones del manguito de los rotadores (hombro) una de las principales, la cual cuenta con una incidencia del 15 % y el 20 % en la población [1]. Este tipo de lesiones afecta la movilidad del miembro superior, causando mayores molestias al momento de elevar esta extremidad o llevarla a la parte posterior del cuerpo, limitando así la realización de actividades de tipo cotidiano o siendo doloroso desempeñarse en diferentes ámbitos diarios. En algunos casos puede llegar a generar interrupciones del sueño contribuyendo, junto a lo anterior, al desarrollo anormal de la vida diaria. Dentro del tratamiento de este tipo de lesiones se encuentra principalmente la movilización activa y pasiva, con el fin de fortalecer las estructuras afectadas [2].

En la actualidad la realidad virtual es utilizada en la rehabilitación para simular entornos reales, con el fin de generar mayor interés en el paciente y permitir una mejor guía sobre los ejercicios a realizar en cada una de las sesiones, proporcionándole un mayor control al profesional durante las sesiones de terapia. Con apoyo de sensores como el Wiimote, la Wii Balance Board o el Kinect, existe la posibilidad de una interacción con los entornos virtuales de una forma más natural y a un menor coste [3].

Utilizando en rehabilitación las tecnologías anteriormente mencionadas, se requiere la presencia y continua atención del fisioterapeuta, con el fin de verificar la adecuada ejecución de los movimientos formulados y una posible estimación visual de los ángulos generados entre las articulaciones durante la actividad. Por medio de estos ángulos se determina el adecuado funcionamiento de las articulaciones y su capacidad máxima de movimiento, siendo estos datos los tomados de referencia por el profesional de la salud para determinar el grado de limitación que genera la

---

lesión en cada paciente. Aquellos ángulos son los generados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones y son medidos por una ciencia denominada goniometría, la cual en la mayoría de los casos es medida de forma manual por el profesional con un instrumento denominado goniómetro en cada una de las sesiones [4].

Según lo expuesto anteriormente se logran evidenciar dos problemáticas en estos procesos de rehabilitación: primero, la necesidad inicial de la presencia del profesional para realizar una estimación visual de los ángulos generados por las articulaciones; y en segundo lugar, la ausencia de un método preciso para su medición, en un entorno de realidad virtual.

Este proyecto busca entonces desarrollar una plataforma de realidad virtual que permita por medio de la medición de los ángulos de apertura, la evaluación de los rangos de movilidad en el hombro, los cuales son generados por el usuario al momento de realizar distintos movimientos del miembro superior. Esta plataforma permitiría suprimir la necesidad de la observación continua del profesional, generando registros de la información obtenida que pueden ser consultados posteriormente. Con lo anterior, se genera la siguiente pregunta de investigación ¿Cuáles serían las características de un sistema de rehabilitación de hombro usando realidad virtual, que permita la medición de los ángulos de apertura entre el hombro y el torso?

---

## Publicaciones y ponencias

Este proyecto de investigación ha sido precedido por dos investigaciones que han permitido su desarrollo. La primera etapa se centró en la implementación de una herramienta virtual destinada a ser utilizada como apoyo en procesos de rehabilitación de miembros superiores. Los resultados de esta investigación han sido publicados en la revista **Pistas Educativas** bajo el título **Prototype System For Upper Limb Rehabilitation Using Virtual Reality** [5]. Además, se presentó de forma virtual en la **Semana Nacional e Iberoamericana de Ingeniería Electrónica 2022** celebrada en la ciudad de México.

La segunda etapa del proyecto se enfocó en el desarrollo de una versión beta de una plataforma de realidad virtual destinada a medir los ángulos de movilidad entre el brazo y el torso como herramienta de apoyo para procesos de rehabilitación de hombro. Los resultados de esta etapa fueron presentados de manera virtual en el **XI Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica y Automatización 2023**, llevado a cabo en la ciudad de Cartagena, Colombia, bajo el título **Plataforma De Rehabilitación De Hombro Usando Realidad Virtual**. Actualmente, se encuentra en proceso la publicación del resumen de esta investigación en el libro de memorias del evento.

## Capítulo 2

### Conceptos generales.

En la siguiente sección se presentarán los conceptos fundamentales y necesarios para comprender el tema en cuestión. Estos conceptos son esenciales para el desarrollo del contenido y permitirán al lector tener una visión clara y completa de la temática. Además, se explicarán de manera detallada y se proporcionarán ejemplos para facilitar su comprensión. Por lo tanto, es importante prestar atención a cada uno de los conceptos presentados a continuación para poder entender el contenido en su totalidad.

#### 2.1. Rehabilitación.

La rehabilitación es un proceso que busca ayudar a las personas con discapacidades a alcanzar niveles óptimos de independencia física y habilidades funcionales, así como ajustarse psicológica, social, vocacional y económicamente para llevar una vida independiente y libre. Este proceso es continuo y tiene objetivos definidos, y se lleva a cabo a través de una combinación de muchos procedimientos. La meta final es permitir que la persona recupere su estado funcional óptimo tanto en casa como en la comunidad, utilizando todas sus capacidades residuales de manera efectiva [6].

La rehabilitación del hombro es un proceso complejo que implica la restauración de la movilidad, fuerza y estabilidad del hombro después de una lesión, cirugía o enfermedad que afecta la articulación del hombro [7]. El proceso de rehabilitación del hombro puede variar en función del tipo y la gravedad de la lesión, pero generalmente se divide en tres fases: la fase inicial, la fase principal y la fase integradora [8].

---

La fase inicial se enfoca en determinar la lesión o patología que se ha ocasionado en el paciente, esta viene acompañada por las secuelas resultantes de la afección las cuales pueden ser dolor, disminución en la fuerza de miembro, reducción de la estabilidad o de tono muscular. Estas consecuencias dependen de la problemática presentada en cada usuario. Las actividades terapéuticas para el paciente en esta etapa comienzan cuando las condiciones clínicas de él lo permiten, es decir, cuando el paciente está lo suficientemente estable para participar en posibles terapias.

La fase principal es considerada la más importante del proceso de rehabilitación, ya que es el momento en que el paciente puede intervenir de forma activa en su recuperación. Esta etapa se enfoca en el proceso de rehabilitación propiamente dicho y puede durar alrededor de 3 meses, aunque esto puede variar según el paciente y sus necesidades específicas. La duración de esta etapa se define más por los cambios observados en la exploración física y la observación del paciente, en lugar de un tiempo estrictamente definido. La segunda etapa finaliza cuando el paciente puede moverse de forma independiente, lo que indica una mejoría significativa en su capacidad motora y la posibilidad de continuar con la rehabilitación en una etapa posterior.

La fase integradora se enfoca en mejorar la función del hombro para que el paciente pueda volver a las actividades diarias y deportivas normales. Durante esta fase, se pueden incluir ejercicios específicos para la actividad que el paciente desea realizar, como lanzar una pelota o levantar objetos pesados. También se puede trabajar en la coordinación y el equilibrio del hombro para mejorar la precisión del movimiento [8].

Un factor importante en los diagnósticos y procesos de rehabilitación es la hiperlaxitud o hipermovilidad articular la cual es una condición en la que las articulaciones del cuerpo pueden moverse más allá de lo que se considera normal para una persona, teniendo en cuenta su edad, género y origen étnico. Esto significa que la flexibilidad y el rango de movimiento de las articulaciones son anormalmente elevados, lo que puede causar dolor, fatiga muscular y otras complicaciones en algunas personas [9].

Es importante seguir el programa de rehabilitación recomendado por el médico o fisioterapeuta y asistir a todas las citas programadas para asegurarse de que el hombro se esté recuperando adecuadamente. La rehabilitación del hombro puede ser un proceso prolongado y puede requerir una gran cantidad de tiempo y esfuerzo, pero ayuda a restaurar la movilidad, fuerza y estabilidad del hombro para que el paciente pueda volver a una vida activa y saludable.

---

## 2.2. Oculus / Meta Quest.

Las gafas Oculus actualmente conocidas como Meta Quest son un dispositivo que se enfoca en el entorno de la realidad virtual. Este dispositivo, que se desarrolla en la tecnología Head Mounted Display (HMD), presenta ante el usuario la información generada por una computadora. Este apartado se profundiza en el capítulo 4 **Materiales y métodos** donde se definen las características del mismo.

Esta tecnología se encuentra en un crecimiento constante por lo que está abarcando varios sectores, entre ellos la investigación en general, el ámbito militar, médico, educativo y para el cual fue creado, el sector del entretenimiento. Su crecimiento y aceptación por parte de los usuarios es tan efectivo que actualmente hace parte en la forma en la que se desarrollan un gran número de personas al rededor del mundo. Esto hace que tenga una vital importancia el uso que se le asigne a esta nueva tecnología, y cómo esta puede generar efectos sobre los usuarios en varios aspectos, uno de los cuales es el efecto sobre la salud de cada persona [10].

## 2.3. Realidad Virtual.

La realidad virtual (VR) es un ambiente generado por una computadora que simula un mundo en el que el usuario puede sentirse inmerso. Este mundo simulado permite interactuar con objetos, entornos y situaciones creadas para darle más realismo. Para poder percibir este mundo de manera efectiva, se utilizan dispositivos especiales, como las gafas de realidad virtual [11].

La VR en el ámbito de la medicina ha sido utilizada en diferentes campos, tanto personales como profesionales, para mejorar la capacidad humana durante muchos años. Su principal objetivo es aumentar la seguridad del paciente y reducir el tiempo de tratamiento y recuperación en diferentes procedimientos médicos. Uno de los campos en los que se ha enfocado su uso es en la cirugía ortopédica y traumatología, especialmente en la reducción de fracturas óseas. En este ámbito se han desarrollado modelos de representación del cuerpo humano que son compatibles con las nuevas tecnologías de VR. Además, se han propuesto sistemas enfocados en especialistas médicos para entrenamiento y otros enfocados en pacientes para tratamientos y herramientas diagnósticas [12].

---

## 2.4. Gamificación.

La gamificación es el uso de elementos y técnicas de diseño de juegos en contextos no lúdicos, como la educación, la salud, el marketing, el trabajo, entre otros, con el fin de mejorar la motivación, el compromiso y el rendimiento de las personas en dichos contextos. Es decir, se trata de convertir una actividad o tarea en un juego, utilizando elementos como la competencia, los desafíos, los puntos, los niveles, las recompensas y las retroalimentaciones, con el fin de hacerla más atractiva, interesante y divertida para los usuarios [13].

En el contexto educativo, la gamificación se utiliza para mejorar el aprendizaje y la retención de conocimientos de los estudiantes, al hacer que las actividades sean más interactivas, dinámicas y emocionantes. La gamificación es una técnica de diseño que utiliza elementos de juegos para mejorar la experiencia y el rendimiento de las personas en diferentes contextos [14].

Se han desarrollado entornos gamificados como apoyo para procesos de rehabilitación [15], los cuales buscan suplir la carencia en la motivación de los pacientes, ya que esto genera un impedimento al momento de realizar los ejercicios e implica una posible deserción de los pacientes, generando un proceso de rehabilitación incompleto.

## 2.5. Unity 3D.

Para crear una aplicación, en este caso una aplicación que simula una terapia y en la que el usuario debe realizar ejercicios, se utilizó un programa llamado Unity 3D. Este programa se utiliza para crear gráficos y animaciones en videojuegos, así como en otras aplicaciones que necesiten un alto nivel de realismo [16].

Al utilizar Unity 3D se puede exportar fácilmente la aplicación para que pueda ser compatible en diferentes dispositivos, como teléfonos móviles, tabletas y computadoras, con las configuraciones descritas en el capítulo 4. También es posible programar y exportar aplicaciones para los productos Meta Quest. Además, se puede cambiar la forma en que los usuarios interactúan con la aplicación, dependiendo del tipo de entrada que se configure en la plataforma, dando una mayor diversidad y variedad de opciones para ofrecer a los usuarios y/o programadores.



## Capítulo 3

### Estado del arte.

#### 3.1. Desarrollo de la temática a la fecha.

En este proyecto se tratarán las características que debe tener una plataforma de rehabilitación utilizando VR. Para ello se ha realizado una investigación del proceso que conlleva una rehabilitación física, desde el diseño de los ejercicios, actividades o tareas, hasta el método evaluativo para determinar la evolución del paciente.

Existen diversos problemas para el acceso a las atenciones de rehabilitación física, pudiendo ser consecuencia de factores tanto de falta de equipos como de dinero. Por ello a veces se realizan ejercicios grupales supervisados para todo tipo de afecciones musculo-esqueléticas, evaluando su efectividad en diferentes tipos de lapsos, evitando así la adquisición de una gran cantidad de equipos y comparándola con la rehabilitación individual [17]. Para este último, existe un ensayo controlado, aleatorio y simple, donde dos grupos, tanto el de control como el experimental, desarrollan ejercicios de flexión y extensión de la muñeca y supinación y pronación del antebrazo [18]. Estos ejercicios individuales, para una rehabilitación convencional, se comparan con otras alternativas de rehabilitación, como sistemas robóticos de apoyo donde se incluyen estiramientos pasivos dentro de sus rangos de movilidad, movimientos asistidos y ejercicios de actividad diaria [19]. A esto se les suma los ejercicios orientados a tareas y actividades de alcance y agarre, que cuentan también con movimientos pasivos y activos, asistidos a lo largo de toda la extremidad del brazo en sus 3 articulaciones [20]. También se encuentra la terapia de espejo, que aunque no es convencional, ha demostrado su eficacia en pacientes con necesidades de recuperación motora luego de accidentes cerebro-vasculares agudos [21].

---

Existen también alternativas de rehabilitación utilizando plataformas y/o entornos VR, los cuales permiten reducir la monotonía de los ejercicios convencionales por medio de juegos serios, planteando una variedad de actividades. Un estudio explora estas tecnologías en el proceso de limpiar un espejo con un spray para que el usuario realice movimientos circulares con el hombro [22]. También es posible extender ejercicios diseñados para la rehabilitación fina del miembro a la rehabilitación gruesa, realizando ejercicios orientados a tareas de movilización de objetos en un entorno gamificado y virtual, el cual se conecta con el usuario por medio del dispositivo Leap Motion, con el fin de interactuar y agarrar los objetos dispuestos en la escena [23]. Estos ejercicios se pueden extender a la rehabilitación del antebrazo, generando el movimiento de supinación y pronación en este.

Una de las ventajas del desarrollo de las actividades para rehabilitación física en entornos virtuales, es que también es posible implementar métodos ya estructurados y verificados por su eficacia, como la ya mencionada terapia de espejo, la cual se ha ajustado para simular el juego de golpear al topo. Si bien este desarrollo cuenta con una modalidad normal donde los usuarios utilizan un mazo para cumplir el objetivo (golpear la mayor cantidad de topos), también cuenta con una versión de espejo donde se le genera al usuario la ilusión de acertar los golpes y de mover de manera más fluida el brazo con el mazo, siendo esencial que se pueda visualizar la extremidad, ya que esto permite activar la zona en el cerebro que se encarga del movimiento que se quiere lograr [24].

Pero el diseño de las aplicaciones de VR para rehabilitación física no se puede limitar a solo su presentación ante el usuario, ya que aunque no se ha demostrado un incremento en la mejoría de los pacientes respecto a las actividades, ejercicios y juegos de rehabilitación, si se ha presentado un alto nivel de aceptación y motivación de los usuarios durante las sesiones [25]. Y es que el modelo de cómo interactúan estos usuarios en los entornos virtuales es importante para determinar el método de obtención de datos. Se ha realizado un estudio acerca de un juego diseñado con el propósito de apoyar en la rehabilitación de la movilidad del brazo, desarrollando un “data-glove” (guante de datos), el cual consta de dispositivos electrónicos como unidades de medición inercial, vibradores y un microcontrolador para generar la comunicación usuario-entorno, haciendo que el paciente desplace una esfera moviendo para ello su brazo y antebrazo [26].

La ergonomía es un factor importante para el desempeño de los usuarios en las sesiones de rehabilitación, mejora la usabilidad, el compromiso y la tasa de éxito de los ejercicios dispuestos. En torno a este tema se ha desarrollado un estudio acerca

---

de diversos modos de usabilidad, describiendo el modo normal como la relación entre la ubicación de la extremidad real a la extremidad virtual y agregando un modo “extendido”, el cual agrega una distancia entre las extremidades (real y virtual), permitiéndole al usuario interactuar con los objetos que se encuentran por fuera de su rango de movilidad y haciendo que los participantes tuvieran una motivación a continuar el tratamiento [27].

Para un proceso de rehabilitación viable es necesario presentar métodos de evaluación que permitan analizar la evolución de los pacientes. Se ha expuesto que para determinar la función motora del miembro superior, la potencia motriz, el tono muscular y el dolor en la extremidad, es factible usar las evaluaciones Fulg Meyer, índice de motricidad, escala de Ashworth modificada y escala analógica visual, las cuales fueron usadas respectivamente en un caso de estudio para la viabilidad de juegos comerciales en procesos de rehabilitación [28]. En otro estudio se aborda la escala SULCS para evaluar el desempeño del miembro superior por medio de 10 tareas, las cuales se evalúan de forma jerárquica desde las menos compleja (que requieren baja movilidad) hasta las más exigente, estableciéndose al final unos intervalos de clasificación respecto a la funcionalidad [29].

Aparte de los métodos convencionales para definir la evolución en los procesos de rehabilitación, se han realizado estudios de procesos alternativos para la evaluación clínica del miembro superior de los pacientes. Entre estos métodos se encuentra la implementación de un exoesqueleto de brazo multiarticular, el cual se basa en sensores que determinan los ángulos de las articulaciones y los rangos de movimiento [30]. También se encuentra un estudio acerca del uso de acelerómetros en las muñecas para determinar el nivel de hemiparesia (leve, moderada y grave) [31]. De otra parte, para completar una evaluación de los trastornos del miembro superior, se utilizan habitualmente las medidas de resultado informadas por el paciente (PROM), las cuales hasta diciembre de 2021 eran 8 para la sección del miembro superior. Estos 8 son: NULI (Neck and upper limbs index); UEFI (Upper extremity functional index); UEFS (Upper extremity functional index); WORQ-UP (Work-related questionnaire for upper extremity disorder); DASH (Disabilities questionnaire arm, shoulder and hand ); QuickDASH-11, QuickDASH-9 y ULFI (Upper limb functional index) [32]. Como no siempre es viable usar dispositivos para realizar evaluaciones de la evolución de los usuarios en los procesos de rehabilitación, por ello se ha realizado un estudio que propone un modelo matemático que estima la fuerza muscular de los miembros superiores de los pacientes utilizando un Kinect, obteniendo la fuerza de los músculos a partir de los valores cinemáticos soportados en una matriz de regresión de mínimos cuadrados [33].

---

Existen, pues, una variedad considerable de métodos de validación para la evolución de los pacientes, como se evidencia en el estado del arte desarrollado. La mayoría de estos métodos son de forma discreta, ya que realizan la toma de datos para la evaluación del paciente en momentos puntuales y/o se definen intervalos para establecer valores. Además, algunos de ellos son bastante rigurosos.

A su vez, se evidencia que existe una amplia cantidad de artículos e investigaciones acerca de alternativas para la rehabilitación física, además de la posibilidad de poder aplicar conceptos convencionales en métodos alternativos. Sin embargo, la mayoría de los procesos de evaluación y rehabilitación son independientes entre sí, existiendo poco trabajo en conjunto y cohesión entre estos dos procesos.

Esta investigación procura presentar un método de evaluación del estado del paciente, que trabaje en conjunto con el proceso de rehabilitación en un entorno VR, de forma amena para el usuario, obteniendo los datos de la evolución de los pacientes durante las sesiones de rehabilitación mediante la medición de los ángulos de apertura entre el hombro y el torso, así como de la fuerza articular basado en el tiempo de alza del brazo (tiempo en que el usuario puede mantener su brazo alzado a la altura del hombro, sin experimentar dificultad).

---

## **3.2. Objetivos**

### **3.2.1. Objetivo general**

Proponer una plataforma de rehabilitación de hombro utilizando realidad virtual e incluyendo la medición de los rangos de movilidad del ángulo glenohumeral.

### **3.2.2. Objetivos específicos**

1. Diseñar una plataforma en realidad virtual para la rehabilitación de hombro.
2. Implementar en la plataforma diseñada un sistema de medición de la movilidad de la apertura entre brazo y torso y de la fuerza articular.
3. Evaluar el desempeño de la plataforma en usuarios con o sin patología de afectación articular.

## Capítulo 4

# Materiales y métodos.

En este apartado se explica el funcionamiento de todos los componentes hardware y software necesarios para conseguir el desarrollo de la plataforma.

### 4.1. Descripción del hardware.

#### 4.1.1. Oculus Quest 2.

El casco Oculus Quest 2 o Meta Quest 2 Figura 1, es un dispositivo de VR, que consta de un casco en cuyo interior hay dos pantallas por las cuales se proyecta una visión 3D estereoscópica al usuario. Este dispositivo permite la interacción básica con objetos como sujetar, arrojar e interactuar diversas dinámicas basado en leyes físicas del entorno real como la gravedad. A diferencia de su antecesor el dispositivo Oculus Rift, el Oculus Quest 2 no necesita una conexión a una computadora para funcionar, además de poseer la capacidad de reconocer el movimiento de las manos del usuario mediante sus cuatro cámaras delanteras.



Figura 1: Oculus Quest 2.  
Imagen tomada de [34].

A continuación, según [34], se describen las principales características del dispositivo Oculus Quest 2 utilizado en esta investigación.

- Dimensiones del dispositivo 224mm x 450mm.
- Sistema de seguimiento de seis grados de libertad mediante cuatro cámaras infrarrojas internas.
- Pantallas LCD con resolución de 1832 x 1920.
- Frecuencia de refresco de 60, 72 y 90 Hz.
- Almacenamiento interno de 128 GB.
- Procesador Snapdragon XR2.
- Memoria Ram de 6 GB.
- Conexión inalámbrica mediante Wifi y Bluetooth 5.1.
- Puertos USB tipo C.

---

## 4.2. Descripción del software.

Para el desarrollo de la plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad, se utilizaron las siguientes herramientas software:

- **Unity 3D**

Para el desarrollo gráfico y funcionalidad de la plataforma se utilizó Unity 3D en su versión 2021.3.14f1. Unity 3D es un motor gráfico multiplataforma 2D y 3D, perteneciente a Unity Technologies. Actualmente, se utiliza para la creación de videojuegos y permite desarrollar una gran cantidad de aplicaciones para varios dispositivos sin cambiar de plataforma [35].

- **Kit de desarrollo de software para el dispositivo Oculus Quest 2**

Meta proporciona un kit de desarrollo de software específico para el dispositivo Oculus Quest 2. Con este kit de desarrollo (SDK) es posible acceder desde Unity a las características del dispositivo que serán utilizadas en el proceso de desarrollo, como las entradas de usuario, controladores de movimiento, renderizado y tasa de refresco de imágenes entre otras funcionalidades [36].

- **Visual Studio**

Visual Studio es una plataforma de lanzamiento de aplicaciones (IDE) utilizada para la edición, depuración y compilación de código, en esta oportunidad se usa para el lanzamiento de aplicaciones enlazadas con Unity en su versión 2022. Además Visual Studio incluye complementos .NET y servicio Web que permiten la conexión a la red y herramientas de auto completado de código en los lenguajes de programación utilizados por Unity C# y C++, mejorando el proceso de desarrollo de software [37].



---

### 4.3. Descripción del sistema realizado.

A continuación se muestra el proceso de desarrollo de la plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual, con medición de los rangos de movilidad en Unity 3D. El proceso de desarrollo incluye el diseño del escenario, ejercicios y cálculo matemático implementados en la aplicación.

#### 4.3.1. Diagrama de flujo.

En la Figura 2 se representa el diagrama de flujo general de la plataforma y las operaciones inmersas en su funcionamiento.

El primer paso para comenzar a utilizar la plataforma es el uso del hardware, el cual se representa en los primeros elementos en paralelo del diagrama de flujo **Usuario** y **Oculus Quest 2**, la primera operación es el **Inicio de sesión** en donde se almacenan los datos de cada usuario por separado y permite continuar con la actividad **Testeo** en la cual se realiza la operación principal de la plataforma el **Calculo de rangos de movilidad**, la ultima actividad son los **Ejercicios de entrenamiento** realizando la operación de **Recopilación de información por ejercicio**, obteniendo datos como el tiempo de interacción y puntuación de cada ejercicio por separado y almacenados por medio de la operación **Conexión con la base de datos**.

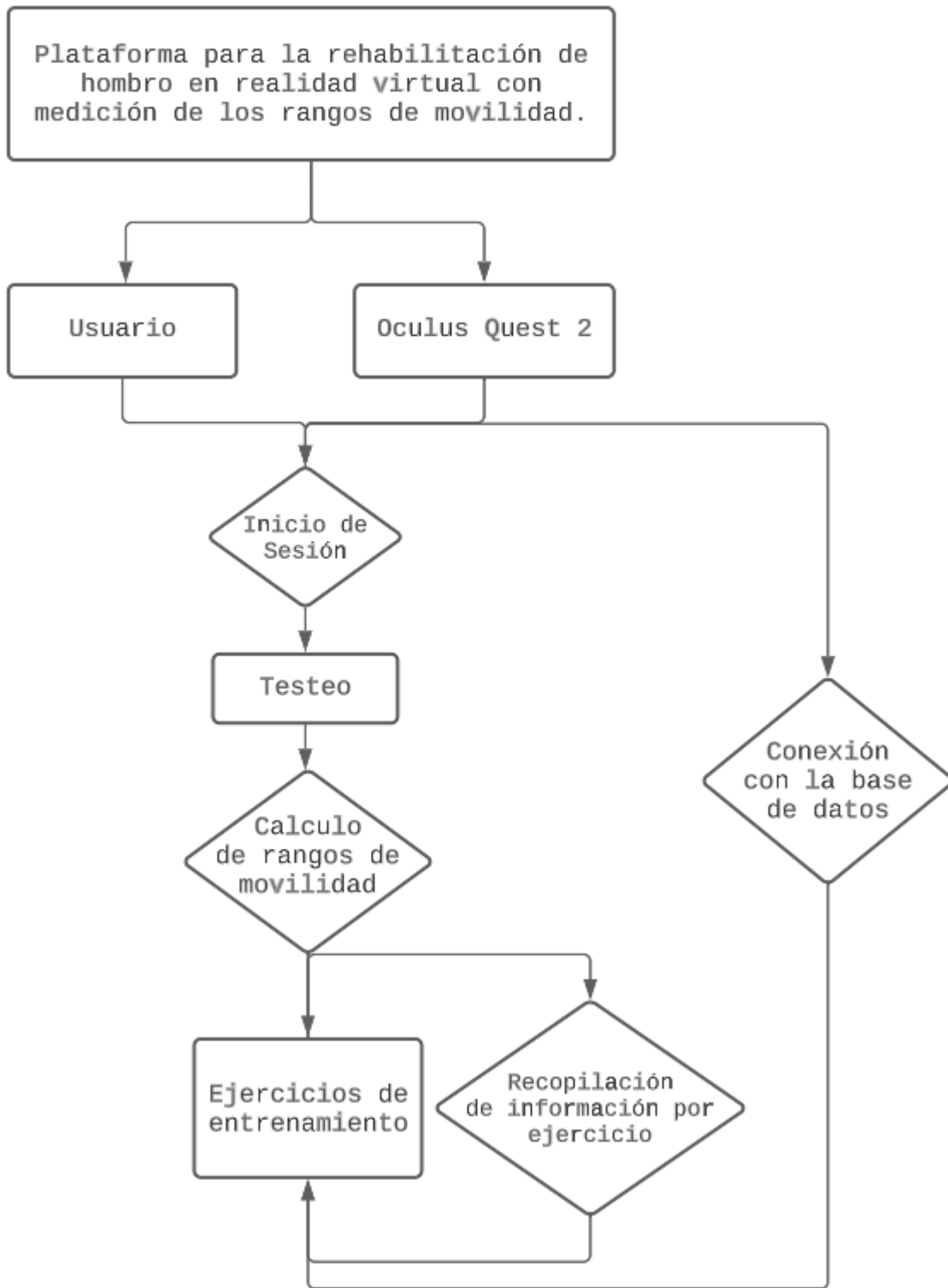


Figura 2: Diagrama de flujo general de la plataforma.

---

### 4.3.2. Configuración inicial.

Para realizar el desarrollo en la plataforma de Unity 3D, se realizó la configuración inicial del proyecto llevando a cabo los siguientes pasos:

- En **Unity Hub** se selecciona la opción **New project** y se escoge la versión **2021.3.14f1** y el formato del proyecto **3D Core**.
- Una vez en el editor se da click en **File, Build Settings** y luego en **Project Settings**.
- Se despliega el menú de configuración del proyecto. Nos dirigimos al apartado de **XR Plug-in Management** y seleccionamos la opción **Oculus**.
- En el apartado Oculus se deben seleccionar las opciones de **Quest** y **Quest 2** como muestra la Figura 3.
- A continuación se realizó la instalación del **SDK del Oculus**. Dando click en **Asset Store** en la parte superior del proyecto en Unity, y se realiza la búsqueda con las palabras **Oculus Integration**, para luego **instalar** en el proyecto.
- Al tener instalado el **SDK** se busca en la carpeta **Assets/Oculus XR Plug-in/** los componentes **Locomotion System, XR Interaction Manager** y **XR Origin** los cuales permiten la interacción de los controles y el movimiento del usuario, y se agregan a la escena Figuras 4 y 5.
- En la misma dirección anterior se encontrará el componente **XR Grab Interactable**, el cual se debe agregar a todo objeto con el cual se vaya a interactuar durante la sesión.
- Por último se crea una habitación en forma de cubo utilizando los objetos predefinidos de Unity: **plane** para el suelo y **cube** para las paredes. La habitación se encontrará ubicada en las coordenadas (X: 0, Y: 0, Z: 0) y de escala (X: 0.5, Y: 1, Z: 0.5), en la cual cada lado del cubo será utilizado para realizar un ejercicio. Véase la distribución en 2D en la Figura 6.

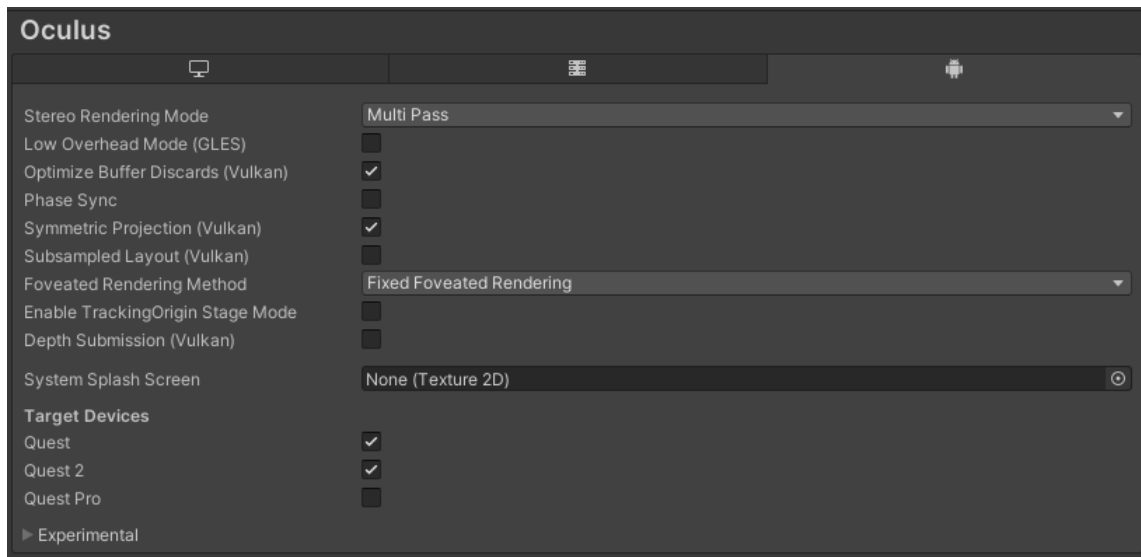


Figura 3: Configuración inicial apartado Oculus.

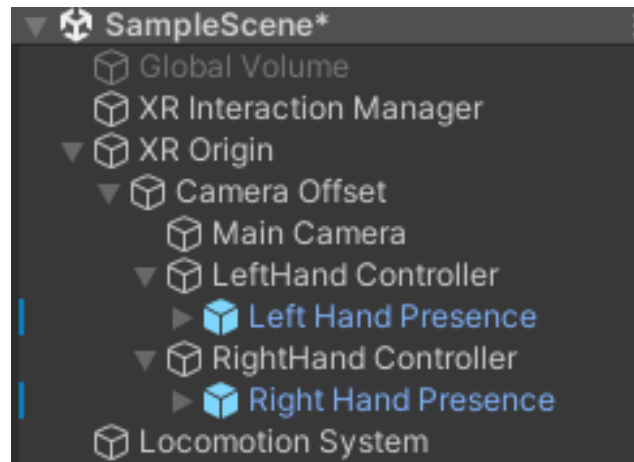


Figura 4: Configuración inicial componentes SDK de movimiento.

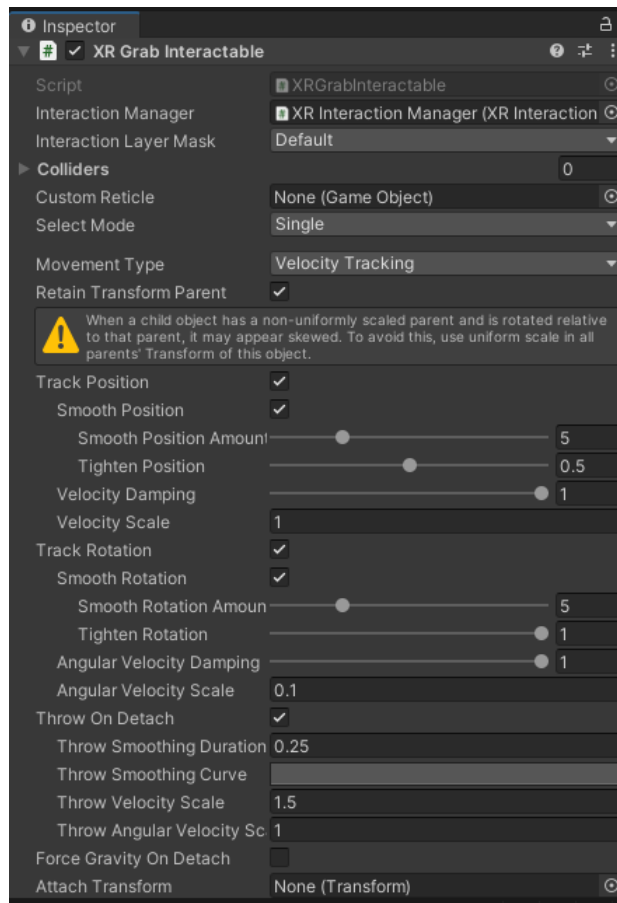


Figura 5: Configuración inicial componentes SDK de interacción.

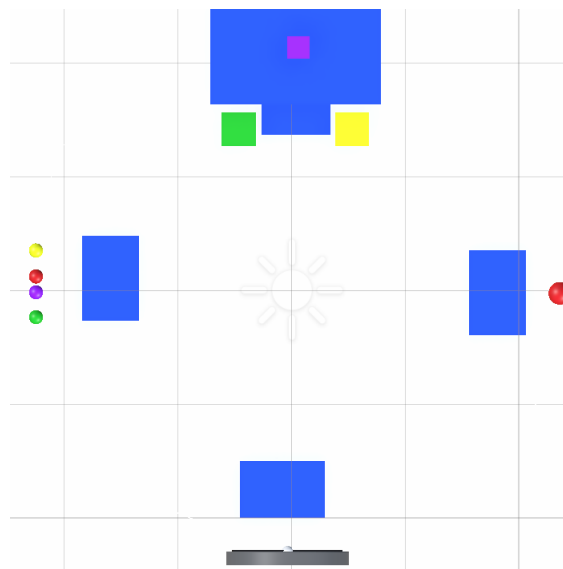


Figura 6: Plano 2D de distribución de la escena.

---

En este punto se encuentra realizada la configuración básica de la plataforma, permitiendo el movimiento del usuario y la interacción con algunos objetos, además de la creación y visualización de la habitación virtual.

### 4.3.3. Configuración del entorno y testeo.

Este apartado esta enfocaremos en el inicio de sesión por parte del usuario, y en el ejercicio de testeo en el cual se calcularán los rangos de movilidad del usuario en flexión y aducción horizontal de hombro, según referencias del mundo real como la ubicación de los hombros. Para llevar acabo esto se realizaron códigos de script los cuales serán nombrados y publicados en GitHub. Las configuraciones del entorno de Unity serán mostradas a continuación:

#### Entorno virtual.

- Primero se genera un nuevo **objeto vacío** tipo **entidad** para almacenar los objetos que se crearán.
- Se crearon diez **cubos** modificándose con la escala general de objetos en Unity dada en metros (X: 0.2, Y: 0.08, Z: 0.05) para obtener la apariencia de rectángulos, los cuales servirán como botones de selección de usuario. Cada botón contiene el código **User** el cual permite atraer la **tag** de cada usuario en Unity. Véase en la Figura 7.
- Se crea un objeto tipo **canvas** de la siguiente forma. Se da click derecho en la escena **Create/UI/Canvas**, otorgándole el nombre de **Canvas Login**. Es posible visualizar este canvas en la Figura 8.
- Con el mismo método anterior se creó un **cubo** el cual funcionará como botón de aceptar. Contiene el código **Sesión**, el cual permite mediante la **tag** obtenida por el código **User** la **ID** única de cada usuario en la base de datos y la activación del ejercicio de calibración. En la Figura 9 podemos apreciar la disposición final de los elementos nombrados en el entorno virtual.
- Se crea nuevamente un **objeto vacío** y se le da el nombre de **calibración**. Se crea un **canvas** con las mismas especificaciones anteriores, ilustrado en la Figura 10. Se crean dos **esferas** denominadas **Hombro Izquierdo** en color verde y **Hombro Derecho** en color amarillo, las cuales serán utilizadas para la referencia del mundo real al virtual de la posición de los hombros del

---

usuario y un botón con el código **Panel inicial**, el cual permite la activación del ejercicio de testeo.

- Se crea un **objeto vacío** de nombre **Test** el cual contendrá el código **Test**, permitiendo el cálculo de los rangos de movilidad mediante operaciones matemáticas y puntos de referencia en el entorno virtual.
- Se crea un **Canvas** dominando **CanCalibracion Test**, Figura 11, de igual forma se crean cuatro **esferas** con los siguientes nombres y colores: **Superior** en color rojo, **Inferior** en color violeta, **Derecha** en color amarillo e **Izquierda** en color verde, Figura 12, la cuales nos servirán como referencia del movimiento limpio del hombro del usuario al ser movilizado, y una **plataforma azul** como punto de partida para el usuario, Figura 13.
- Para mayor facilidad se crea una **imagen** de señalización con flechas de tamaño apropiado, las cuales indican la dirección hacia la cual se deben dirigir las esferas, Figura 14.
- Se crea un **botón** el cual contendrá los códigos **Acción Activador** y **Aceptar Test**, los cuales iniciarán una cuenta regresiva de treinta segundos para movilizar las esferas **Superior** hacia **arriba**, **Inferior** hacia **abajo**, **Derecha** hacia el hemisferio **derecho** del usuario e **Izquierda** hacia el hemisferio **izquierdo** del usuario.
- Se bloquean las posiciones de las esferas **Superior** e **Inferior** en el componente predeterminado de Unity **Rigidbody**, como se muestra en la Figura 15, con el fin de evitar movilizaciones inadecuadas al ejercicio. En la Figura 16 podemos apreciar la disposición final de los elementos nombrados en el entorno virtual para la actividad Testeo.
- Se crea un **canvas** denominado **Canvas Logout** el cual permite al usuario cerrar sesión mediante el botón con el código **Logout** y activar nuevamente el inicio de sesión, Figura 17.

Por último se muestra la jerarquía de objetos de Test en la escena de Unity, Figura 18.

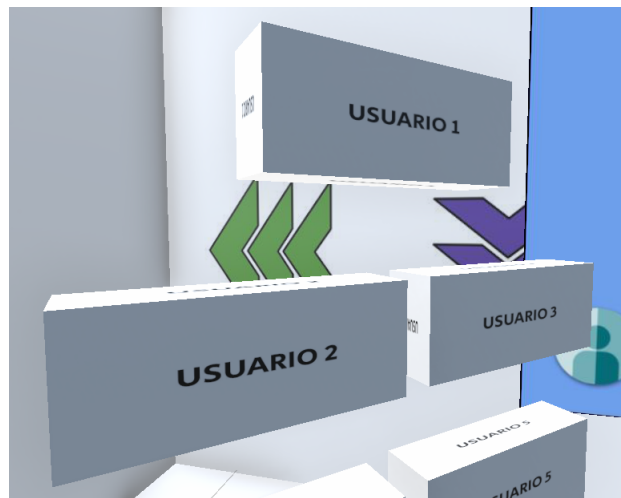


Figura 7: Botones de selección de usuario.



Figura 8: Canvas Login.



Figura 9: Inicio de sesión disposición final.



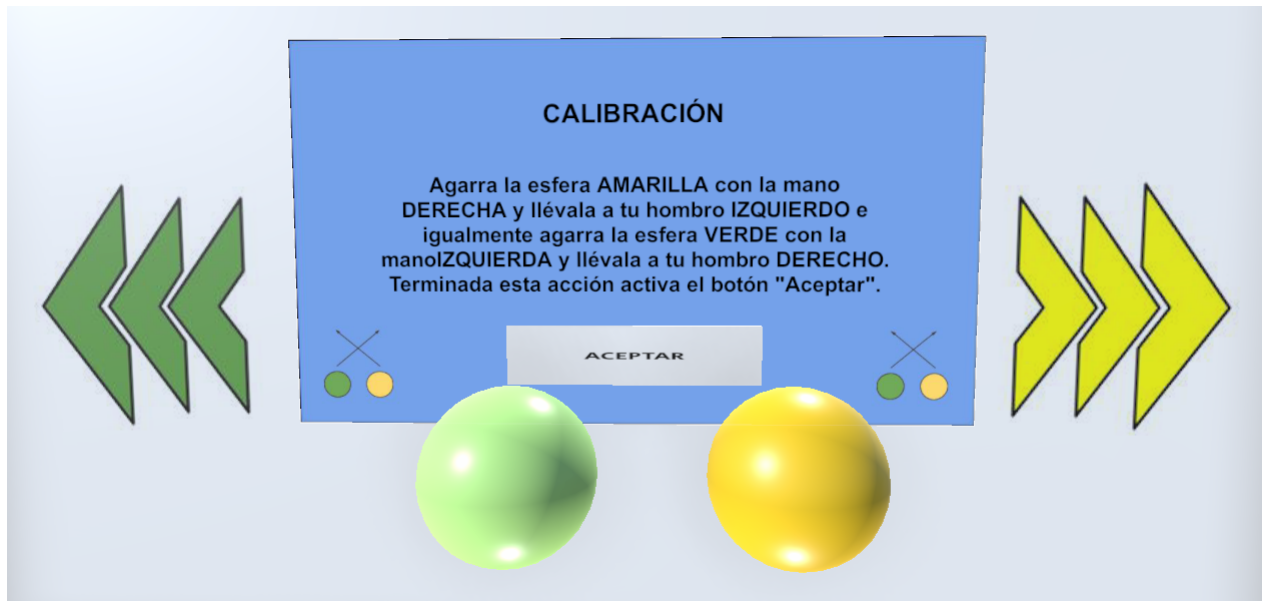


Figura 10: Canvas calibración.



Figura 11: Canvas Testeo.

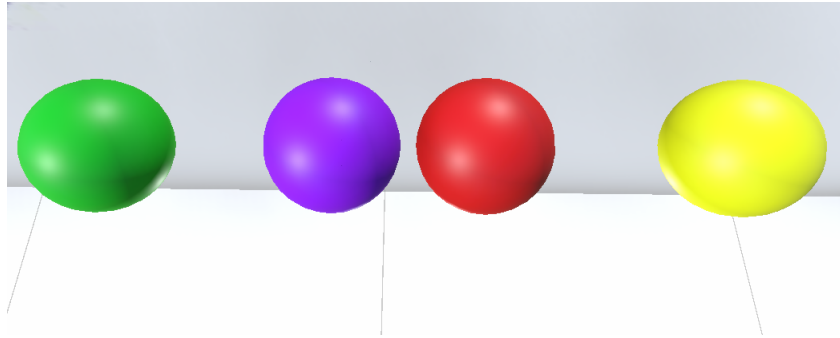


Figura 12: Esferas Test.

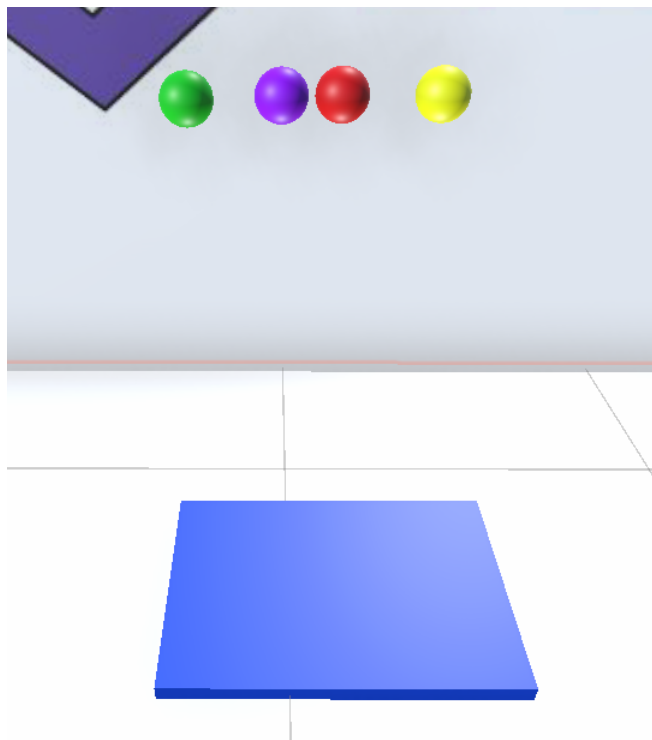


Figura 13: Plataforma azul.

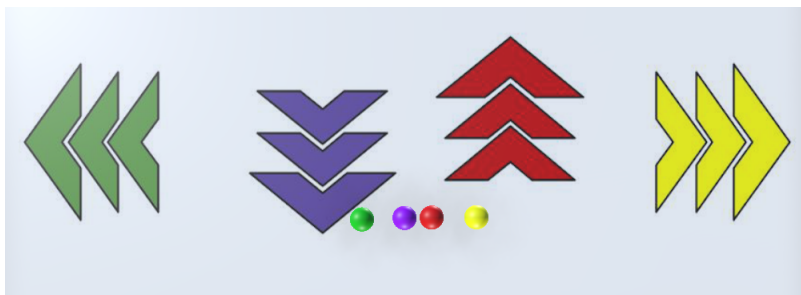


Figura 14: Señalización esferas Test.

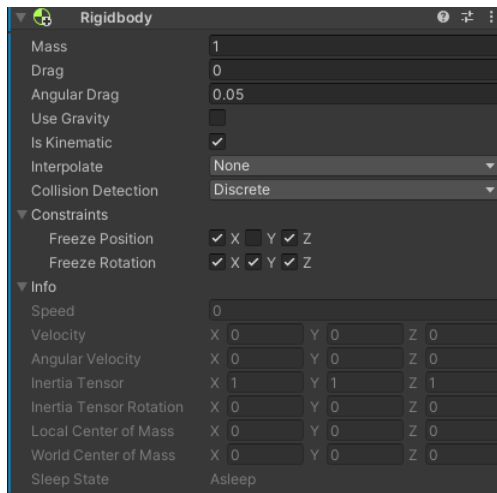


Figura 15: Bloqueo de posiciones esferas Test.

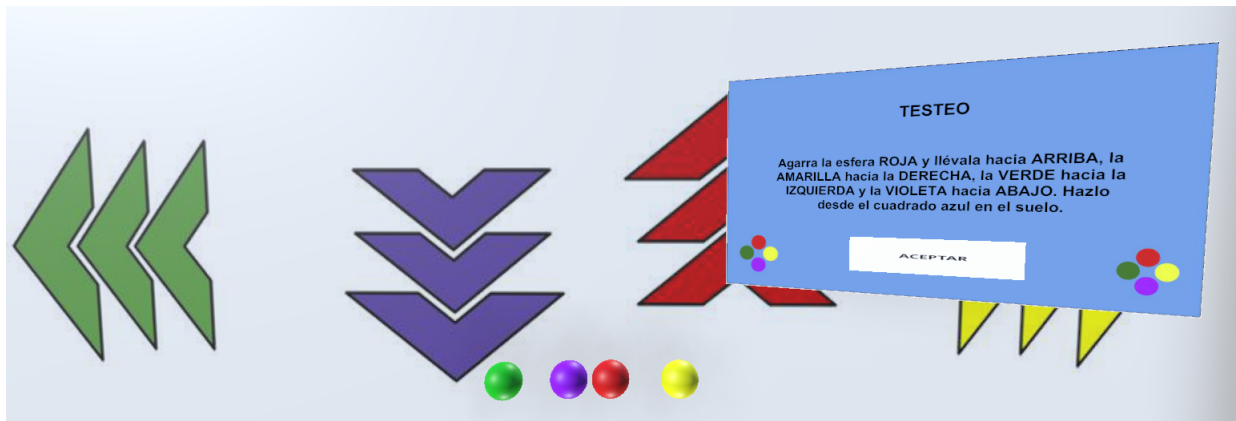


Figura 16: Disposición final Test.

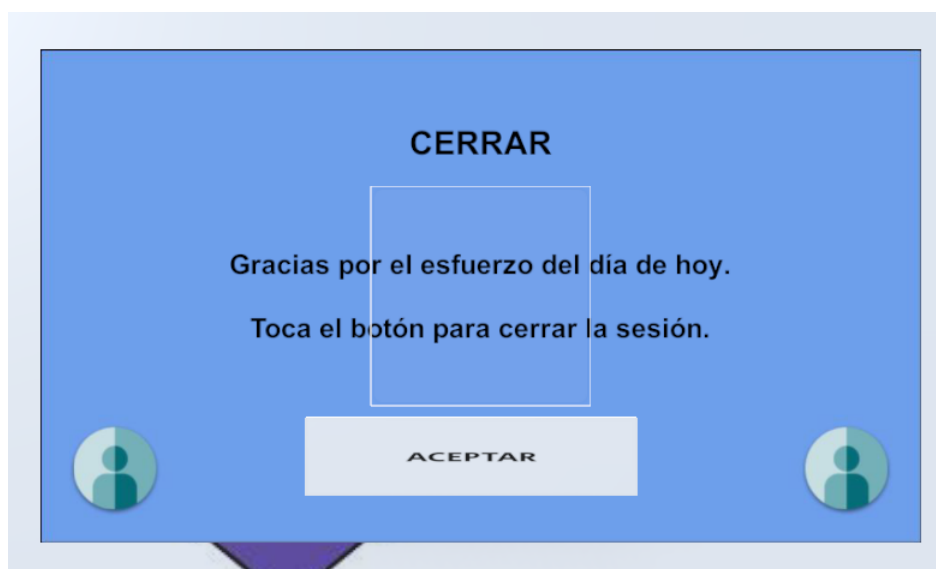


Figura 17: Canvas Logout.

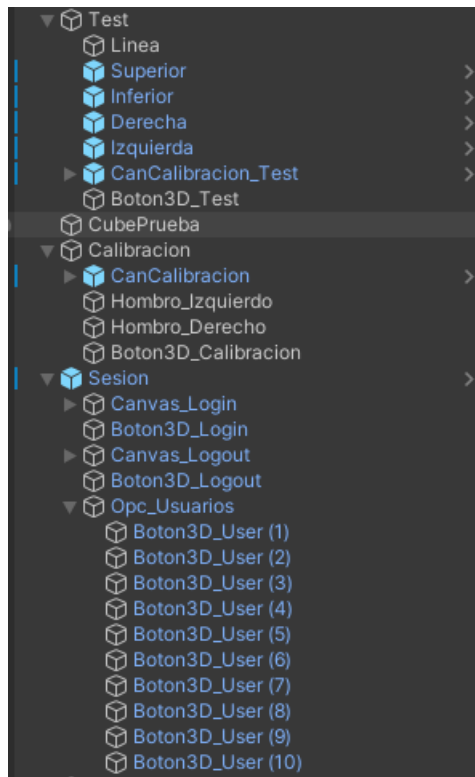


Figura 18: Jerarquía de objetos Test.

## Cálculo de rangos de movilidad en Unity.

Para el cálculo de los rangos de movilidad de cada usuario se tomaron como referencia los siguientes datos:

- Altura del usuario por medio de las **esferas** denominadas **Hombro Izquierdo** en color verde y **Hombro Derecho** en color amarillo explicadas anteriormente.
- Ubicación en el plano de Unity de las **esferas**: **Superior** en color rojo, **Inferior** en color violeta, **Derecha** en color amarillo e **Izquierda** en color verde.

## Procedimiento de calculo de rangos de movilidad

- El usuario debe completar la actividad **calibración** la cual le permitirá al **código Test** en su procedimiento **Lectura ()**, obtener la referencia en el plano virtual de la altura del usuario, como se ilustra en las Figuras 19 y 20.
- El usuario debe movilizar las **esferas** de la actividad **Testeo** de forma correcta, generando triángulos rectángulos entre las posiciones de cada esfera, como se ilustra en las Figuras 21 y 22.

---

Una vez se obtienen todos los puntos de referencia en el plano virtual se utiliza la siguiente ecuación para calcular los ángulos generados:

$$\theta = \cot\left(\frac{CatetoOpuesto}{CatetoAdyacente}\right)$$

Esta operación se repite con cada ángulo, obteniéndose los rangos de movilidad de los movimientos limpios de **Flexión** y **Aducción horizontal** ejemplificados en las Figuras 21 y 22 como  $\alpha$  y  $\theta$ .

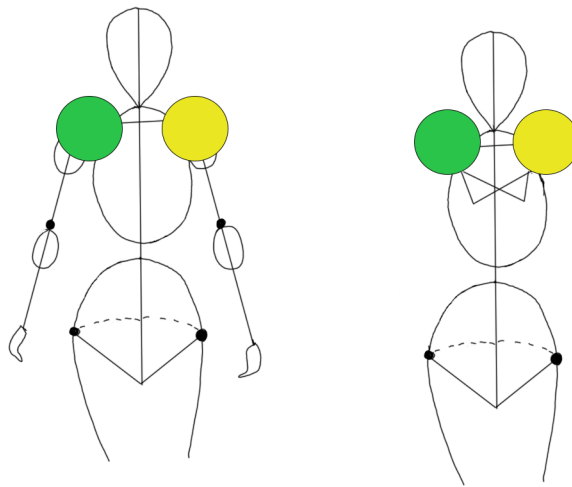


Figura 19: Calibración vista frontal.

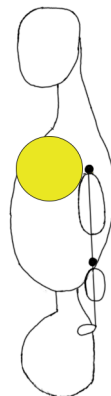


Figura 20: Calibración vista lateral.

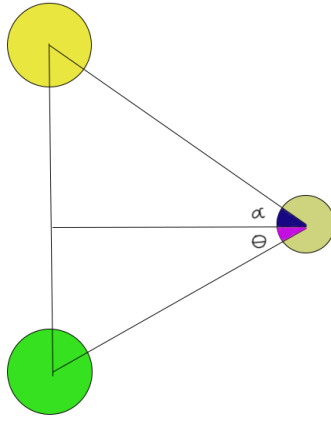


Figura 21: Triángulos generados horizontalmente.

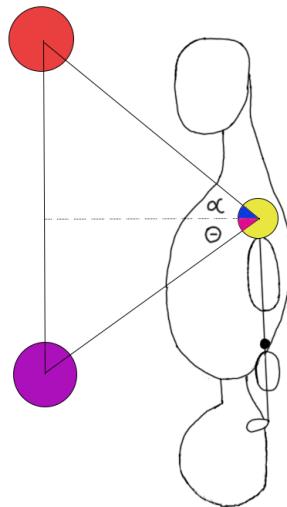


Figura 22: Triángulos generados verticalmente.

---

#### 4.3.4. Configuración ejercicios de entrenamiento.

Los ejercicios o actividades de entrenamiento tienen como objetivo recrear movimientos de fortalecimiento para la recuperación de rangos de movilidad, los cuales fueron sugeridos por la docente Clara Inés Paz Peña e implementados bajo la guía de la estudiante Tania Vanesa Losada Garzón, del programa de Fisioterapia de la Universidad del Cauca. Este conjunto de ejercicios busca que el usuario realice los siguientes movimientos:

- En la actividad nombrada **Mesa** el usuario debe llevar un **cubo** de color **violeta** con su miembro superior **afectado** y colisionarlo con dos **contenedores** en forma de **rectángulo** que se encontraran a sus lados. En esta actividad el usuario entrenará el movimiento de **extensión** y **aducción horizontal**, Figura 23.
- En la actividad nombrada **Reloj** el usuario debe llevar un **rectángulo** de color **negro** con su miembro superior **afectado** y colisionarlo con una **esfera** de color **cyan**, que se encontrará al interior del **reloj**. En esta actividad el usuario entrenará el movimiento de **Abducción**, Figura 24.
- En la actividad nombrada **Matriz** el usuario debe llevar una **esfera** de color **rojo** con su miembro superior **afectado** y colisionarlo con una **esfera** de color **violeta** que se encontrará en posiciones aleatorias. En esta actividad el usuario entrenará el movimiento de **flexión**, Figura 25.

Durante cada una de estas actividades se almacenará el tiempo de interacción del usuario con los objetos. La puntuación será acorde al número de colisiones que logre el usuario antes de terminar cada actividad en su tiempo máximo.

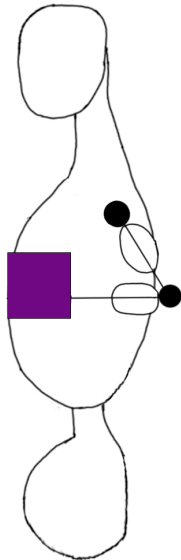


Figura 23: Movimiento del usuario Actividad Mesa.

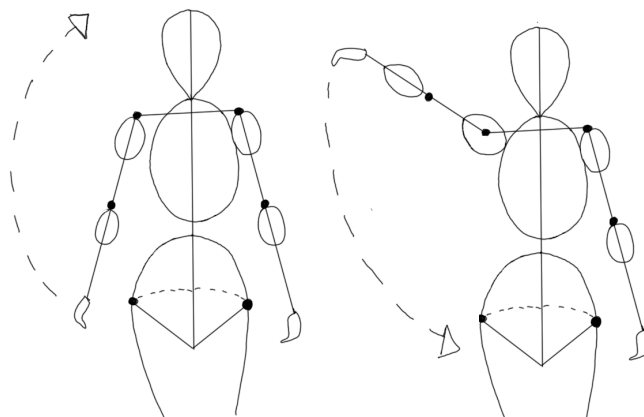


Figura 24: Movimiento del usuario Actividad Reloj.



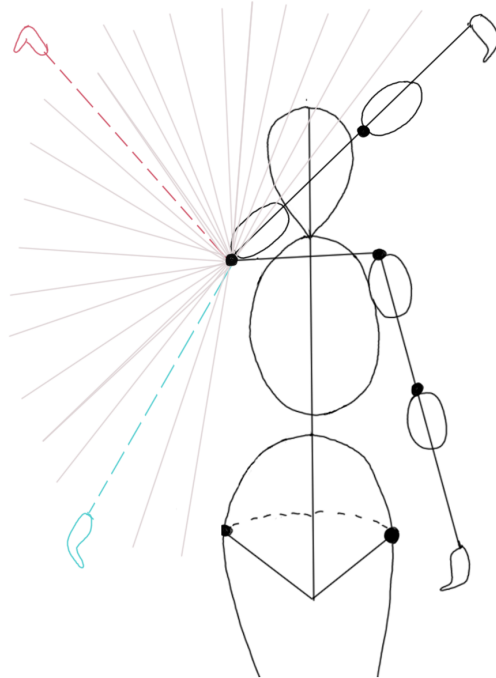


Figura 25: Movimiento del usuario Actividad Matriz.

## Configuración General Actividades

- Se crea un **objeto vacío** para cada uno de los ejercicios y se le asigna el mismo nombre: Reloj, Matriz, Mesa. En cada **objeto vacío** se almacenarán las entidades únicas de cada ejercicio.
- Para cada ejercicio se crea un **botón** y un **Canvas** según el mismo procedimiento de la sección **Testeo**.
- Se crea un **objeto vacío** con el nombre de **Main** el cual contendrá el código **Spam**. Este código es el encargado de generar los objetos de cada ejercicio.
- Se debe asignar el código **Resistencia Conteo** a todo objeto con el que interactuare el usuario al interior del código **XR Grab Interactable**. Este código permitirá cronometrar el tiempo en el cual el usuario agarre el objeto, esta variable será la que nos permitirá conocer la resistencia del usuario y compararla con su fuerza articular.

---

## Mesa.

- Se crea un **objeto vacío** con el nombre **contenedores** y se le asigna el componente **Box collider** y el código **Destruir**. Al interior del objeto se crean dos **rectángulos**, uno de color **amarillo** y otro de color **verde**, Figura 26.
- Se crea una **plataforma** utilizando un **cubo** de color **azul**, la cual funcionará como mesa en el ejercicio, Figura 27.
- Se crea un **cubo** de color **violeta** al cual se le asignará la tag **M Mesa** y los códigos de interacción de objeto ya mencionados, Figura 28.
- Por último se muestra en la Figura 29 y 30 la disposición final de los objetos en el entorno virtual con su respectivo **Canvas** y en la Figura 31 la jerarquía de objetos de esta actividad.

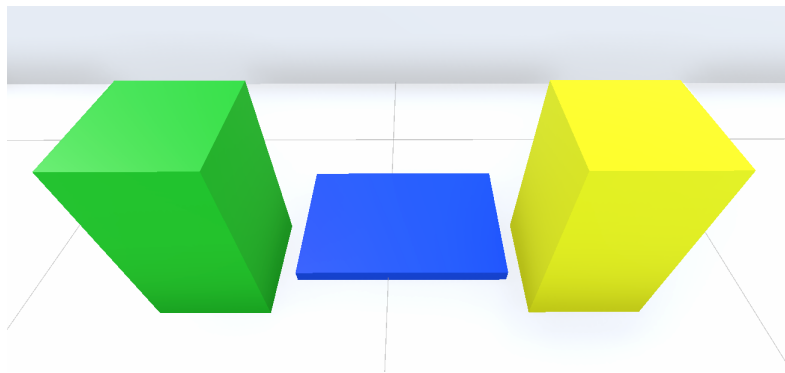


Figura 26: Contenedores.

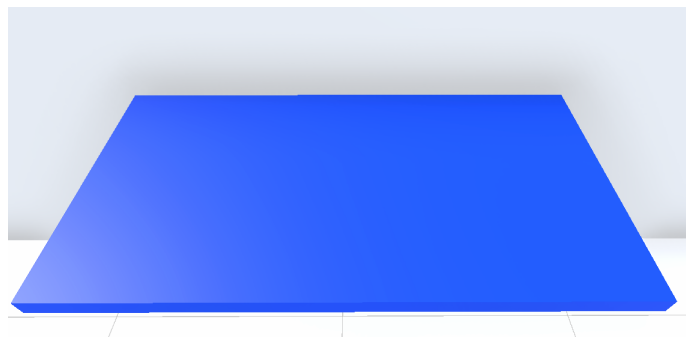


Figura 27: Plataforma.

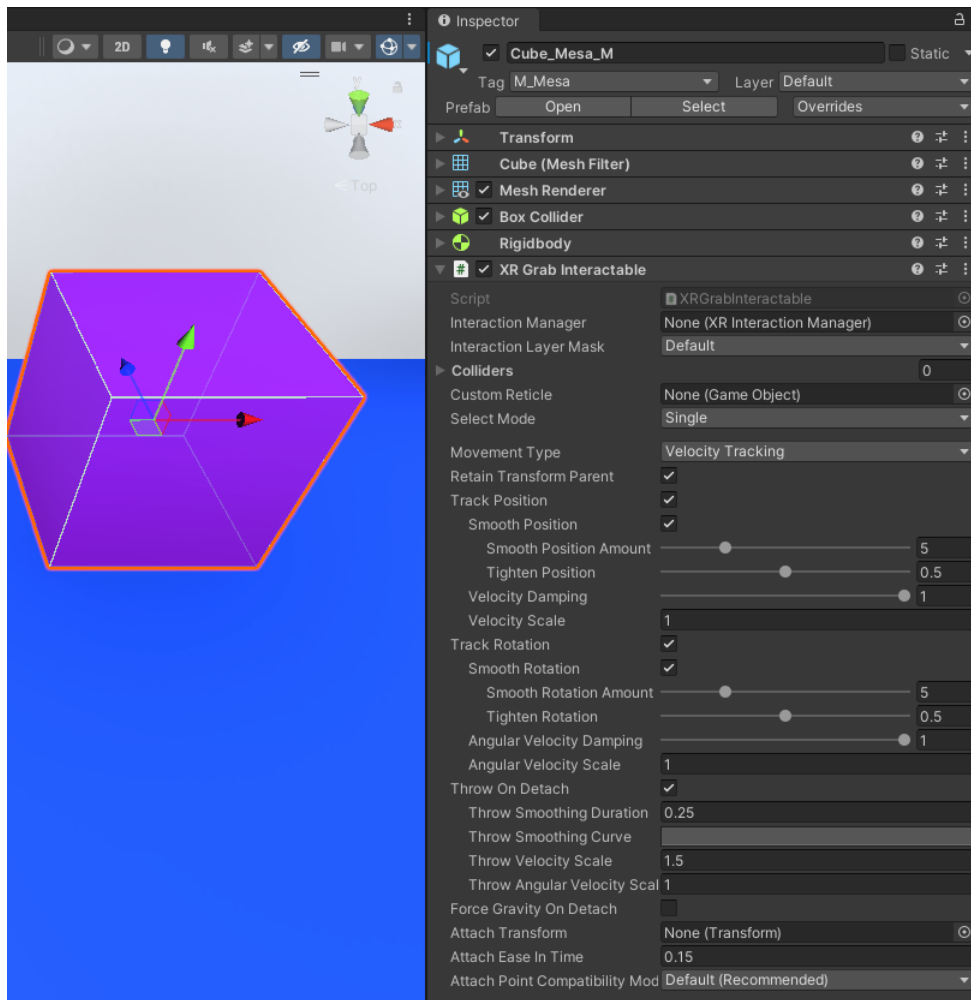


Figura 28: Cubo violeta Interacción.

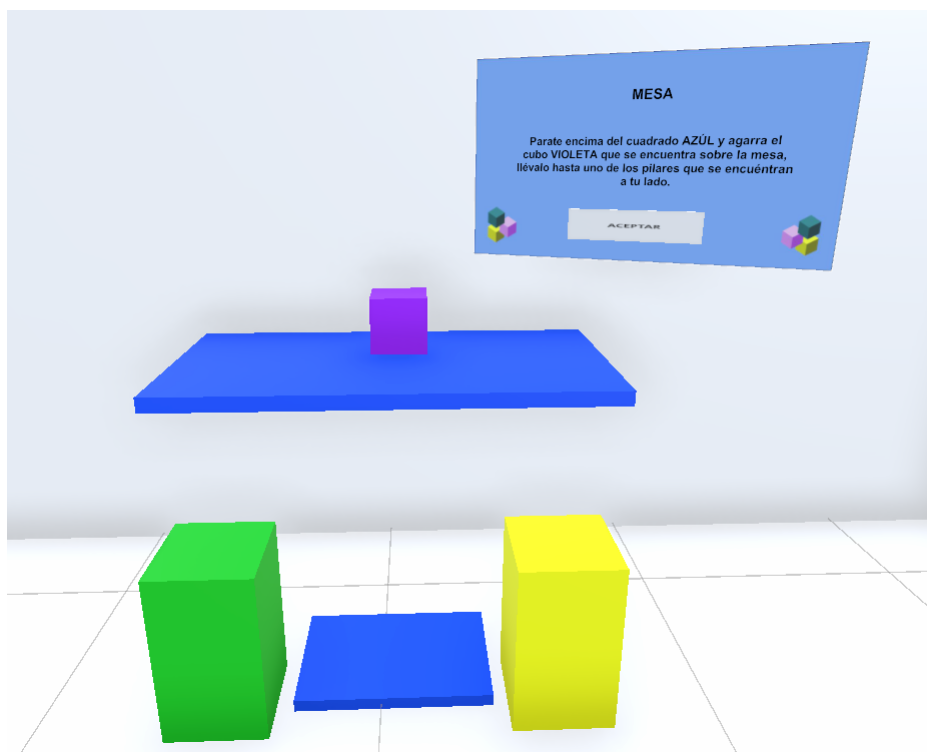


Figura 29: Actividad Mesa disposición final.

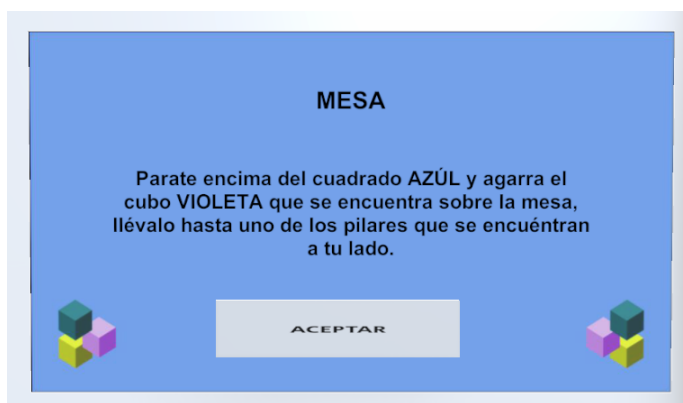


Figura 30: Canvas Actividad Mesa.

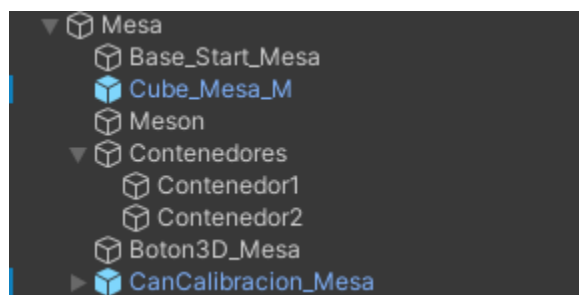


Figura 31: Jerarquía de objetos Actividad Mesa.

---

## Reloj.

- Se crea un **objeto vacío** con el nombre **Clock** y en su interior se crean dos objetos, un **rectángulo** de color **negro** con el código **Destruir** denominado **minutero**, y una **esfera blanca** en el interior del reloj como eje central, Figura 32.
- Se le asigna el componente **Rigidbody** al **minutero**, bloqueando las posiciones y rotaciones, Figura 33.
- Se crea una **esfera** de color **cyan** a la cual se le asignará la tag **M Reloj**, Figura 34.
- Por último se muestra en la Figura 35 y 36 la disposición final de los objetos en el entorno virtual con su respectivo **Canvas** y en la Figura 37 la jerarquía de objetos de esta actividad.

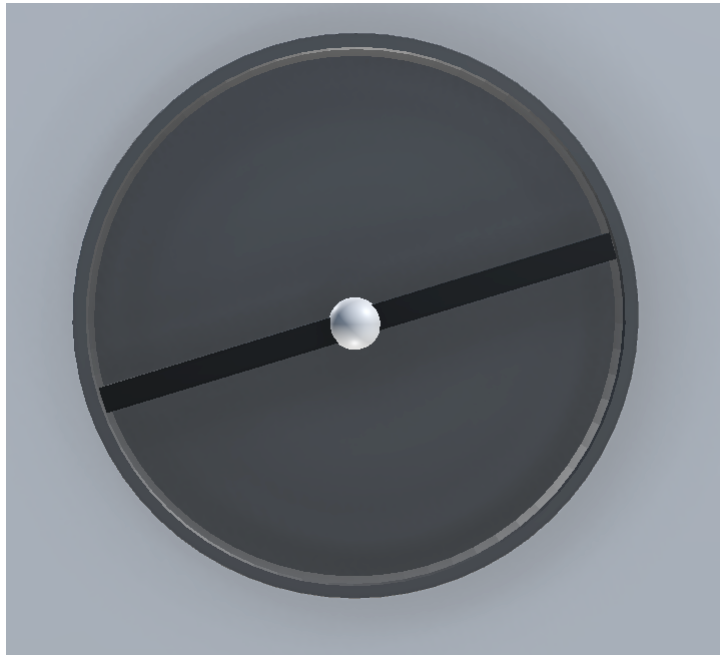


Figura 32: Reloj, esfera y minutero.

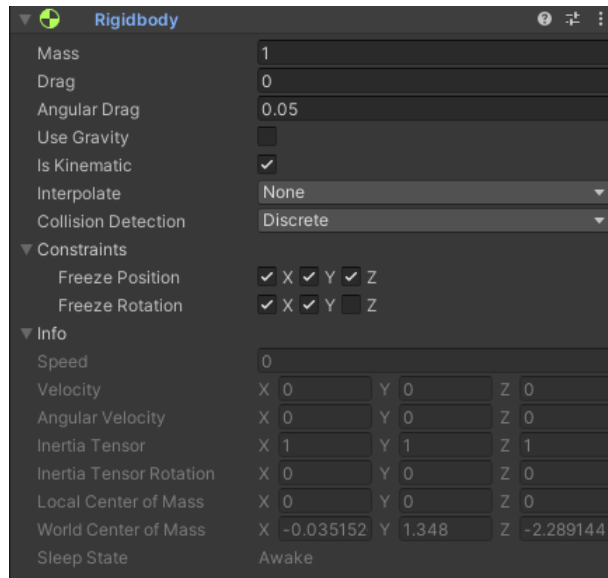


Figura 33: Componente Rigidbody.

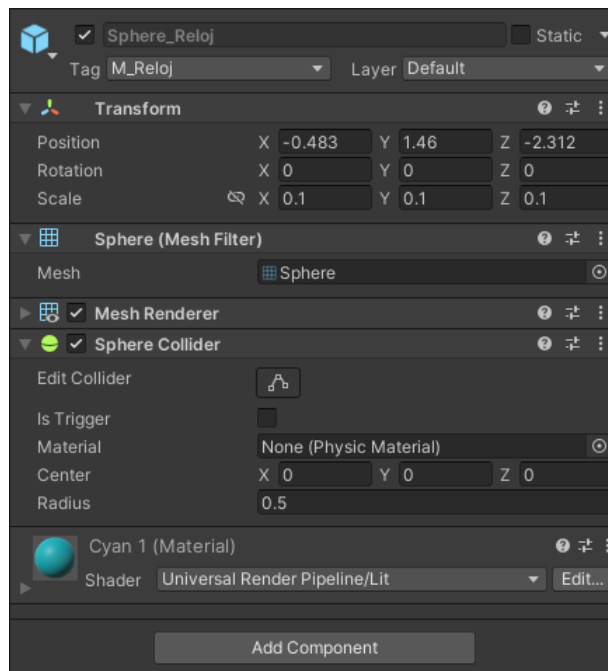


Figura 34: Esfera Cyan.

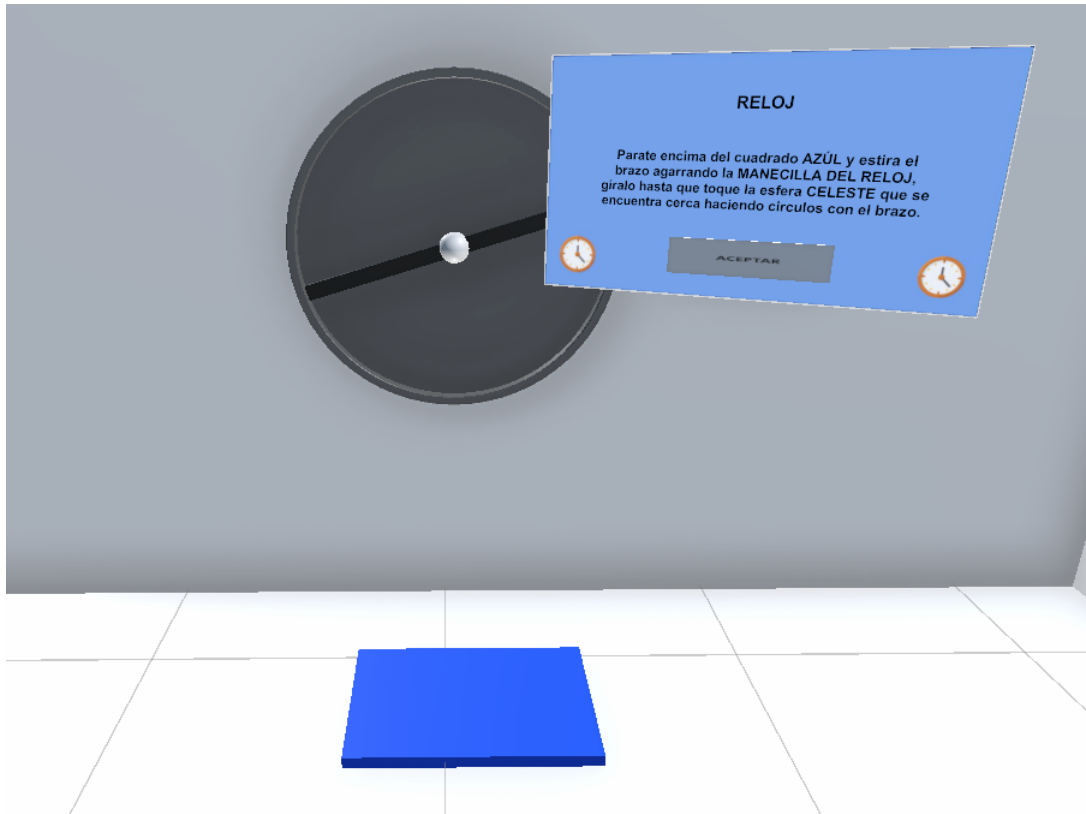


Figura 35: Actividad Reloj disposición final.

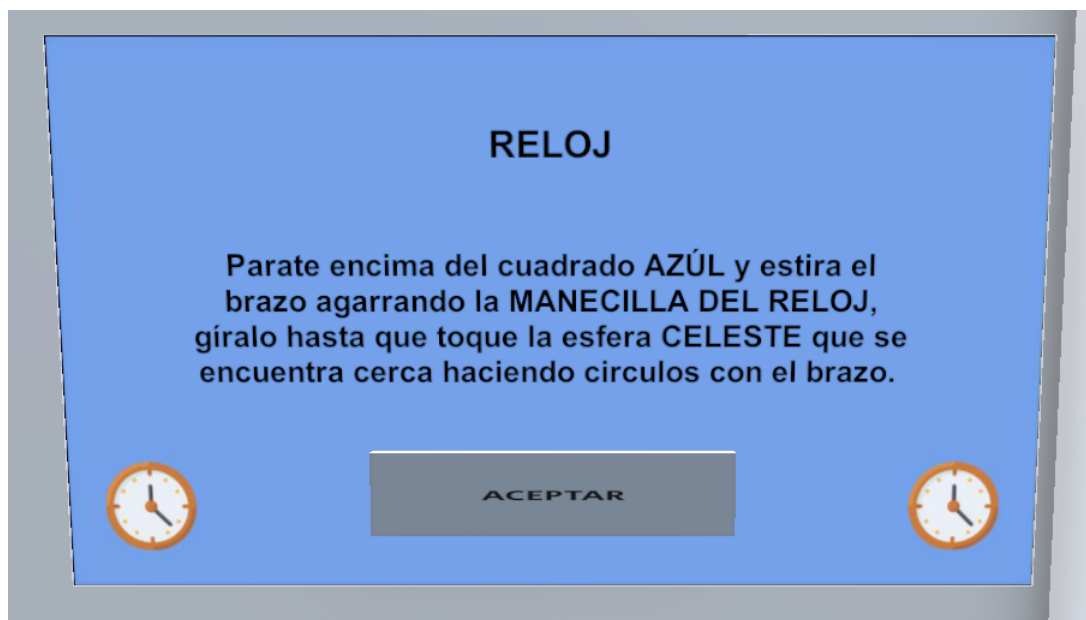


Figura 36: Canvas Actividad Reloj.



Figura 37: Jerarquía de objetos Actividad Reloj.

## Matriz.

- Se crea una **esfera** de color **violeta**, a la cual se le asignará la tag **M Matriz**, Figura 38.
- Se crean seis  **cubos** los cuales nos servirán como líneas de guía para las posiciones de la **esfera violeta**, Figura 39.
- Se crea una **esfera** de color **rojo** y los códigos de interacción de objeto ya mencionados, Figura 40, y el código **Destruir**.
- Por último se muestra en la Figura 41 y 42 la disposición final de los objetos en el entorno virtual con su respectivo **Canvas** y en la Figura 43 la jerarquía de objetos de esta actividad.

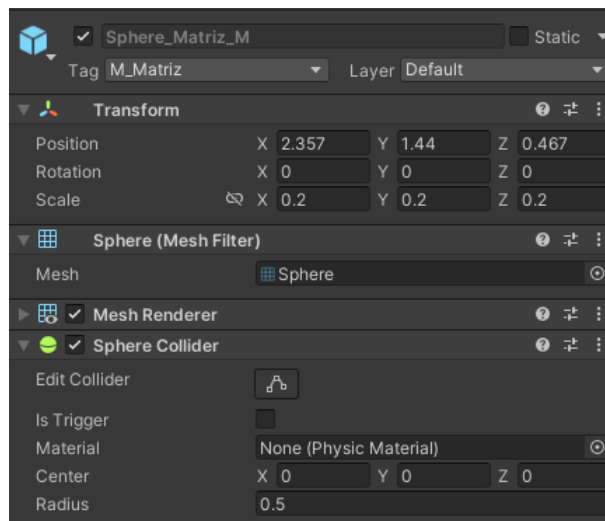


Figura 38: Esfera Violeta Inspector.



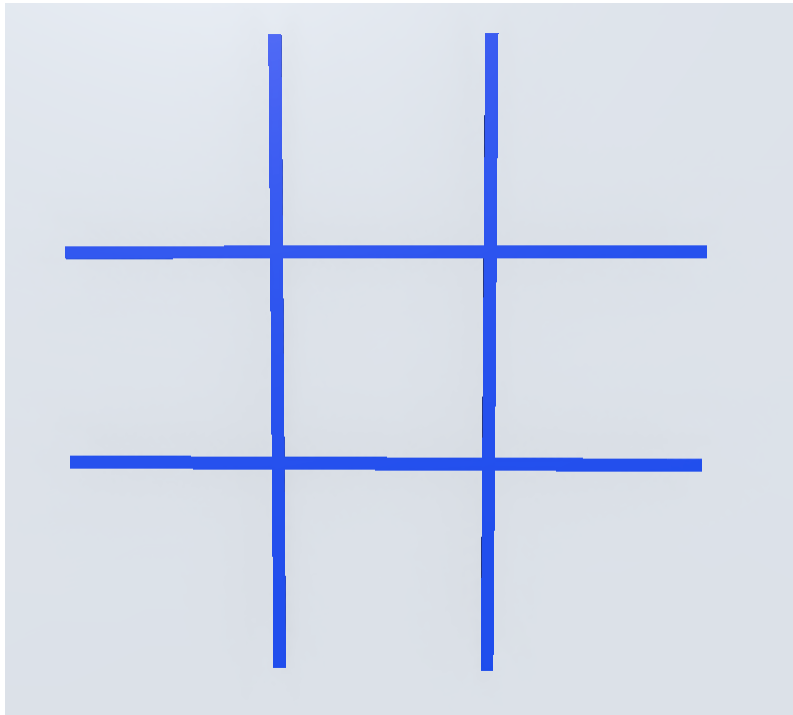


Figura 39: Lineas de referencia.

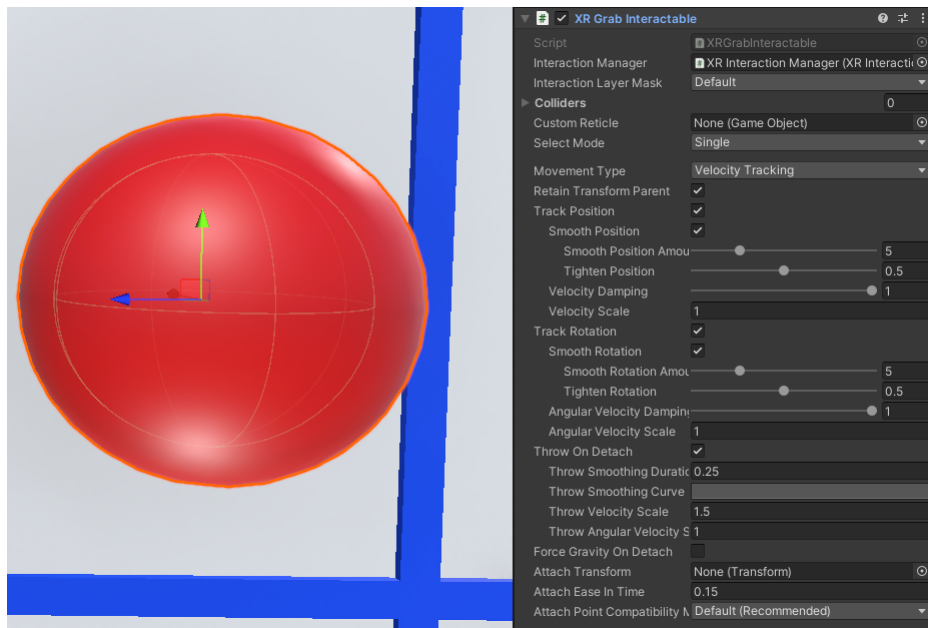


Figura 40: Esfera Roja.

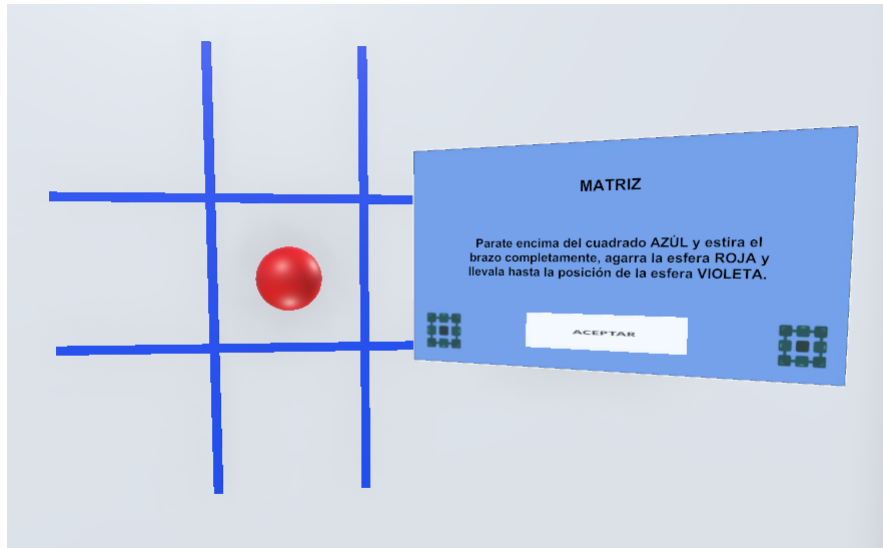


Figura 41: Actividad Matriz disposición final.

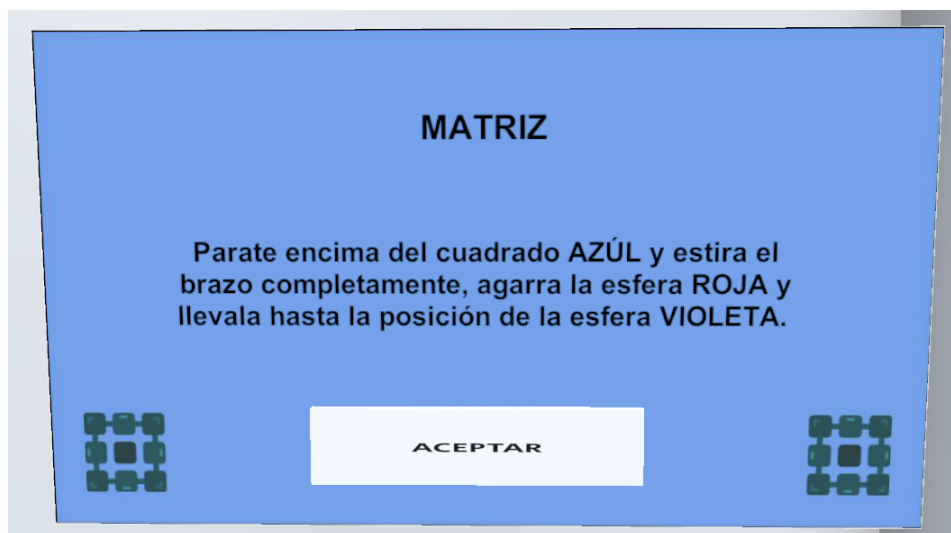


Figura 42: Canvas Actividad Matriz.

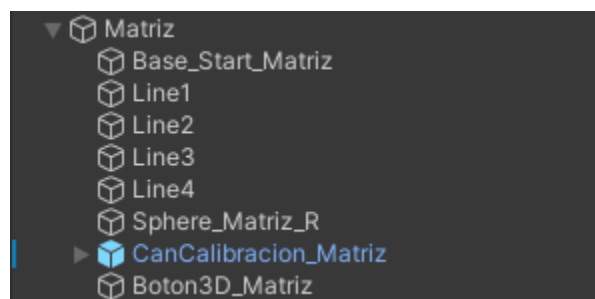


Figura 43: Jerarquía de objetos Actividad Matriz.

#### 4.3.5. Base de datos.

- Se accede al sitio web **https://www.000webhost.com** el cual permite gestionar y crear bases de datos de forma gratuita, Figura 44.
- Al ingresar, el dominio de la base de datos se crea con la dirección **https://www.000webhost** y se debe seguir la siguiente ruta para añadir los archivos de conexión **principal/administrar sitio web/administrador de archivos/subir archivos**, Figuras 45 y 46.
- En esta ubicación se deben añadir los códigos php que se encuentran en el apartado de anexos, los cuales permiten la conexión con la base de datos, Figura 47.
- Para gestionar la base de datos se debe ir al apartado de **Mis Bases de datos/Gestionar**, Figura 48 , e ingresar directamente a la dirección de phpMyAdmyn, Figura 49.
- Por último, se añade al objeto **Main** en Unity el código **Web**.

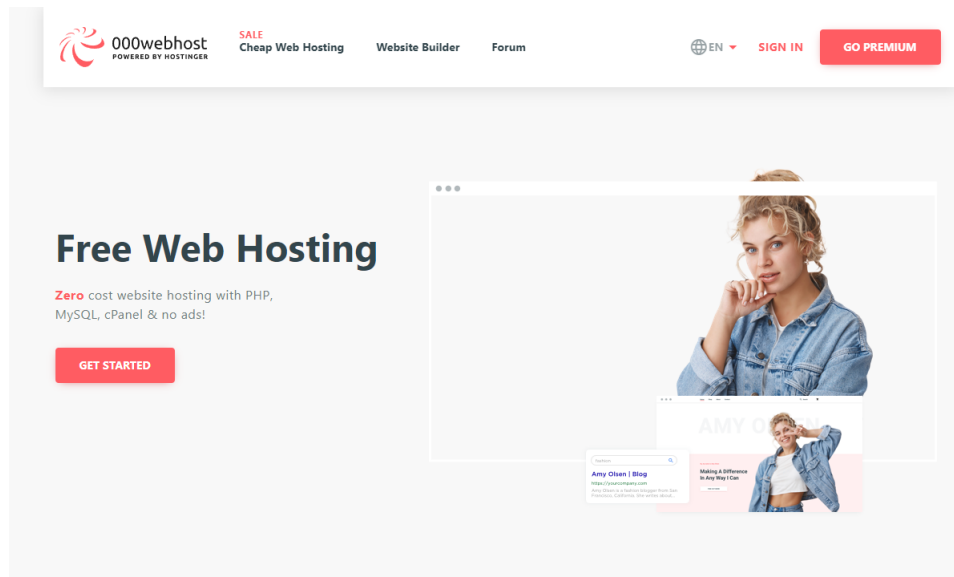


Figura 44: Pagina principal login Web Hosting.  
Imagen tomada de [38].

## Mis sitios web

Selecciona el sitio que quieres administrar, o crea uno nuevo.

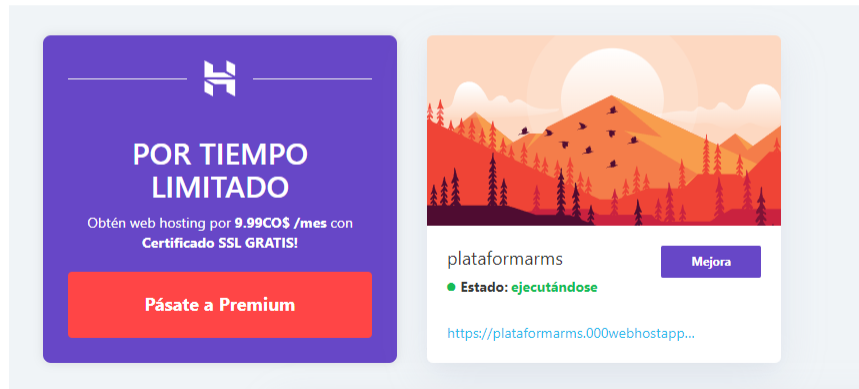


Figura 45: Pagina con sesión iniciada.  
Imagen tomada de [38].

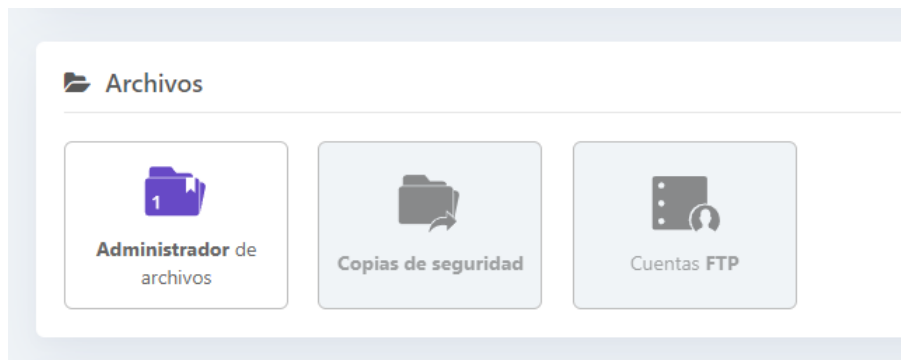


Figura 46: Gestión de archivos.  
Imagen tomada de [38].








<input type="checkbox"/>	 .htaccess	0.2 kB
<input type="checkbox"/>	 ConnectionSettings.php	0.3 kB
<input type="checkbox"/>	 DataBase_Login.php	0.4 kB
<input type="checkbox"/>	 Login.php	0.4 kB
<input type="checkbox"/>	 RegisterEntre.php	0.9 kB
<input type="checkbox"/>	 RegisterTest.php	0.8 kB
<input type="checkbox"/>	 RegisterUser.php	0.8 kB

Figura 47: Códigos de conexión.  
Imagen tomada de [38].

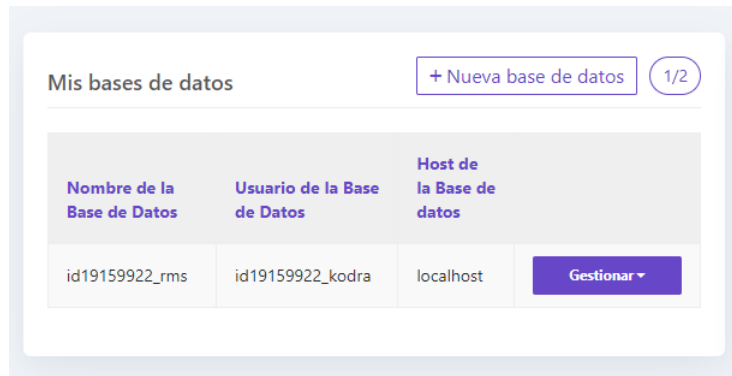


Figura 48: Gestión de bases de datos.  
Imagen tomada de [38].

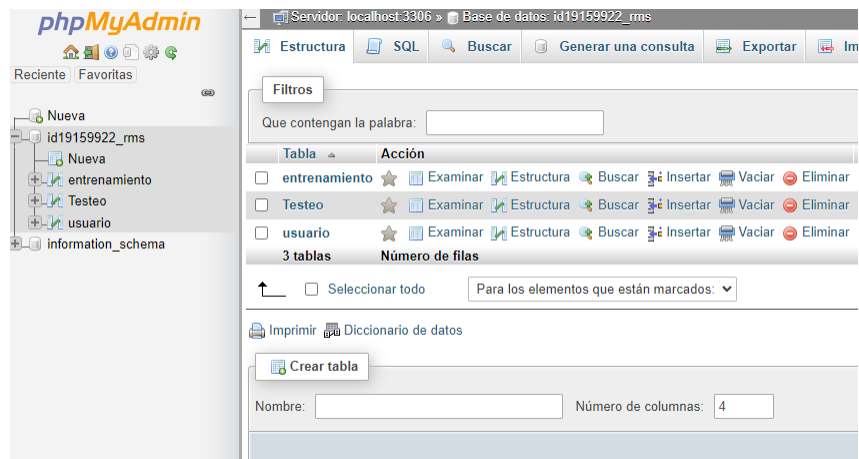


Figura 49: phpMyAdmin.  
Imagen tomada de [38].

## Capítulo 5

# Pruebas.

### 5.1. Prueba de la aplicación.

En este apartado se explica cómo se seleccionó la población de personas que cumplieran con los requisitos de uso para la plataforma, hasta el proceso de realización de pruebas con la misma.

#### 5.1.1. Instrumento evaluador

Con la tutoría de la docente Clara Inés Paz Peña y la estudiante del programa de Fisioterapia de la Universidad del Cauca Tania Vanessa Losada Garzón, se diseñó un instrumento evaluador, Figuras 50 y 51. El instrumento permitió filtrar la población de personas seleccionadas y realizar una evaluación antes y después de utilizar la plataforma.

El instrumento evaluador se implementó utilizando aparatos de medida manual, como el goniómetro, para medir los rangos de movilidad de cada usuario, Figura 52. Además, se diseñaron las siguientes secciones para la adquisición de datos de cada usuario:

- **Datos personales.**

En esta sección, se registran los datos personales del usuario, como su nombre, documento, ocupación, edad y sexo. Además, se le asigna un nombre de usuario para preservar su anonimato. Por otro lado, se diligencia la información sobre su miembro superior dominante, ya sea izquierdo o derecho, y también se especifica el miembro superior evaluado o afectado. Finalmente, se incluye

---

una casilla para indicar si la persona ya ha sido diagnosticada con alguna condición médica. Para este caso, el usuario es un estudiante de 23 años. Su miembro superior dominante es el derecho, pero su miembro superior afectado es el izquierdo. Además, no posee un diagnóstico médico previo.

#### ■ **Evaluación de dolor.**

Se realiza una caracterización del dolor, incluyendo su localización y el tiempo que ha estado presente. El dolor se presenta en una escala de evaluación con valores que van de 0 a 10, los cuales son determinados de forma subjetiva por cada usuario.

Para este caso, el usuario presenta un valor subjetivo de dolor de 6 en una escala del 0 al 10. El dolor está localizado en la región supraclavicular y ha estado presente durante un período de 10 años.

#### ■ **Sensibilidad de miembro superior.**

Esta prueba de sensibilidad se basa en dermatomas, que son áreas específicas del cuerpo que corresponden a la distribución de los nervios periféricos. Cada dermatoma está relacionado con un nervio específico y abarca una región de la piel, los músculos y otras estructuras inervadas por dicho nervio. Estas regiones son importantes para evaluar la función y sensibilidad de los nervios en el cuerpo [39].

En condiciones normales, como en las tendinopatías, la sensibilidad no se ve afectada en los dermatomas. Sin embargo, en este caso en particular, se realiza una evaluación de la sensibilidad para descartar la posibilidad de que los síntomas sean causados por una condición diferente a las tendinopatías.

En este caso, la persona no ha presentado afectaciones en la sensibilidad de las áreas evaluadas.

---

- **Reflejos osteo-tendinosos.**

Se evaluaron los reflejos osteotendinosos, también conocidos como reflejos profundos. Estos reflejos son respuestas involuntarias del sistema nervioso que ocurren cuando un tendón o un músculo se estiran bruscamente o recibe un estímulo. Su evaluación es importante para determinar la integridad y el funcionamiento de la vía neuromuscular [40].

En este caso, los reflejos osteotendinosos del miembro superior fueron evaluados de forma visual y subjetiva por el fisioterapeuta. Se categorizaron en tres grupos: hiperreflexia para respuestas intensas al estímulo, hiporreflexia para respuestas débiles y normorreflexia para respuestas normales al estímulo.

Como resultado de la evaluación, se encontró que los reflejos osteotendinosos del miembro superior eran normales en su mayoría. Sin embargo, se observó una respuesta débil en el reflejo tricpital, categorizándose como hiporreflexia.

- **Movilidad.**

Se realizó la medición de los rangos de movilidad del miembro superior para cada usuario, utilizando un goniómetro. Este instrumento de medición, compuesto por dos brazos articulados y una escala graduada, se emplea para evaluar los ángulos de movimiento de las articulaciones. Los brazos del goniómetro se colocan a lo largo de los ejes de movimiento de una articulación específica, alineándolos con los segmentos corporales adyacentes.

Esta técnica permitió medir y registrar los rangos de movimiento activos y pasivos de las articulaciones del miembro superior, identificando posibles limitaciones en la movilidad. Posteriormente, se utilizó esta información para evaluar la progresión del tratamiento con la plataforma. Los valores obtenidos se expresaron en grados, proporcionando una medida cuantitativa de los rangos de movimiento de cada usuario.

En este caso, se evaluaron todas las articulaciones del miembro superior, pero se tendrán en cuenta los datos del hombro. El usuario presentaba disminución en todos los rangos de movilidad, excepto en la muñeca.



---

## ■ **Fuerza.**

En esta sección, se utilizó la escala de fuerza manual de Daniels y Worthingham [41] para evaluar la fuerza del miembro superior. La escala se califica del 0 al 5, donde 5 representa el valor máximo de resistencia al enfrentar la fuerza de la gravedad junto con una fuerza externa moderada.

La evaluación se realizó en todo el miembro superior, abarcando las diferentes articulaciones como el hombro, codo y muñeca. Los valores de la escala de Daniels y Worthingham fueron asignados según el criterio del evaluador. A continuación se describen los valores asignados a cada nivel de fuerza:

- Nivel 5: Capacidad de resistir la fuerza de la gravedad y una fuerza externa moderada.
- Nivel 4: Capacidad de realizar movimientos contra la gravedad con resistencia leve.
- Nivel 3: Capacidad de realizar movimientos sin resistencia ante fuerzas externas distintas a la gravedad.
- Nivel 2: Capacidad de realizar el sesenta por ciento del movimiento con la fuerza de la gravedad.
- Nivel 1: No se realiza movimiento, pero se activan los músculos.
- Nivel 0: No se realiza movimiento ni hay activación muscular.

Estos valores se utilizaron para evaluar y clasificar la fuerza en cada una de las articulaciones del miembro superior.

## ■ **Pruebas de provocación.**

Las pruebas de provocación son procedimientos o tests que se realizan con el propósito de provocar o reproducir los síntomas de las tendinopatías. Estas pruebas se utilizaron para evaluar la presencia o gravedad de la afectación en la articulación, así como para identificar la causa subyacente de los síntomas [42].

En el contexto de este caso, las pruebas de provocación implicaron la aplicación de presión, movimiento y manipulación pasiva del miembro superior. Con el objetivo de evaluar el estado de cada usuario y seleccionar aquellos más propensos a padecer una tendinopatía y evaluar la respuesta del usuario al tratamiento, utilizando la plataforma.

---

Es importante tener en cuenta que estas pruebas se utilizaron para desencadenar o reproducir los síntomas característicos de las tendinopatías, lo cual puede proporcionar una impresión diagnóstica sobre la afectación que se puede tener. Sin embargo, es importante destacar que estas pruebas por sí solas no constituyen un diagnóstico médico definitivo.

En esta sección, se utilizaría nuevamente la escala subjetiva de dolor de 0 a 10 para evaluar a cada usuario. Como criterio de selección principal, se requeriría que el usuario obtuviera resultados positivos en al menos 3 de las 6 pruebas de provocación, independientemente del valor del dolor reportado. En el caso específico del usuario evaluado, se observó un resultado positivo en las pruebas de Yocum, Hawkins-Kennedy y Gerber. Estos hallazgos generaron una impresión diagnóstica por parte del evaluador de que el usuario podría ser propenso a tener una tendinosis en la región subescapular del miembro superior.

	FORMATO EVALUACION FISIOTERAPEUTICA OSTEOMUSCULAR		
	Plataforma para rehabilitación de hombro en RV con medición de rangos de movilidad		
Fecha de elaboración	10/03/2023	Hora de elaboración	9:00

DATOS PERSONALES

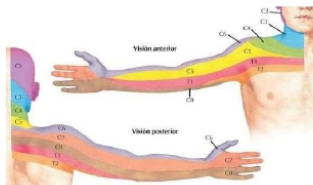
Nombre completo	-----	Usuario App	Usuario X				
N° documento	-----	Tipo de documento		T. I	C. C	C. E	R. C
Edad	23	Ocupación	Estudiante	Sexo	F	M	NE
Dominancia	Derecha	MMSS afectado	Izquierdo	Diagnostico medico	Ninguno		

EVALUACION DE DOLOR



Localización	Supraclavicular
Intensidad	6
Evolución	10 años

SENSIBILIDAD DE MIEMBRO SUPERIOR



Hallazgos	Normal
-----------	--------

REFLEJOS OSTEOTENDINOSOS

Reflejo	Resultado
Bicipital	Normal
Tricipital	Hipo reflexivo
Estilo radial	Normal
Braquiorradial	Normal

MOVILIDAD Y FUERZA

GONIOMETRIA		
Movimiento	Valor referencia	Resultado
<b>HOMBRO</b>		
Flexión	180°	110°
Extensión	60°	20°
Abducción	180°	125°
Aducción horizontal	135°	115°
Rotación interna	80°	50°
Rotación externa	90°	55°

FUERZA	
Movimiento	Resultado
<b>HOMBRO</b>	
Flexión	4
Extensión	4
Abducción	4
Aducción horizontal	5
Rotación interna	4
Rotación externa	4

Figura 50: Instrumento Evaluador página 1.

GONIOMETRIA		
Movimiento	Valor referencia	Resultado
CODDO		
Flexión	145°	130°
Extensión	0°	0°
MUÑECA		
Flexión	90°	48°
Extensión	70°	50°
Desv. Ulnar	30°-35°	35°
Desv. Radial	20°-25°	25°

FUERZA	
Movimiento	Resultado
CODDO	
Flexión	5
Extensión	5
MUÑECA	
Flexión	5
Extensión	5
Desv. Ulnar	4
Desv. Radial	5

PRUEBAS DE PROVOCACION

Prueba	Descripción	Resultado	Observaciones
NEER	Paciente sedente, ft con una mano fija el hombro y con la otra mano eleva el MS en flexión, rotación interna y aducción. (+) Dolor. En el rango ente 70° y 120 °	-	
Yocum	Paciente sedente lleva la mano del MS a evaluar a su hombro contralateral. Ft. Al lado del paciente, fija el hombro a evaluar con una mano y le pide la paciente que levante el codo sin levantar el hombro. (+) Dolor. <i>Puede ser activa o resistida.</i>	+	3
Hawkins-Kennedy	Paciente sedente. FT. frente al paciente y pide llevar hombro y codo en flexión de 90°, en esta posición lleva Rotación Interna de hombro. (+) Dolor.	+	2
Patte	Paciente sedente, hombros en abd 90°, codo flexión 90°. Ft detrás del paciente, fija hombro y la otra mano en antebrazo. Contra resistencia el paciente intenta rotar externamente el hombro (+) Dolor	-	
Jobe	Paciente de pie, hombros abd 90°, flex 30°, rot int. Ft. Frente al paciente mano en antebrazo ejerce resistencia a continuar abd. (+) Dolor	-	
Gerber	Paciente sedente, dorso de la mano del MS a evaluar tocado zona lumbar. Ft. Detrás del paciente estabiliza escapula y ofrecer resistencia para separar la mano. (+) Dolor.	+	1

Impresión diagnóstica	Tendinosis del Miembro superior   Subescapular
-----------------------	--

Cumple criterios de selección	<input checked="" type="checkbox"/> / NO
-------------------------------	--

Firma evaluadora

Elaborado por: Tania V. Losada Garzon

Figura 51: Instrumento Evaluador página 2.



Figura 52: Uso del goniómetro en un usuario potencial.

---

### 5.1.2. Selección de la población

Se citó a diferentes personas con edades entre los veinte a cincuenta años de edad, con actividades en común como el estudio y la docencia, el día 10 de marzo del presente año. A cada una de las personas se les entregó un consentimiento informado Figuras 53, 54 y 55, explicando el motivo de la evaluación, duración y objetivos. Una vez la persona estaba enterada y consciente de la metodología a ser aplicada, se procedía a la evaluación inicial con el instrumento evaluador. Si la persona poseía disminución en un rango de movilidad de hombro y era positiva en al menos tres pruebas de provocación era considerado apto para el uso de la plataforma, en caso contrario no sería considerado para el uso de la misma (significando que estaba sano completamente de esta dolencia).

El tamaño total de la muestra evaluada fue de veinticinco personas, de las cuales diez personas dieron resultados positivos para el uso de la plataforma y cuatro de ellos con resultados positivos en sus dos miembros superiores, dando como resultado un total de catorce sujetos de prueba aptos para el uso de la plataforma.

---

## CONSENTIMIENTO INFORMADO

**Título del proyecto:** Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad.

**Estudiantes:** Juan Pablo Arango Dorado - David Mateo Martínez Rodríguez.

**Director:** PhD. Oscar Andrés Vivas Albán.

### JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO:

Las tendinopatías de hombro son una de las patologías más frecuentes en Latinoamérica, es por eso que nuestro trabajo de grado va en camino a crear una herramienta de ayuda para su rehabilitación, haciendo uso de la realidad virtual. Se incluyen personas que podrían presentar esta patología con el fin de evaluar correctamente la herramienta.

### METODOLOGÍA:

El estudio se llevará a cabo durante 10 días, los participantes tendrán una sesión diaria programada durante este tiempo según sus horarios de conveniencia, las sesiones deben llevarse máximo con una diferencia de 48 horas o el sujeto será descartado del caso de estudio. Cada sesión constará de cuatro ejercicios, tres de entrenamiento en los que se registrara su tiempo de interacción y puntaje de objetos, y un ejercicio de test para medir su progreso en el que se registrarán sus rangos de movilidad.

### RIESGOS ASOCIADOS CON EL ESTUDIO:

**El participante puede presentar:**

- Dolor o malestar al momento de realizar los ejercicios debido a que se trata de una lesión en recuperación.
- Mareo si la persona no está acostumbrada a utilizar dispositivos de realidad virtual.

---

## **RESGUARDO DE DATOS**

La persona encargada de la custodia de resultados durante las pruebas será Juan Pablo Arango Dorado, identificado con cédula de ciudadanía No. 1002970487, estudiante del programa de Ingeniería en Automática Industrial de la Universidad del Cauca.

## **RESPONSABILIDAD DE LOS PARTICIPANTES EN LAS PRUEBAS U OBSERVACIONES Y REGISTROS**

### **COMPENSACIÓN**

No habrá ningún tipo de retribución económica por participar en la investigación y cada uno de los resultados serán utilizados para el mejoramiento de las metodologías de los procesos de enseñanza – aprendizaje – rehabilitación.

### **VOLUNTARIEDAD**

Usted está siendo invitado a participar en este estudio de investigación. Antes de decidir si participa o no, debe conocer y comprender cada uno de los siguientes apartados. Este proceso se conoce como consentimiento informado. Siéntase con absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas al respecto.

Una vez que haya comprendido el estudio y si usted desea participar, entonces se le pedirá que firme esta forma de consentimiento, de la cual se le entregará una copia firmada y fechada.

- No habrá ninguna consecuencia desfavorable para usted, en caso de no aceptar la invitación.
- La participación es libre y voluntaria. Si decide participar en el estudio puede retirarse en el momento que lo desee, -aun cuando el investigador responsable no se lo solicite-, informando las razones de su decisión, la cual será respetada en su integridad.
- En el transcurso del estudio usted podrá solicitar información actualizada sobre el mismo, al investigador responsable.
- Si considera que no hay dudas ni preguntas acerca de su participación, puede, si así lo desea, firmar la Carta de Consentimiento Informado que se anexa a este documento.

La información obtenida solamente será utilizada para la investigación mencionada en el presente documento y ante cualquier inquietud favor comunicarse con: David Mateo Martínez, C.C. 1061812386, teléfono 319 798 4249.



---

### CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

He leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria.

Se me ha explicado que mi nombre será codificado para proteger mi identidad, la confidencialidad de los datos y el derecho al anonimato. Del mismo modo se me ha hecho conocer que los datos y resultados no serán usados para ninguna discriminación étnica, política, social, religiosa, económica ni de ninguna índole y que podré retirarme de la investigación sin previo consentimiento ni con ningún tipo de detrimento para mí. Se me ha explicado que los datos serán usados para análisis y socialización en forma grupal y que no se harán apreciaciones particulares que identifiquen a ningún tipo de participante. De igual forma se me ha informado de la toma de fotografías, videos o cualquier otro tipo de medio, en el cual no se mencionará mi nombre y será en lo posible censurado mi rostro.

He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser publicados o difundidos con fines científicos. Convengo en participar en este estudio de investigación.

**Nombre:**

**Firma:**

**Documento de identificación:**

Recibiré una copia firmada y fechada de esta forma de consentimiento.

Esta parte debe ser completada por el Investigador (o su representante):

He explicado al Sr(a). \_\_\_\_\_ la naturaleza y los propósitos de la investigación; le he explicado acerca de los riesgos y beneficios que implica su participación. He contestado a las preguntas en la medida de lo posible y he preguntado si tiene alguna duda. Acepto que he leído y conozco la normatividad correspondiente para realizar investigación con seres humanos y me apego a ella.

Una vez concluida la sesión de preguntas y respuestas, se procederá a firmar el presente documento.

---

**Firma del investigador**  
**Cedula**  
**Contacto**

**Fecha**

Figura 55: Consentimiento informado página 3.

---

### 5.1.3. Metodología

Con los usuarios positivos o usuarios que presentaron indicios y/o cercanía a presentar patologías de afectación articular en el hombro, cumpliendo los criterios de selección:

- Disminución de los rangos de movilidad en al menos dos movimientos de la articulación del hombro.
- Dar un resultado positivo en al menos tres de las seis pruebas de provocación.
- Presencia de dolor o molestia en el hombro.

Se realizaron sesiones de lunes a viernes durante 10 días hábiles, con una duración máxima de diez minutos. Durante cada una de las sesiones el usuario debería realizar las actividades de **Testeo, Mesa, Matriz y Reloj** en ese orden, y voluntariamente en un horario diferente realizar movimientos de estiramiento. Además durante cada sesión se tendría la guía de la estudiante de Fisioterapia Tania Vanessa Losada Garzón para la verificación del correcto movimiento del miembro superior. Al finalizar los 10 días se realizó nuevamente la evaluación del usuario con el instrumento evaluador para verificar su resultado final después de utilizar la plataforma. Cada usuario debería completar un total de diez sesiones para ser tomado en cuenta en el análisis estadístico, en caso contrario se tomará como desertor y no sería considerado en los resultados finales.

### 5.1.4. Realización de las pruebas

El día 13 de marzo del presente año se dio inicio a la primera sesión. Durante esta primera sesión se explicó de forma detallada el uso del dispositivo Oculus Quest 2, la ubicación de las actividades desde la perspectiva inmersiva y la forma correcta de realizar las actividades de la plataforma.

- Al ingresar a la plataforma el usuario se encontrará en el centro de la habitación virtual, Figuras 56 y 57. Su primera visualización será la interfaz para la selección de usuario e inicio de sesión, Figura 58.
- A continuación deberá realizar la actividad Calibración, en la cual debe tomar con el mando las esferas verde y amarilla y llevarlas hasta sus hombros, Figuras 59 y 60.

- 
- Se activará la actividad de Testeo en la cual deberá movilizar las esferas según la señalización ilustrada en una de las paredes de la habitación: la esfera roja hacia arriba, Figura 61, la esfera violeta hacia abajo, la esfera amarilla hacia la izquierda, Figura 62, y la esfera verde hacia la derecha, Figura 63.
  - En este punto las actividades de entrenamiento aparecerán en la habitación, el usuario deberá iniciar con la actividad Mesa arrastrando el cubo violeta a los contenedores, Figura 64, en la actividad Matriz movilizar la esfera roja hacia la ubicación de la esfera violeta, Figura 65, y en la actividad Reloj girar el minuterero hasta la ubicación de la esfera cyan, Figura 66.
  - Al finalizar las actividades de entrenamiento el usuario terminará su sesión utilizando la interfaz de Cerrar Sesión, Figura 67.

De igual forma se guiará a la persona de manera oral y en movimientos pasivos de cómo debería movilizar el miembro superior para su correcto funcionamiento. Durante esta etapa introductoria no se especificó el orden de las actividades de entrenamiento. A partir del cuarto día se comenzó a aplicar un orden específico para la realización de actividades de entrenamiento **Mesa, Matriz y Reloj**, en ese orden.

Al quinto día de la realización de pruebas la mayoría de usuarios no requerían guía para la realización de las actividades, Figuras 68 y 69.

El día 28 de marzo se realizó la última sesión con un total de once usuarios que completaron las diez sesiones necesarias. Al día siguiente, el 29 de marzo, se realizó la prueba con el instrumento evaluador con el fin de valorar su progreso al utilizar la plataforma creada, Figuras 70 y 71.

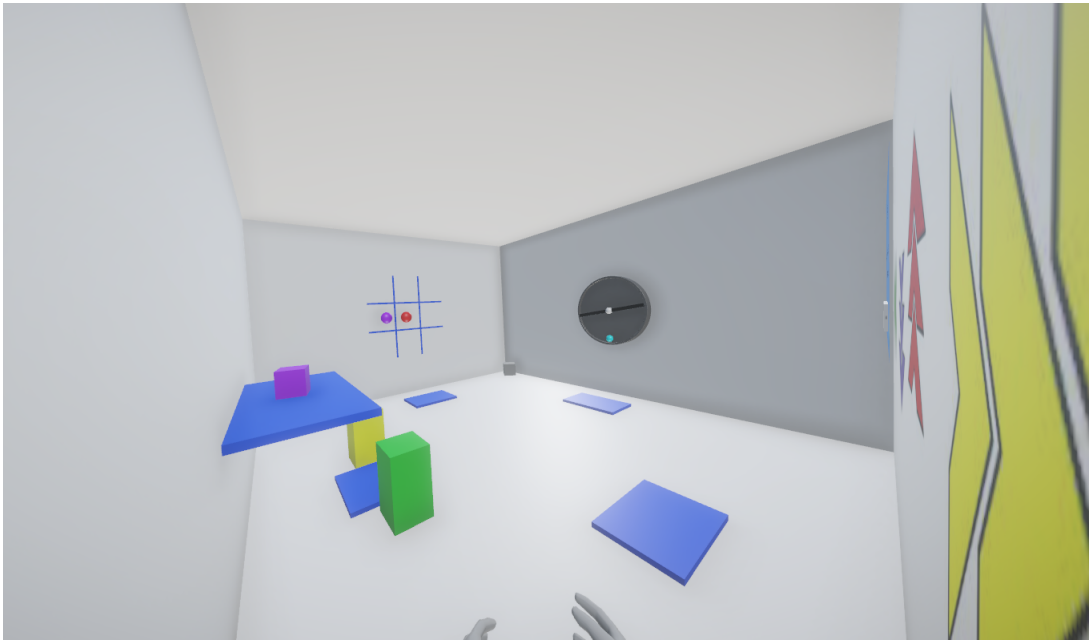


Figura 56: Habitación virtual.

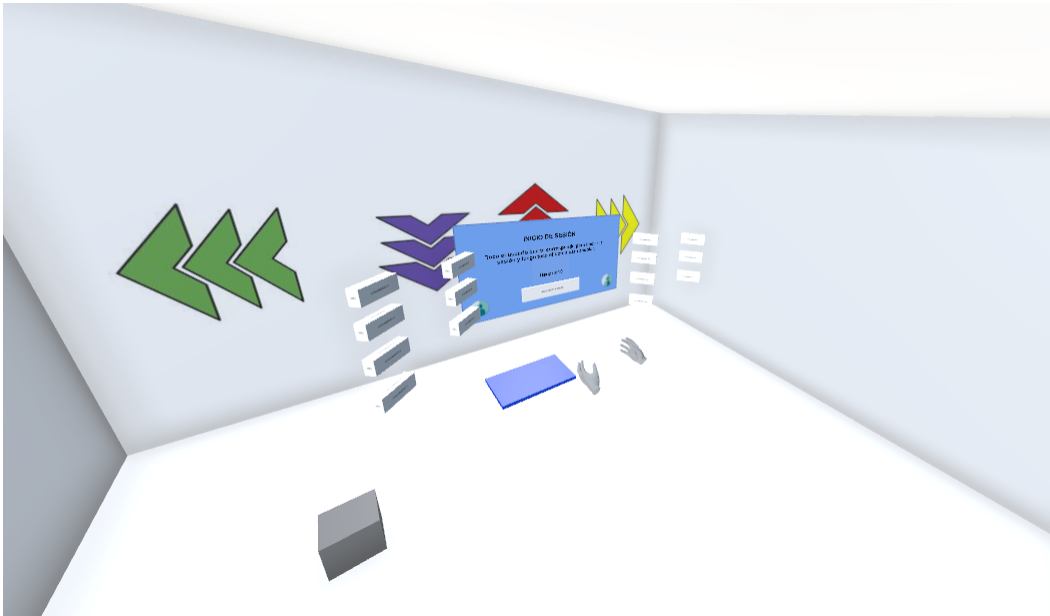


Figura 57: Ubicación de aparición entorno virtual.

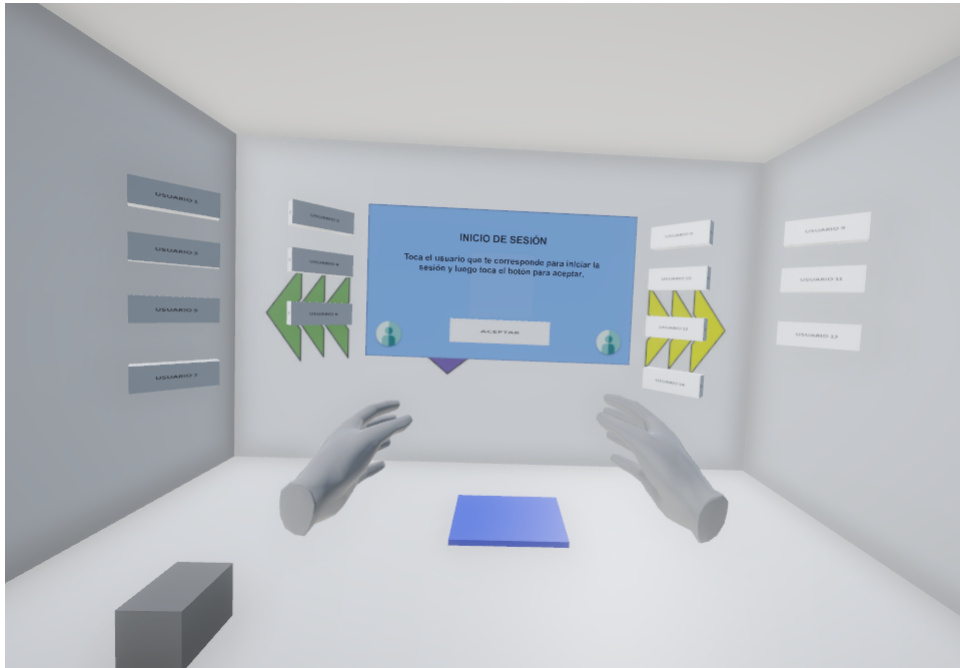


Figura 58: Perspectiva usuario Inicio de sesión.

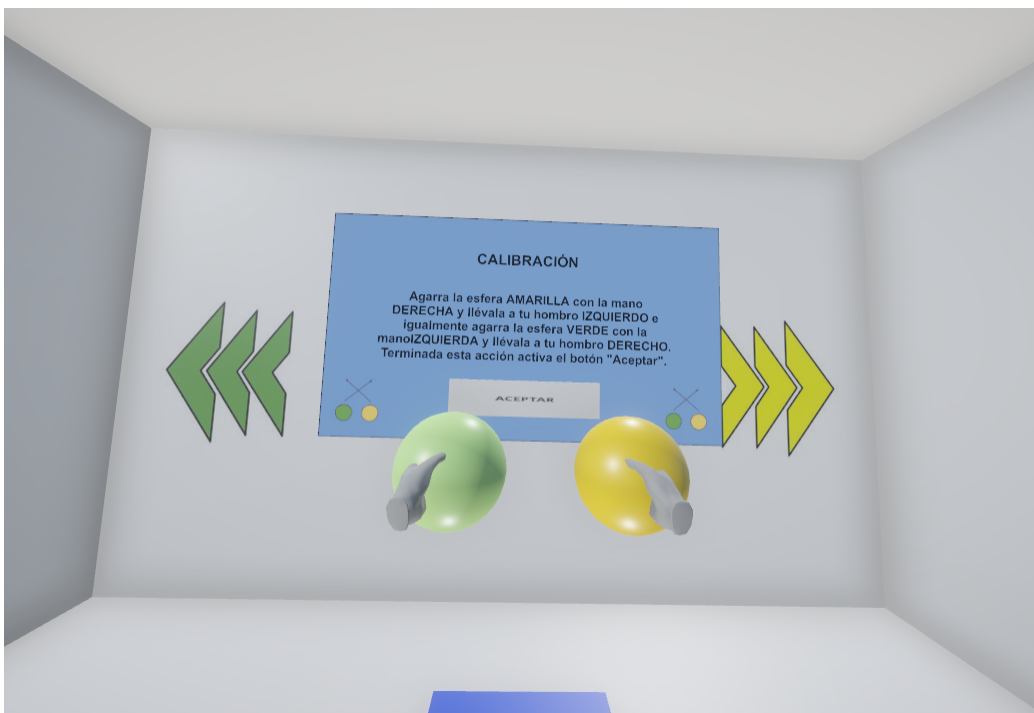


Figura 59: Perspectiva usuario Calibración.

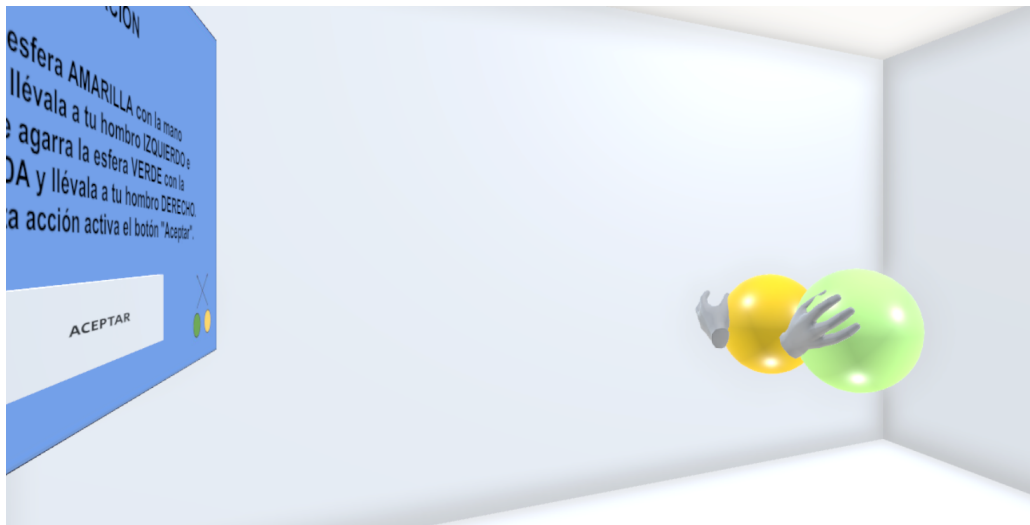


Figura 60: Vista lateral Calibración.

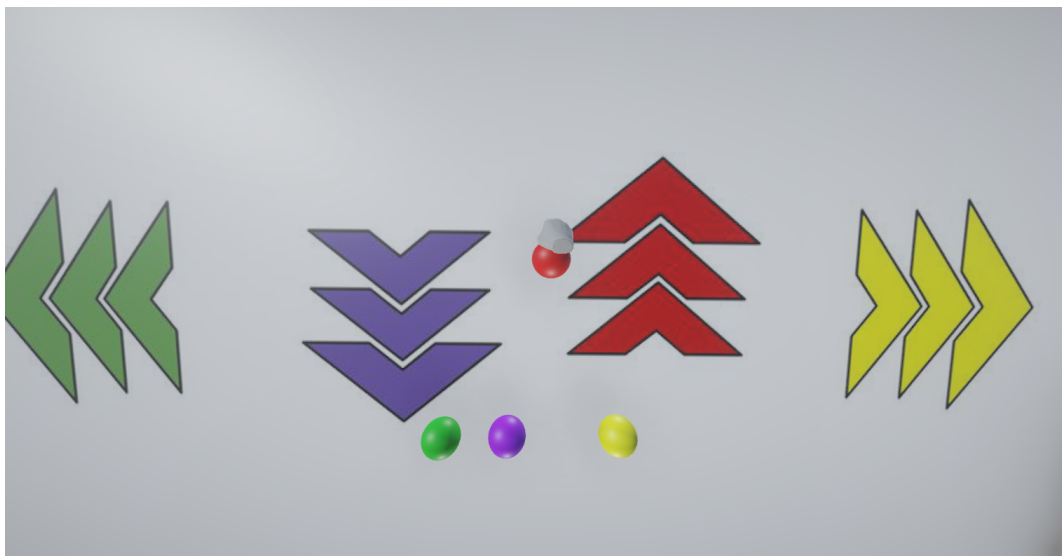


Figura 61: Perspectiva usuario Test movilización esfera roja.

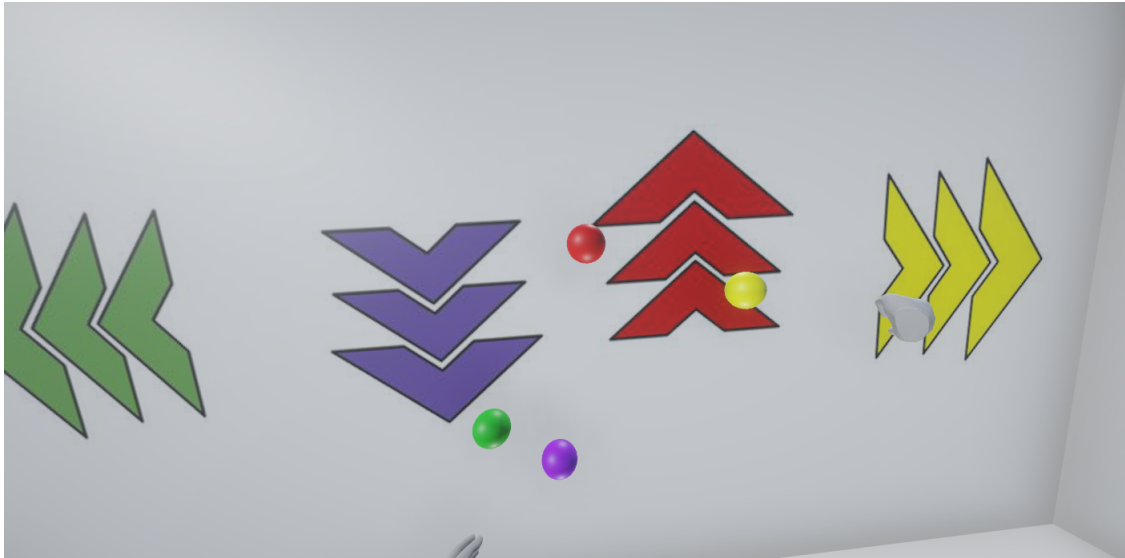


Figura 62: Perspectiva usuario Test movilización esfera amarilla.

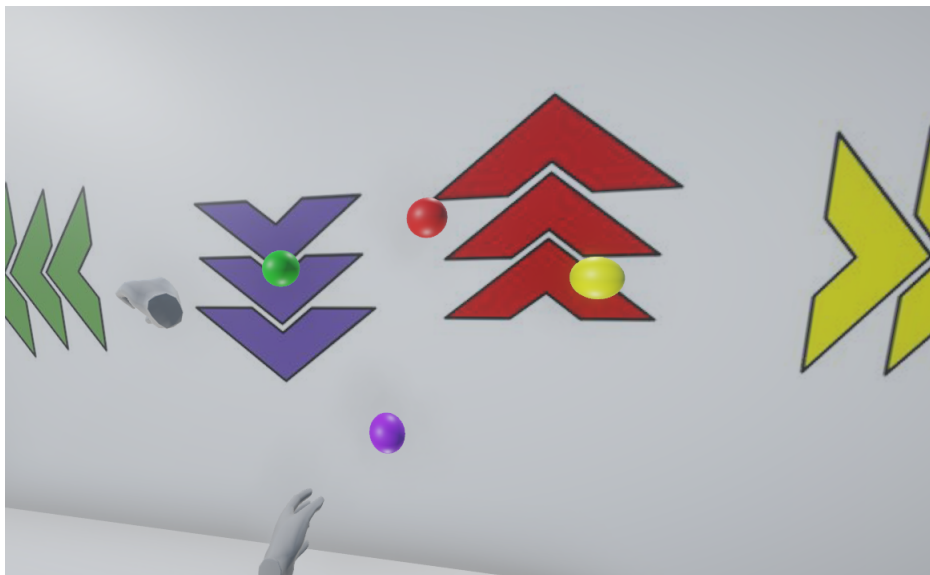


Figura 63: Perspectiva usuario Test movilización esfera verde.

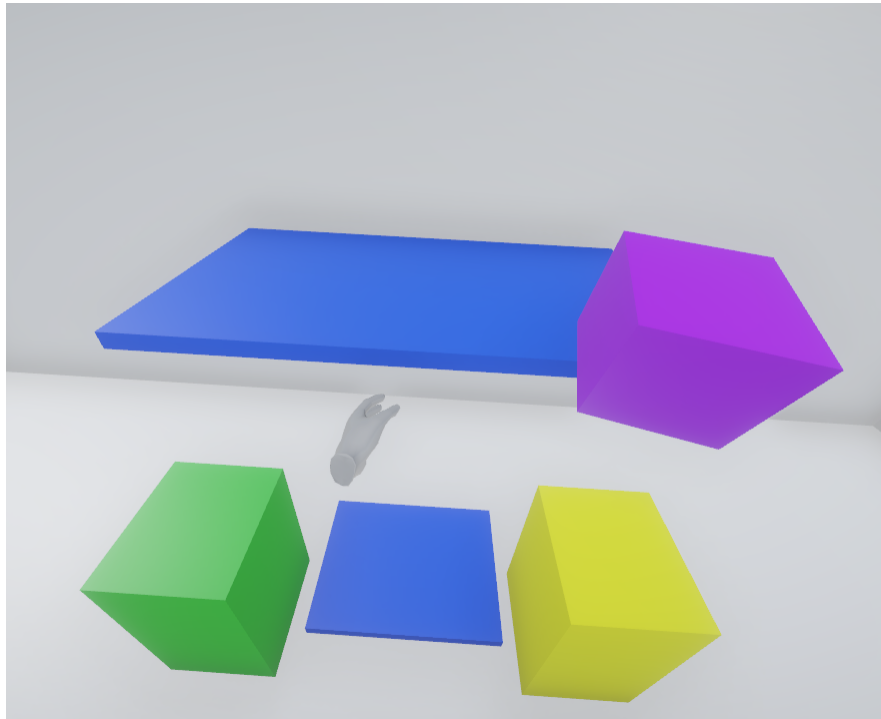


Figura 64: Perspectiva usuario Actividad Mesa.

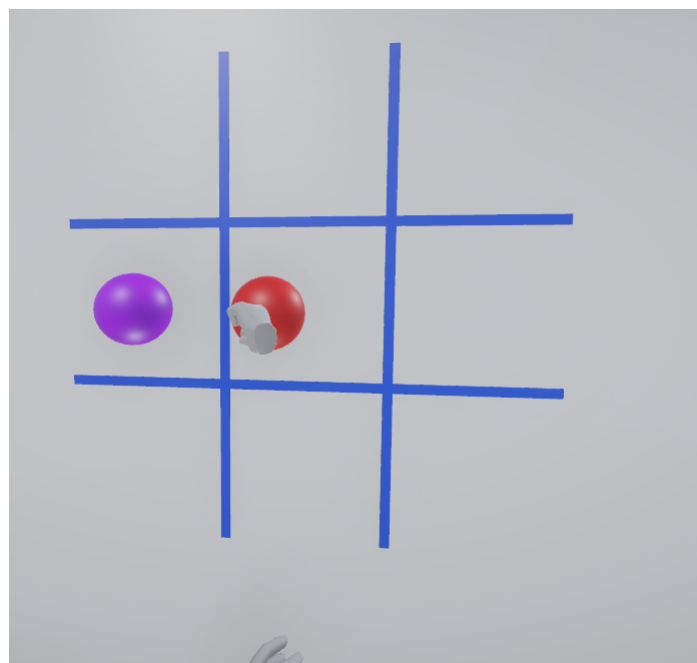


Figura 65: Perspectiva usuario Actividad Matriz.





Figura 66: Perspectiva usuario Actividad Reloj.



Figura 67: Perspectiva usuario Cerrar sesión.



Figura 68: Usuario en sesión.



Figura 69: Usuario en sesión.



Figura 70: Toma de pruebas Instrumento Evaluador.



Figura 71: Toma de pruebas Instrumento Evaluador.

## Capítulo 6

### Análisis de resultados.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos por el instrumento evaluador en la evaluación previa y posterior al uso de la plataforma, los datos obtenidos en las actividades de Testeo, Mesa, Matriz y Reloj de la plataforma por cada usuario, y los resultados de una encuesta realizada a los usuarios de la plataforma para conocer su experiencia durante el uso de la misma. Para ello se tiene en cuenta que de los usuarios, catorce que pasaron los criterios de inclusión para probar la plataforma, solo once completaron las sesiones determinadas, los cuales se denominaron como **usuarios completados**, y tres usuarios no completaron las sesiones, los cuales se denominaron como **usuarios desertados**. Por ello, de las catorces personas, no se contaron para los resultados del análisis los usuarios cinco, seis y siete debido a que estos son los usuarios desertados durante el proceso de la realización de las sesiones.

Dado que las pruebas se llevaron a cabo con usuarios que presentaban únicamente impresiones diagnósticas, resulta complejo realizar una comparación directa con los resultados de otras investigaciones, ya que la mayoría de los estudios en el ámbito de la rehabilitación, tanto convencional como con el uso de herramientas externas, se centran en muestras de usuarios con patologías diagnosticadas, lo cual implica un enfoque más específico hacia una determinada condición médica.

La literatura y las investigaciones existentes revelan resultados alentadores en los procesos de rehabilitación del hombro mediante ejercicios enfocados en los rangos de movilidad. Se ha observado que la incorporación de dispositivos electrónicos como apoyo en la rehabilitación genera mejoras significativas en comparación con un grupo de control que sigue métodos convencionales, después de un período de 15 sesiones de entrenamiento [19]. Además, en pacientes con rigidez en el hombro, se ha aplicado un enfoque de estiramiento suave, y se ha observado que aproxima-

---

damente el 70 % de los usuarios han mostrado mejoras positivas en términos de funcionalidad y movimiento del hombro [43].

Los resultados presentados en este trabajo y su análisis se hace exclusivamente con los usuarios completados, mostrándolos de forma sencilla y ordenada de tal manera que sea simple su comprensión hasta llegar a las conclusiones. Para la explicación de algunos análisis se tomarán los resultados de solo uno o varios usuarios completados con el fin de facilitar su comprensión, en otros análisis se mostrarán los promedios de los resultados de todos los usuarios. Al final del documento en el apartado de anexos, se presentarán todos los gráficos de cada uno de los usuarios completados.

### **6.1. Análisis cuantitativo.**

Para el desarrollo del análisis cuantitativo, se presentarán diversos resultados con sus respectivas explicaciones y gráficos, dividiéndolos en cinco aspectos.

- **Aspecto 1: Exactitud en la toma de datos**

Para determinar que la plataforma realizó la toma de datos de los usuarios correctamente durante las sesiones, se llevó a cabo una comparativa entre los datos tomados manualmente por la estudiante del Programa de Fisioterapia nombrada en secciones anteriores y los datos tomados por la plataforma diseñada. Se cuenta con los datos manuales exclusivamente del antes y después de las diez sesiones realizadas por los usuarios con el fin de determinar la evolución en cada uno de los campos definidos por el instrumento evaluador, Figuras 50 y 51. Por ello se realiza la comparativa con los datos únicamente del día 1 y el día 10 de las sesiones que corresponden a la primera y última sesión respectivamente, esto para poder evaluar como iniciaron y como finalizaron los usuarios habiendo una cercanía entre los valores. Esta comparación se realizó teniendo en cuenta que las mediciones manuales y las tomadas por la plataforma se llevaron a cabo en días diferentes.

En esta sección, se presenta la tabla de datos obtenida a partir de los once usuarios, como se muestra en la 72. Donde en **Diagnóstico Pre** se muestra la toma de datos manual con el instrumento evaluador antes de las sesiones realizadas por los usuarios y **Pos** es la toma de datos manual con el instrumento evaluador después de las sesiones realizadas por los usuarios. En **Aplicación Inicial** se muestra la toma de datos realizada por la plataforma en el día 1 de las sesiones y **Final** es la toma de datos realizada por la plataforma en el día 10 (último día) de las sesiones.

	Datos				
	Diagnóstico		Aplicación		
	Pre	Pos	Inicial	Final	
Flexión	110	135	110,0234	135,0463	Usuario 1
Aduc. Horizontal	115	128	115,85092	128,41876	
Flexión	120	155	120,3471	154,2224	Usuario 2
Aduc. Horizontal	100	115	100,63009	116,05042	
Flexión	180	180	154,0117	154,9542	Usuario 3
Aduc. Horizontal	110	135	110,24041	134,69719	
Flexión	180	190	154,7871	154,961	Usuario 4
Aduc. Horizontal	110	110	111,23119	115,65069	
Flexión	165	180	154,0413	154,1667	Usuario 8
Aduc. Horizontal	120	130	121,13251	129,26266	
Flexión	160	180	154,6813	154,1196	Usuario 9
Aduc. Horizontal	120	135	120,91603	126,51093	
Flexión	160	180	154,6712	154,5266	Usuario 10
Aduc. Horizontal	105	135	105,85334	117,5024	
Flexión	165	180	154,9818	154,1145	Usuario 11
Aduc. Horizontal	100	105	101,53875	110,61977	
Flexión	145	155	145,112	148,4466	Usuario 12
Aduc. Horizontal	130	120	130,627805	134,87765	
Flexión	150	155	150,7686	154,8796	Usuario 13
Aduc. Horizontal	130	115	130,13895	133,29337	
Flexión	170	170	154,3331	154,5797	Usuario 14
Aduc. Horizontal	110	135	110,95828	118,64531	

Figura 72: Comparación de datos tomados por el instrumento evaluador y la plataforma diseñada de los 11 usuarios completados.

---

Se logra evidenciar que la plataforma diseñada para el posible proceso de rehabilitación cuenta con un mayor factor de precisión dado que al ser un dispositivo electrónico genera cuatro o más números decimales en comparación a la toma de datos de forma manual. Por otra parte, teniendo en cuenta que el valor máximo para la flexión de hombro es de 180 grados y que mayor a dicho valor se cuenta como hiperlaxitud, se visualiza que la plataforma cuenta con un limitante de hardware y software respecto al límite superior en la flexión de hombro, siendo este de 155 grados aproximadamente.

Al inspeccionar los once usuarios completados, se determina la existencia de catorce datos los cuales superan los 155 grados para la flexión de hombro, debido a ello se procedió a normalizar estos datos a 155 grados para poder continuar con el análisis de los resultados.

### **Explicación del error y del límite de 155 grados.**

Es posible evidenciar con la tabla de la Figura 72 que existe un error en algunas tomas de datos en especial en la **aducción horizontal**, esto se debe a que la toma de los datos manuales y los tomados por la plataforma fueron en días diferentes por lo que el desempeño del usuario varía según a factores como actividades diarias, ejercicios de estiramiento o cualquier calentamiento realizado antes del uso de la plataforma. Estos factores que generan un cambio en el desempeño del usuario fueron percatados después de haber iniciado las sesiones en los usuarios, por ello se les recomendó evitar hacer ese tipo de actividades antes de realizar las sesiones diarias.

La plataforma cuenta aproximadamente con un límite de 155 grados para el movimiento de flexión, esto se debe a como se realizó e implementó el diseño de la actividad de testeo, Figura 73.



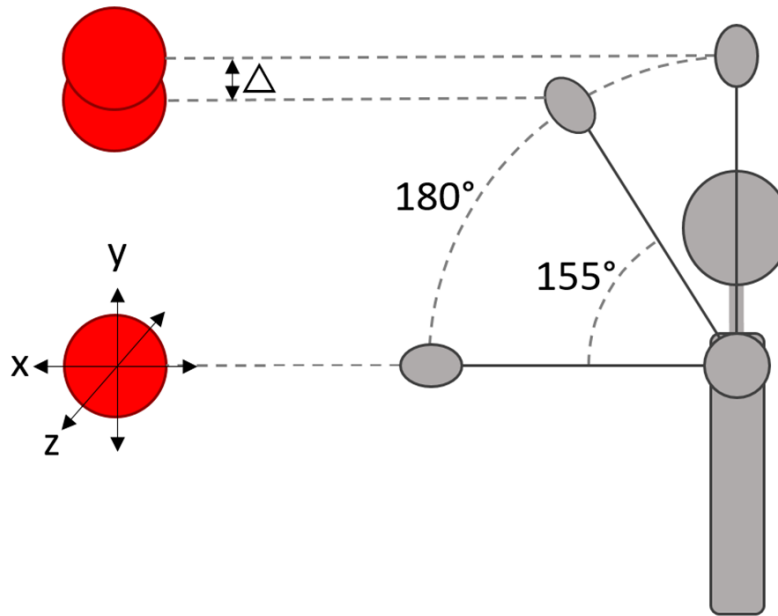


Figura 73: Representación del usuario en el ejercicio de testeo.

El diseño se realizó de manera que se pudiera reducir los factores de error humano por el mal desarrollo de la actividad por parte del usuario, de esta manera se limitaron los ejes de la esfera de testeo en dos de los tres ejes de movimiento, **Y** para **superior** e **inferior**, y **Z** para **izquierda** y **derecha**. Con ello, es posible obtener una aproximación del ángulo generado por la extremidad en comparación con el de la plataforma teniendo como límite 155 grados ya que es la altura máxima que puede alcanzar la esfera aproximadamente en su eje y, luego de dicho valor aproximado el cambio en el desplazamiento ( $\Delta$ ) es mínimo, casi despreciable.

## ■ Aspecto 2: Promedio de resultados y desempeño

Para este y el resto de aspectos se tomarán como ejemplo los datos del usuario 1 ya que permite analizar la mayoría de los resultados posibles y porque fue el usuario que presentó los valores más parecidos al promedio de todos los usuarios.

La plataforma cuenta con tres ejercicios desarrollados, Mesa, Matriz y Reloj, los cuales cada uno toma los datos de puntuación, tiempo máximo de agarre, tiempo mínimo de agarre, y tiempo promedio de agarre dentro de su ejercicio. Como fueron tres ejercicios diarios se grafican los resultados de la sesión respecto al día para cada usuario, teniendo una gráfica por actividad, Figuras 74, 75 y 76.

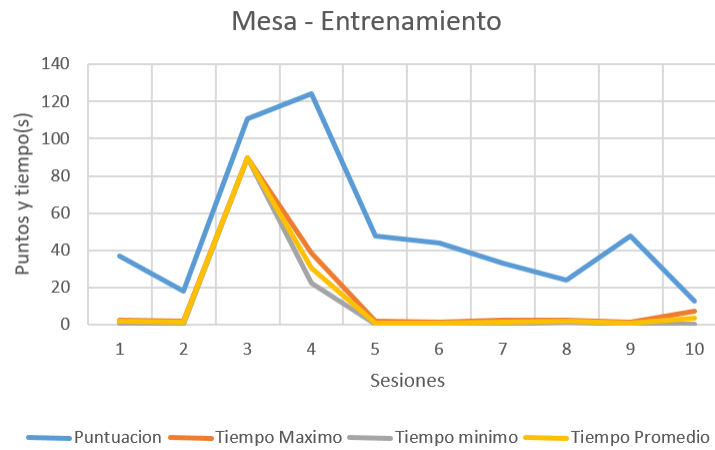


Figura 74: Desempeño del ejercicio Mesa por día del usuario 1.

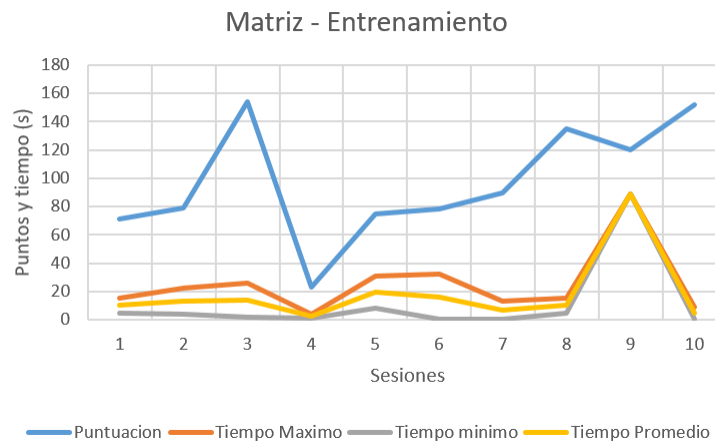


Figura 75: Desempeño del ejercicio Matriz por día del usuario 1.

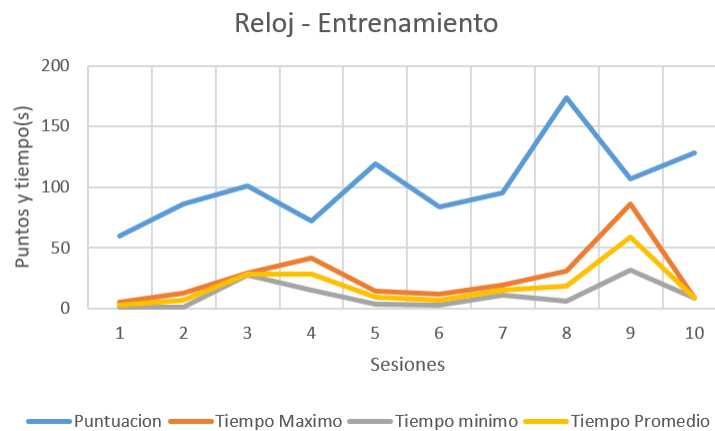


Figura 76: Desempeño del ejercicio Reloj por día del usuario 1.

En las gráficas anteriores, la **puntuación** es la cantidad de colisiones o aciertos realizados por el usuario dependiendo del ejercicio desarrollado, el **tiempo máximo** es el tiempo de agarre o interacción de mayor duración con el objeto a disposición para el desarrollo del ejercicio, el cual, si el usuario sentía fatiga o cansancio ejecutándolo, debía soltar el objeto y bajar la extremidad. El **tiempo mínimo** es el tiempo de agarre o interacción de menor duración con el mismo objeto, y el **tiempo promedio** es el cálculo del promedio entre los tiempos máximos y mínimos de agarre.

Con el fin de facilitar el análisis general de los resultados, se realizó un promedio de los tres ejercicios (Mesa, Matriz y Reloj) por día, obteniendo una única línea de resultado para cada variable: **Puntuación** (puntuación promedio de los tres ejercicios) **Tiempo Máximo**, (Tiempo máximo promedio de los tres ejercicios), **Tiempo Mínimo** (Tiempo mínimo promedio de los tres ejercicios) y **Tiempo Promedio** (Tiempo promedio calculado promedio de los tres ejercicios). La Figura 77 muestra la gráfica correspondiente al usuario 1, y de manera similar se generaron gráficas para el resto de los usuarios. Estos gráficos se encuentran disponibles en el apartado de anexos.

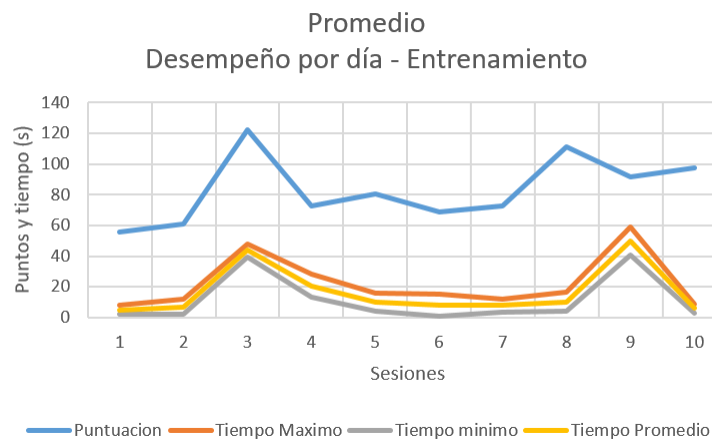


Figura 77: Promedio del desempeño de los tres ejercicios por día del usuario 1.

Teniendo los resultados del promedio de desempeño por día de los tres ejercicios de cada uno de los usuarios, se generaron gráficos separando cada factor obtenido (**puntuación** en la Figura 78, **tiempo máximo** de agarre en la Figura 79, **tiempo mínimo** de agarre en la Figura 80 y **tiempo promedio** de agarre en la Figura 81), donde se agrupan los once usuarios completados.

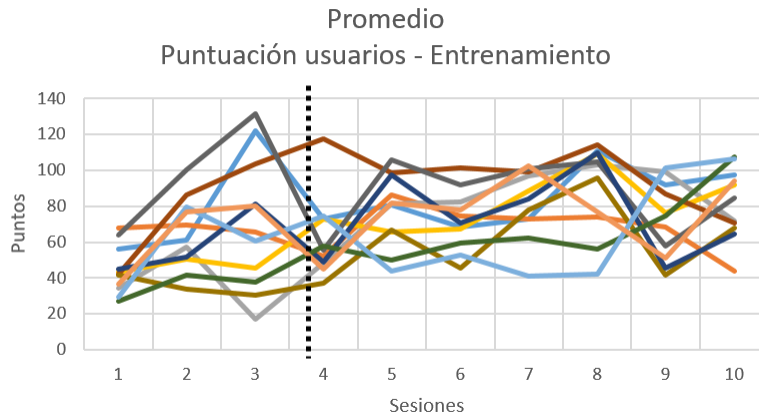


Figura 78: Promedio puntuación por día de los tres ejercicios de los once usuarios.

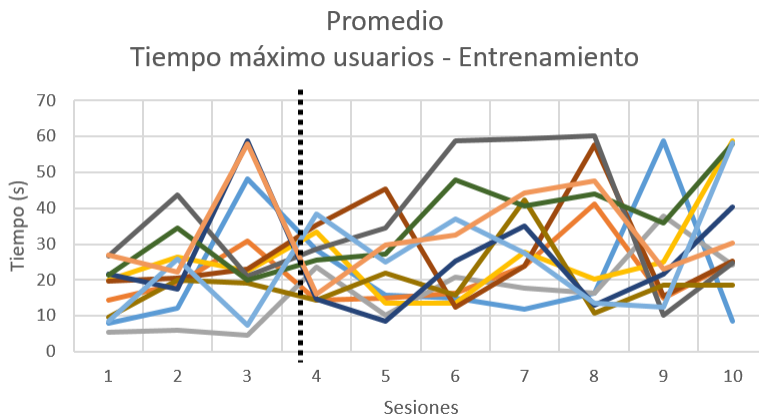


Figura 79: Promedio tiempo máximo por día de los tres ejercicios de los once usuarios.

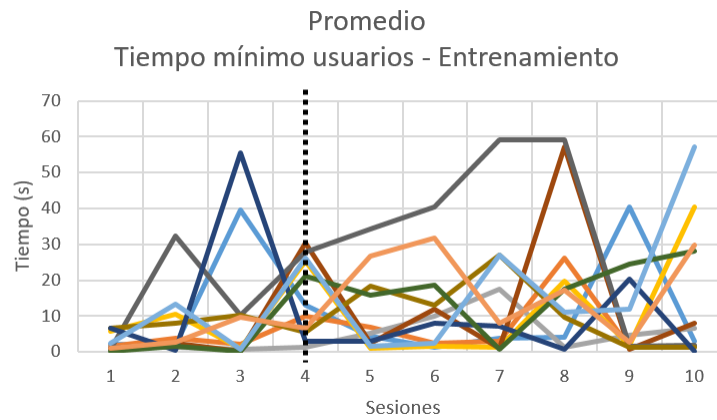


Figura 80: Promedio tiempo mínimo por día de los tres ejercicios de los once usuarios.

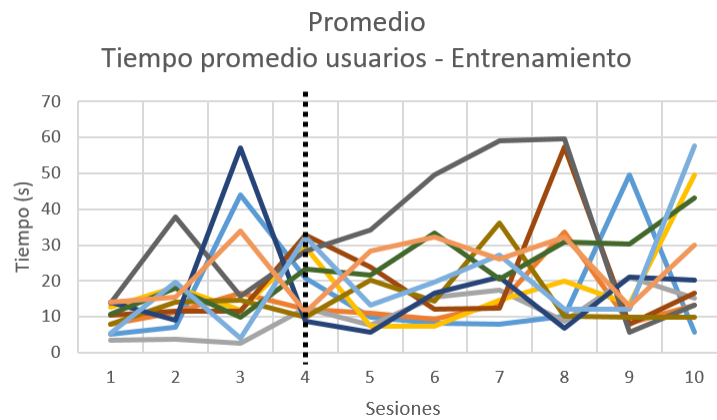


Figura 81: Promedio tiempo promedio por día de los tres ejercicios de los once usuarios.

Para una mejor lectura y análisis de los gráficos generados se realizó un promedio entre los once usuarios generando una sola recta de datos sobre la evolución por día de los usuarios respecto a cada factor evaluado, Figuras 82, 83, 84 y 85.

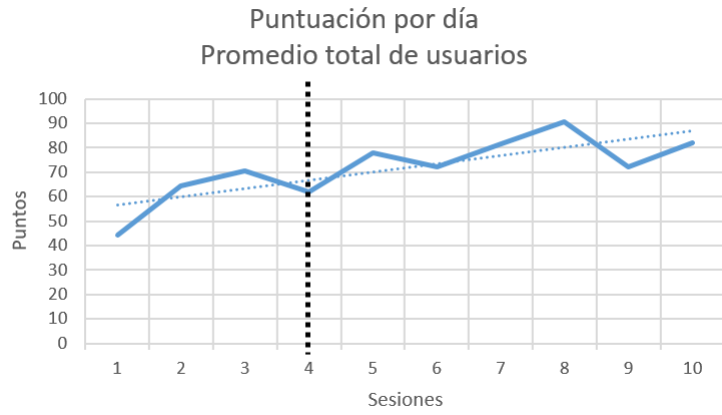


Figura 82: Promedio puntuación por día de los once usuarios.

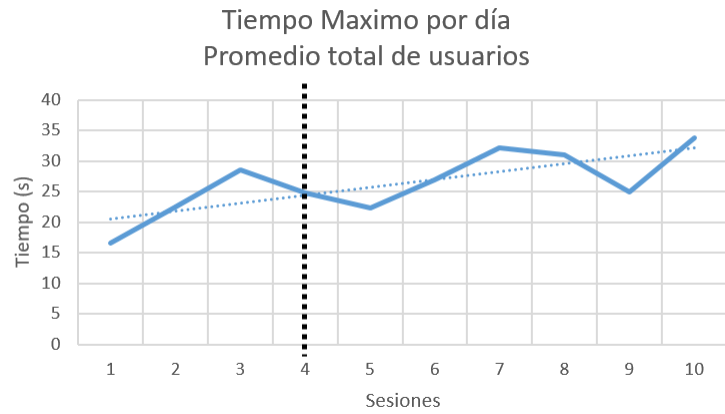


Figura 83: Promedio tiempo máximo por día de los once usuarios.

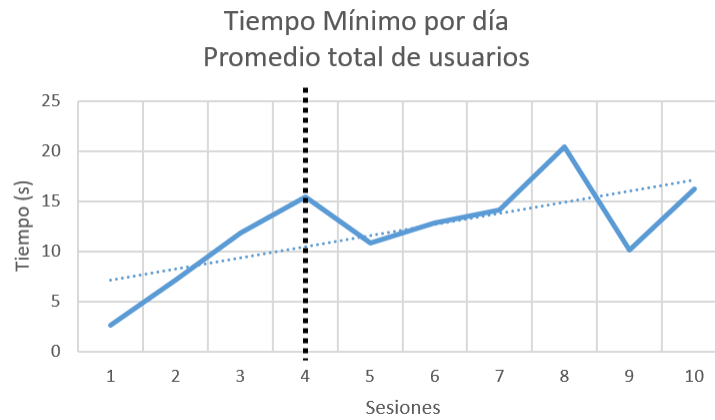


Figura 84: Promedio tiempo mínimo por día de los once usuarios.

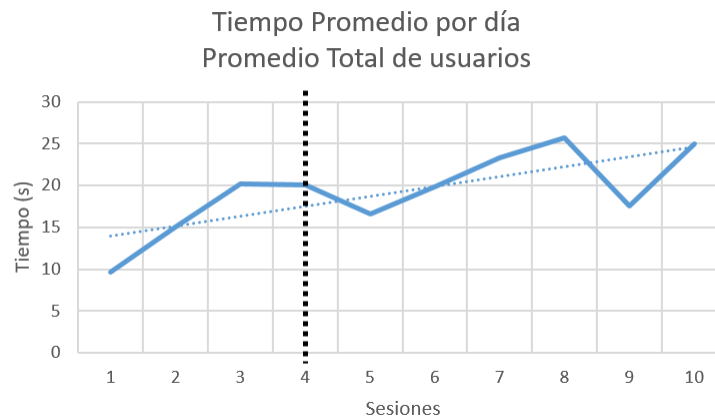


Figura 85: Promedio tiempo promedio por día de los once usuarios.

Se generó una recta de tendencia a cada una de los gráficas de los promedios de los once usuarios, lo que permite visualizar que en cada factor se presenta una tendencia de crecimiento en los resultados, siendo que en promedio los once usuarios tuvieron una mejoría en el desempeño respecto a las puntuaciones obtenidas en los tres ejercicios. También se contó con un incremento en el tiempo máximo y mínimo de agarre con los objetos de interacción, por ende también en el tiempo promedio, esto puede deberse a una mejora en la resistencia y fuerza del miembro afectado. Se puede encontrar el análisis a profundidad en el aspecto cinco **Relación entre la fuerza y el tiempo máximo**.

---

Es posible evidenciar también que en promedio los usuarios tuvieron una reducción en la puntuación, el tiempo máximo de agarre y el tiempo promedio de agarre en el cuarto día de las sesiones, siendo el mismo día en el que se implementó un orden específico en la realización de los tres ejercicios. Si bien esto definió un declive en los resultados generados por los usuarios en sus sesiones, permitió visualizar que el cómo se determina el orden de los ejercicios dentro de la sesión es un factor importante y que tiene un peso significativo en el desarrollo de los ejercicios por parte de los usuarios.

### ■ **Aspecto 3: Evolución de los usuarios**

Uno de los factores importantes es definir la evolución de los usuarios en el transcurso del tiempo. Para ello se determinó la relación directa que hay entre los datos obtenidos por la plataforma y los datos tomados de forma manual con el instrumento evaluador. Dentro del mismo análisis cuantitativo en el aspecto uno **Exactitud en la toma de datos**, se visualiza la relación directa necesaria entre datos. Por ello se evalúa la evolución únicamente en los ángulos generados por la **flexión** y **aducción horizontal** del hombro, datos tomados de manera manual, y los datos de **ángulo superior** y **ángulo derecho** o **ángulo izquierdo**, dependiendo del hombro que contará con los criterios de inclusión, respectivamente.

Dado que los datos recopilados por el instrumento evaluador antes y después no se obtuvieron en cada sesión, sino únicamente en los días programados, se trazó una recta utilizando los dos puntos de evaluación para cada uno de los once usuarios, generando así los valores correspondientes para la recta tal como se muestra en la Figura 86. El propósito de esto fue realizar una comparación con los resultados generados por los usuarios en las sesiones de la plataforma, estableciendo una posible línea de evolución lineal ideal.



		RECTA FLEXIÓN				RECTA ADUCC HORIZONTAL	
		Paso →	2,77777778			Paso →	1,444444444
DATOS	1		110	DATOS	1		25
	2		112,777778		2		26,44444444
	3		115,555556		3		27,88888889
	4		118,333333		4		29,33333333
	5		121,111111		5		30,77777778
	6		123,888889		6		32,22222222
	7		126,666667		7		33,66666667
	8		129,444444		8		35,11111111
	9		132,222222		9		36,55555556
	10		135		10		38

Figura 86: Datos de las rectas generadas para el análisis de la evolución del usuario 1.

Para estos datos se calculó un **Paso** determinado, el cual es el valor que se debe sumar al dato anterior, empezando por el inicial (dato 1), y de manera sucesiva hasta llegar al valor final (dato 10). Esto permite tener la misma cantidad de datos tomados respecto a la plataforma diseñada, generando así una recta que representa una posible evolución lineal ideal. Para este caso, utilizando el usuario 1 como explicación, en la recta de flexión se tiene como dato 1 el valor de 110, más el valor del paso que es 2,77777778 da como resultado que el dato número dos es 112,77778 reduciendo decimales.

Se puede visualizar que los datos inicial (1) y final (10) corresponde a los determinados en el aspecto uno **Exactitud en la toma de datos** para el usuario 1 en la recta de flexión. Para la recta de aducción horizontal se tuvo que restar 90 grados a cada valor debido a que la plataforma toma como punto cero el frente del usuario, siendo el equivalente a 90 grados en la evaluación de la toma de datos manual, ya que esta evalúa desde uno de los lados, Figura 87. Realizando esta resta los valores se aproximaron bastante para cada uno de los once usuarios, esto se puede visualizar para el usuario 1 en la Figura 89.

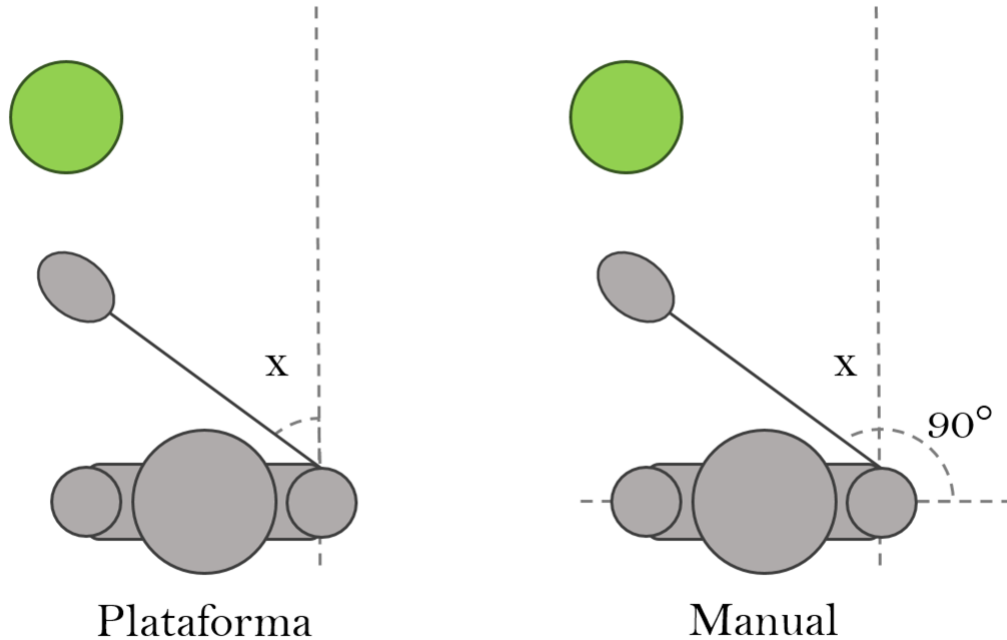


Figura 87: Método de medición de la plataforma y del instrumento evaluador

Se realizaron dos gráficas, una para la flexión, Figura 88 y otra para la aducción horizontal del hombro, Figura 89. Donde **Lineal ideal** es la recta generada como una posible evolución lineal ideal y **PRMS** (Plataforma para Rehabilitación de Miembro Superior) son los datos obtenidos por la plataformas en el transcurso de cada uno de los días de las sesiones desarrolladas por los usuarios.

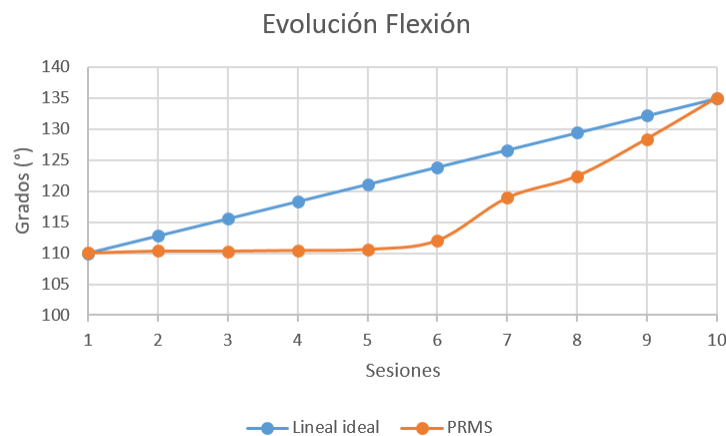


Figura 88: Comparativa de la evolución en la flexión de hombro del usuario 1.

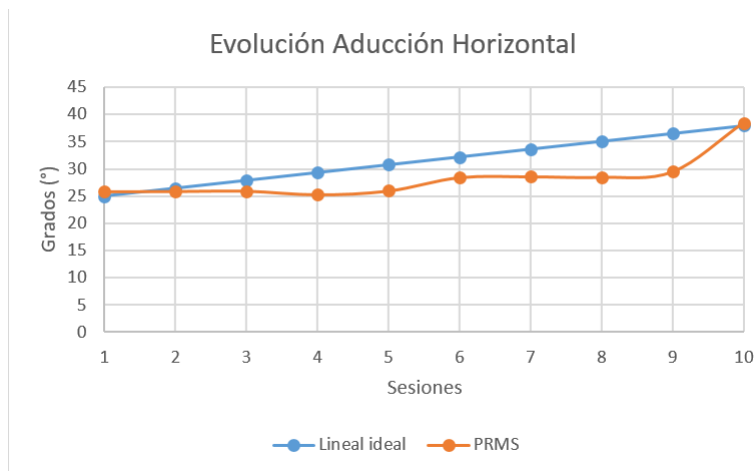


Figura 89: Comparativa de la evolución en la aducción horizontal de hombro del usuario 1.

Al analizar las dos gráficas anteriores, es posible determinar la similitud de los puntos iniciales (antes del inicio de las sesiones y día 1 con la plataforma) y los puntos finales (después de finalizar las sesiones y día 10 con la plataforma), los cuales muestran la comparativa entre la toma de datos manual y la toma de datos con la plataforma. Así mismo se visualiza que en este caso para el usuario 1 la evolución en el transcurso de cada una de las sesiones no se realiza de manera lineal sino más bien de una manera exponencial.

Se realizó este análisis para cada uno de los once usuarios y se generaron dos gráficas con el promedio de sus evoluciones, tanto para flexión, Figura 90 como para la aducción horizontal, Figura 91.

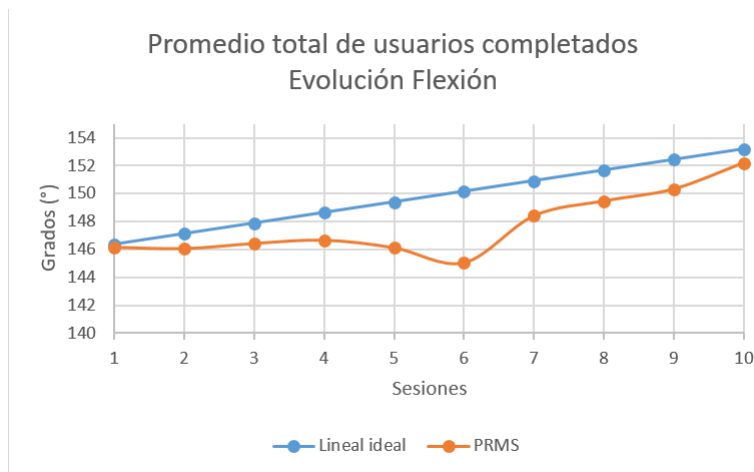


Figura 90: Comparativa de la evolución promedio en la flexión de hombro de los 11 usuarios.  
Fuente propia.

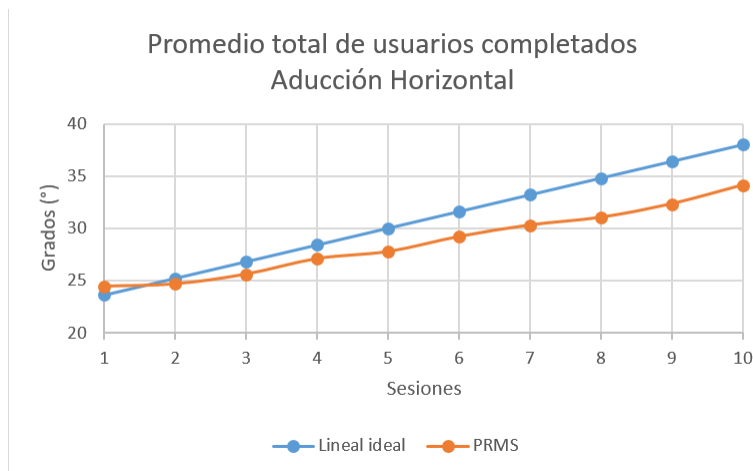


Figura 91: Comparativa de la evolución promedio en la aducción horizontal de hombro de los 11 usuarios.

En el promedio de los once usuarios es posible visualizar en mayor medida las diferencias generadas en la toma de datos por el instrumento evaluador y la plataforma, siendo más pronunciada esta diferencia en la evaluación de la aducción horizontal. En general se determina que antes y después del uso de la plataforma hubo una mejoría en los usuarios.

De manera más puntual se observó que la evolución en la flexión promedio de todos los usuarios presentó en el día seis un declive muy pronunciado. Esto se debe a que el usuario 8 en el día seis tuvo un resultado bastante bajo y por fuera de la tendencia que venía llevando, esto es posible visualizarlo en la gráfica de su evolución respecto a la flexión, Figura 92.

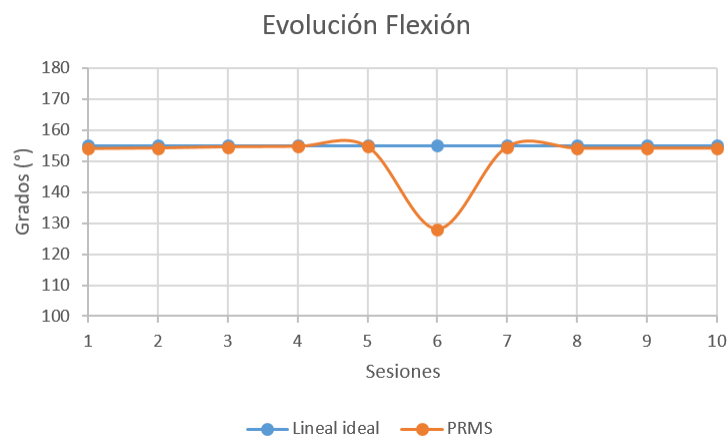


Figura 92: Comparativa de la evolución en la flexión de hombro del usuario 8.

Este diferencia tan significativa en la evolución del usuario 8, puede ser debido a que la toma de datos y el archivo de estos se realizó en una base de datos pública y gratuita, además de que la conexión a internet se realizó por medio de datos móviles debido a la infraestructura respecto a la conectividad de la Universidad del Cauca. Esto generó algunas deficiencias en el registro de datos, aumentando la diferencia obtenida con respecto a la tomada por la plataforma en actividades que requerían una conexión constante como los ejercicios de entrenamiento.

## Análisis estadístico

Para este aspecto se realizó un análisis sobre la posible correlación entre la variable de interés y la variables obtenidas. Utilizando la herramienta estadística JAMOVI la cual es gratuita y abierta [44]. Se generó una **correlación de Pearson** obteniendo el siguiente resultado.

R   Pearson	Ang Inicial FI	$\Delta$ Puntaje	$\Delta$ Tiempo Max	Ang Final FI
Ang Inicial FI	-			
$\Delta$ Puntaje	<b>0.296</b>	-		
$\Delta$ Tiempo Max	<b>0.248</b>	<b>0.578</b>	-	
Ang Final FI	<b>0.762</b>	<b>-0.162</b>	<b>0.232</b>	-

Figura 93: Correlación de Pearson para la evolución de la flexión.

R   Pearson	Ang Inicial Ad	$\Delta$ Puntaje	$\Delta$ Tiempo Max	Ang Final Ad
Ang Inicial Ad	-			
$\Delta$ Puntaje	<b>0.735</b>	-		
$\Delta$ Tiempo Max	<b>0.400</b>	<b>0.578</b>	-	
Ang Final Ad	<b>0.800</b>	<b>0.537</b>	<b>0.216</b>	-

Figura 94: Correlación de Pearson para la evolución de la aducción horizontal.

Para las gráficas de correlación, se ha dividido la tabla en cuatro factores: el resultado inicial, la evolución del puntaje (calculado como el puntaje del día 10 de las sesiones menos el puntaje del día 1 de las sesiones), la diferencia en el tiempo máximo de agarre (calculada como el tiempo máximo del día 10 de las sesiones menos el tiempo máximo del día 1 de las sesiones) y el resultado final.

Entendiendo que la correlación de Pearson define la fuerza y la dirección de la relación lineal entre las variables, se puede afirmar que un coeficiente de correlación de 1 o -1 indica una asociación lineal positiva o negativa, respectivamente. Por otro lado, un coeficiente de correlación de 0 indica la ausencia de una asociación lineal entre las variables, aunque podría existir una asociación de otro tipo. [45]

Las Figuras 93 y 94 indican que no existe una correlación lineal entre las variables obtenidas, siendo la más cercanas a 1 en ambos resultados, la correlación entre la variable final y la inicial tanto para flexión como para la aducción horizontal.

También se llevó a cabo un análisis de **regresión lineal** entre las variables de interés, con el propósito de determinar la dependencia entre la variable de evolución y la variable inicial, así como las variables de desempeño del usuario en la plataforma. Se calculó un valor de p (p-value) para evaluar esta dependencia. Si el resultado del p-value es inferior al 5% (0.005), se puede aceptar la hipótesis de que la variable de evolución tiene una dependencia con el resto de las variables [46].

Se obtuvieron los siguiente resultados:

	p value
Ang Inicial Fl	< .001
△ Puntaje	0.011
△ Tiempo Max	0.071

Figura 95: Regresión lineal para la evolución de la flexión.

	p value
Ang Inicial Ad	0.032
△ Puntaje	0.908
△ Tiempo Max	0.705

Figura 96: Regresión lineal para la evolución de la aducción horizontal.

---

Para la **evolución de la flexión** en la tabla de la Figura 95 se observa que los valores de p-value son menores a 0.005 tanto para la variable inicial como para la evolución del puntaje. Estos resultados sugieren que la plataforma cumple su función al mostrar una mejora positiva en la evolución de la flexión desde el inicio del usuario, y que el desempeño del puntaje influye en esta mejoría. Sin embargo, el valor de p-value relacionado con el tiempo máximo de agarre es mayor a 0.005, lo que indica que no se puede determinar una relevancia significativa de esta variable en la evolución del ángulo final de flexión.

En cuanto a la **evolución de la aducción horizontal** en la tabla de la Figura 96 se observa que el valor de p-value es menor a 0.005 respecto a la variable inicial. Esto indica una dependencia entre el ángulo final de aducción horizontal y su valor inicial. Sin embargo, a diferencia de la evolución en el ángulo de flexión, no se encuentra una dependencia significativa con la evolución del puntaje. En resumen, la plataforma muestra una evolución positiva en el ángulo de aducción horizontal desde el inicio del usuario, pero no se puede determinar una influencia relevante del desempeño del puntaje y el tiempo máximo de agarre en esta mejora.

#### ■ **Aspecto 4: Relación del desempeño respecto al dolor**

Se determinó una posible relación entre el desempeño de los usuarios con respecto al dolor evaluado antes y después de las diez sesiones, ante la manifestación de la reducción de dolor que algunos usuarios comentaban durante el proceso. Por ello se generó, como en el aspecto tres **Evolución de los usuarios**, una recta respecto al número de criterios de inclusión que dieron como resultado positivo (Figura 97), recordando que estos evaluaron el dolor ante las pruebas de provocación, siendo 6 el número mayor por criterios evaluados y 0 para la ausencia de algún criterio positivo, como se explica en el capítulo cinco **Pruebas**, sección **5.1.1**, ítem **Evaluación de dolor**.

		RECTA CRITERIOS		
		Paso →	-0,3333333	Desplazada
DATOS	1	4	90,5	
	2	3,66666667	90,1666667	
	3	3,33333333	89,83333333	
	4	3	89,5	
	5	2,66666667	89,1666667	
	6	2,33333333	88,83333333	
	7	2	88,5	
	8	1,66666667	88,1666667	
	9	1,33333333	87,83333333	
	10	1	87,5	
Mitad		2,5		

Figura 97: Datos de la recta generada para el análisis de la evolución del dolor para el usuario 1.

Igualmente para estos datos se calculó un **Paso** determinado, el cual es el valor que se debe sumar al dato anterior, empezando por el inicial (dato 1), y de manera sucesiva hasta llegar al valor final (dato 10). Realizando el mismo procedimiento como en el aspecto anterior, para este caso del usuario 1 que empezó con **cuatro** criterios de inclusión y terminó únicamente con **uno**, se generó una recta de los criterios (Figura 97) de la siguiente manera: El dato uno cuenta con un valor de 4, más el valor del paso que es -0,3333333 da como resultado que el dato número dos es 3,66666667 aproximando algunos decimales, este proceso se realiza igualmente para cada uno de los diez datos.

El desempeño se evaluó respecto a la puntuación promedio obtenida por los usuarios de los tres ejercicios por día. Debido a que ambos datos no guardan relación respecto a las unidades, se calculó el valor necesario para que las gráficas quedaran conjuntas sin alterar su proporción. Esto se visualiza en los datos que se encuentran al lado de los valores de la recta de criterios de inclusión en la columna tres **Desplazada**. Para este caso puntual el valor inicial es 4, realizando el cálculo de desplazamiento genera un valor de 90.5 y ese cálculo realizándolo en todos los valores de la recta, permitió desplazar la gráfica de los criterios de inclusión hacia el desempeño por puntuación del usuario. Esto con el fin de poder analizar de mejor manera los resultados.



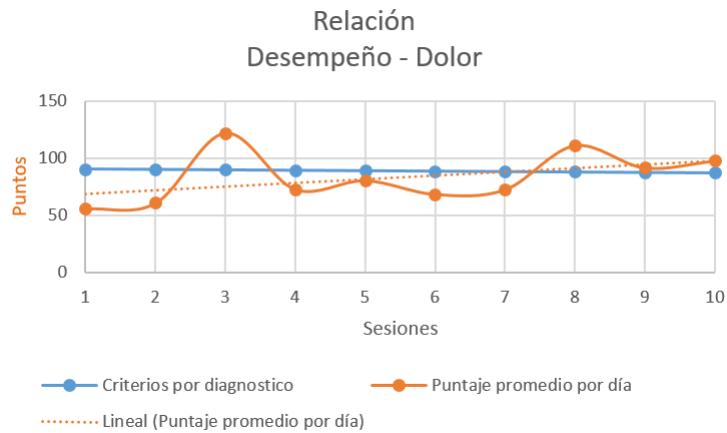


Figura 98: Relación del desempeño promedio por día y número de criterios de inclusión del usuario 1.

A la gráfica de la relación entre el desempeño y el dolor del usuario 1 (Figura 98) se le generó una recta de tendencia respecto al puntaje promedio por día realizado en los tres ejercicios. Esta recta de tendencia permitió visualizar que, mientras hubo hipotéticamente una reducción de dolor, entendiéndose este como un factor subjetivo definido por el usuario, el desempeño presentó una tendencia de crecimiento respecto al puntaje desarrollado por el usuario. Este análisis se realizó a cada uno de los once usuarios y posteriormente se generó una gráfica promedio para visualizar el comportamiento, Figura 99.

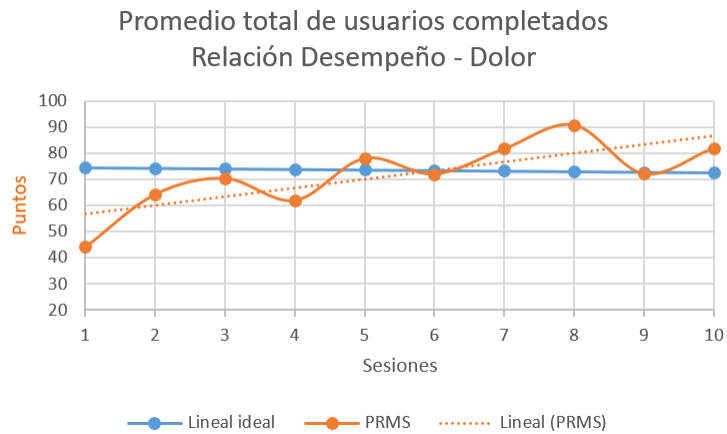


Figura 99: Promedio de la relación del desempeño promedio por día y número de criterios de inclusión de los 11 usuarios.

De manera muy general, viendo la caída de valores en los resultados del gráfico **Lineal ideal** que representa el dolor hipotético en los usuarios, es posible determinar que hubo una reducción de dolor respecto al antes y después de todo el proceso de las sesiones realizadas con la plataforma, y que a su vez, viendo la tendencia lineal del gráfico **PRMS** que representa los datos obtenidos por la plataforma durante las sesiones, hubo un incremento en el desempeño respecto a la puntuación de los usuarios en los ejercicios dispuestos, generándose una posible relación entre estos dos factores.

### Análisis estadístico

Igual que en el aspecto anterior **Evolución de los usuarios** se realiza para éste aspecto un análisis sobre una posible correlación entre la variable de interés, para este caso la evolución del dolor que se evalúa con los criterios de inclusión, y las variables obtenidas. Se generó una **correlación de Pearson** obteniendo el siguiente resultado.

R   Pearson	Inclusión Pre	Δ Puntaje	Δ Tiempo Max	Inclusión Pos
Inclusión Pre	-			
Δ Puntaje	0.130	-		
Δ Tiempo Max	0.009	0.578	-	
Inclusión Pos	0.684	0.222	0.303	-

Figura 100: Correlación de Pearson para la evolución del dolor.

La figura 100 indica que no existe una correlación lineal entre las variables obtenidas.

Se realiza un análisis de **regresión lineal** entre las variables de interés, obteniendo el siguiente resultado.

	p value
Inclusión Pre	0.030
Δ Puntaje	0.855
Δ Tiempo Max	0.320

Figura 101: Regresión lineal para la evolución del dolor.

---

En la tabla de la Figura 101 se observa que el valor de p-value es menor a 0.005 únicamente para la variable inicial. Esto indica una dependencia entre los criterios de inclusión finales respecto a los criterios de inclusión iniciales. Esto sugiere que la plataforma cumple su función al mostrar una evolución positiva desde el punto de partida del usuario en términos de los criterios de inclusión. Sin embargo, no se puede determinar una influencia relevante del desempeño del puntaje y el tiempo máximo de agarre en esta mejora, ya que sus resultados de p-value superan el 0.005.

#### ■ **Aspecto 5: Relación entre la fuerza y el tiempo máximo**

Como último análisis, se estableció una posible relación entre la evolución de la fuerza de los usuarios, basándose en la relación existente entre la fuerza de la articulación y el desempeño funcional [47], y la evolución del tiempo de agarre, considerándolo como una variable que permite evaluar la evolución de la resistencia del usuario para mantener activa la articulación. Para llevar a cabo este análisis, se utilizaron los datos de evolución de la fuerza obtenidos por el instrumento evaluador antes y después de las diez sesiones realizadas. Por otro lado, la evolución del tiempo de agarre se obtuvo a través de la plataforma durante cada una de las sesiones realizadas.

Se realizó el análisis con el tiempo promedio máximo de agarre por día debido a que este es el que representa en mayor medida el logro desarrollado por los usuarios, ya que el tiempo mínimo se encuentra limitado por el umbral cero y el tiempo promedio se ve afectado por el mismo.

Se genera nuevamente una recta utilizando los datos de fuerza de cada usuario con respecto a la articulación (Figura 102) recopilados mediante el instrumento evaluador en la escala de Daniels y Worthingham, tal como se explica en el capítulo cinco **Pruebas**, sección **5.1.1**, ítem **Fuerza**. A partir de estos valores, se calcula un promedio de los seis factores obtenidos del instrumento evaluador antes y después de las sesiones realizadas con la plataforma, considerando que los resultados de las articulaciones evaluadas están relacionadas directamente con el hombro afectado.

		RECTA FUERZA	
		Paso →	Desplazada
DATOS	1	4,16666667	33,0351405
	2	4,24074074	33,1092146
	3	4,31481481	33,1832886
	4	4,38888889	33,2573627
	5	4,46296296	33,3314368
	6	4,53703704	33,4055109
	7	4,61111111	33,4795849
	8	4,68518519	33,553659
	9	4,75925926	33,6277331
	10	4,83333333	33,7018072
Mitad		4,5	

Figura 102: Datos de la recta generada para el análisis de la evolución de fuerza para el usuario 1.

Al igual que en el aspecto cuatro **Relación del desempeño respecto al dolor**, esta recta de fuerza no guarda relación respecto a las unidades de los resultados a comparar, para este caso el tiempo promedio máximo de agarre. Por lo tanto se calculó el valor necesario para que las gráficas quedaran conjuntas sin alterar su proporción, esto se visualiza en los datos que se encuentran al lado de los valores de la recta de fuerza en la columna tres **Desplazada**. Para este caso puntual el valor inicial es 4,16666667, realizando el cálculo de desplazamiento se genera un valor de 33,0351405 y ese cálculo realizándolo en cada uno de los valores de la recta calculada permitió desplazar la gráfica de la fuerza hacia el tiempo máximo de agarre del usuario. Esto con el fin de poder analizar de mejor manera los resultados.

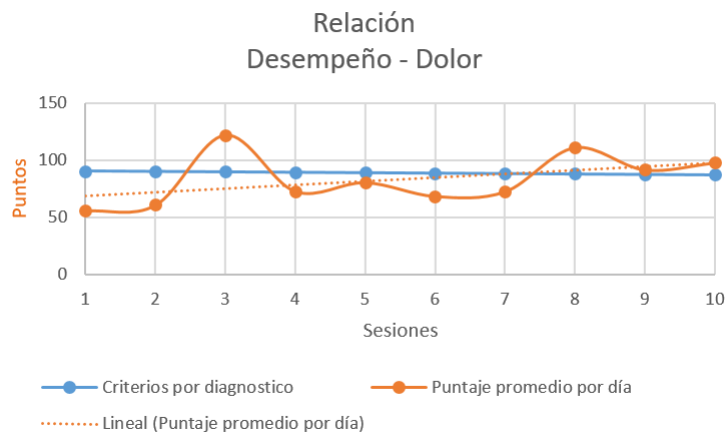


Figura 103: Relación del promedio tiempo máximo por día y fuerza del usuario 1.

A la gráfica del desempeño del usuario respecto al tiempo máximo de agarre (Figura 103) se le generó una recta de tendencia y con ello es posible visualizar que mientras hubo incremento en el promedio del tiempo máximo de agarre por día, que representa los datos obtenidos por la plataforma de los tiempos máximos alcanzados por los usuarios en el agarre de los objetos, también se presentó un incremento en la fuerza del usuario, viendo el gráfico de la fuerza por diagnóstico. Este gráfico hace referencia a la recta generada entre el antes y después de los resultados promedios de fuerza tomados por el instrumento evaluador. Si bien dentro de la relación no es posible ver la recta generada de fuerza de forma detallada, se puede visualizar este incremento de los datos en la figura 102, el cual crece en valores decimales.

Este análisis se realizó a cada uno de los once usuarios y posteriormente se generó una gráfica promedio para visualizar el comportamiento, Figura 104.

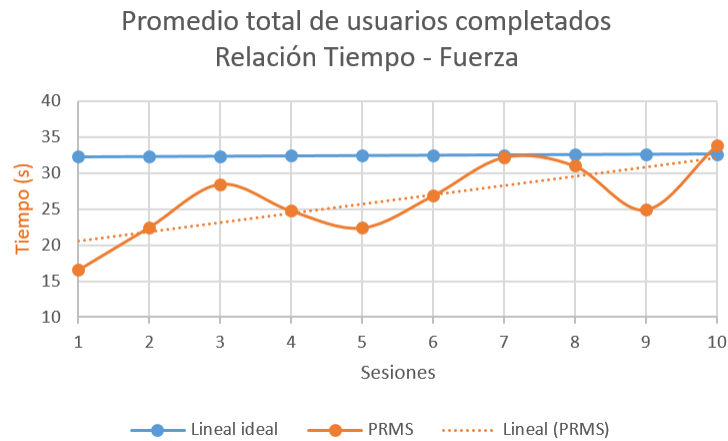


Figura 104: Promedio de la relación del tiempo máximo de agarre por día y fuerza de los 11 usuarios.

Gracias a la tendencia lineal generada para el gráfico **PRMS**, que representa los datos tomados por la plataforma respecto al tiempo máximo de agarre de los objetos en las diez sesiones, se puede visualizar el crecimiento del promedio de tiempo máximo de agarre por día de los usuarios. También se presenta un incremento del promedio de la fuerza evaluada por el instrumento evaluador, que representa la recta generada entre el promedio de los resultados obtenidos de forma manual del antes y después de las sesiones respecto a la fuerza. La relación entre estos dos factores no se visualiza de forma clara debido al pequeño incremento decimal que presenta la fuerza evaluada. Esto deja abierto un espacio a una posible investigación más detallada respecto a esta relación en trabajos futuros.

## Análisis estadístico

Como en los dos aspectos anteriores, se realiza para este aspecto una posible correlación entre la variable de interés, para este caso la fuerza articular que se evalúa con los datos tomados con el instrumento evaluador, y las variables obtenidas. Se generó una **correlación de Pearson** obteniendo el siguiente resultado.

R   Pearson	Fuerza Pre	Δ Puntaje	Δ Tiempo Max	Fuerza Pos
Fuerza Pre	-			
Δ Puntaje	<b>-0.797</b>	-		
Δ Tiempo Max	<b>-0.226</b>	<b>0.578</b>	-	
Fuerza Pos	<b>0.596</b>	<b>-0.729</b>	<b>-0.714</b>	-

Figura 105: Correlación de Pearson para la evolución de la fuerza articular.

La figura 105 indica que no existe una correlación lineal entre las variables obtenidas.

Se realiza un análisis de **regresión lineal** entre las variables de interés, obteniendo el siguiente resultado.

	p value
Fuerza Pre	<b>0.307</b>
Δ Puntaje	<b>0.913</b>
Δ Tiempo Max	<b>0.077</b>

Figura 106: Regresión lineal para la evolución de la fuerza articular.

En la tabla de la Figura 106 se observa que el valor de p-value es mayor a 0.005 en todas las variables. Por lo tanto, no se puede afirmar que el desempeño del puntaje, el tiempo máximo de agarre, y en general, la implementación de la plataforma generen una evolución positiva en relación a la fuerza articular del usuario.

---

## 6.2. Análisis cualitativo.

En el desarrollo del análisis cualitativo se presentarán los resultados obtenidos de una encuesta respondida por ocho de los usuarios del proceso. Son solo ocho debido a que cuatro de los once usuarios son personas que contaban con dos de los hombros con criterios de inclusión. La encuesta se envió una vez se terminaron las diez sesiones y se realizara la evaluación final. Se presentarán los datos mas significativos con sus respectivas preguntas y respuestas. Para obtener una medida de los datos, se utilizó para algunas preguntas una versión reducida basada en la escala de Likert, teniendo en cuenta que existen investigaciones que recomiendan formatos de respuesta desde dos hasta veinticuatro opciones siendo entre tres y siete la cantidad óptima de categorías. Además se ha realizado un estudio donde se analizaron diferentes formatos de escala (3, 5 y 6 opciones) donde no se pudo evidenciar que no existieron diferencias considerables entre sus resultados [48]. Por ello para el el formato de la encuesta se definieron para la mayoría entre tres y cuatro opciones según la pregunta lo amerite.

### ■ **Funcionamiento de la plataforma**

Para las siguientes dos preguntas (1 y 2) se definieron cuatro opciones: **Excelente**, **Bueno**, **Regular** y **Malo**.

#### 1. **¿Cómo calificaría de manera general el funcionamiento de la aplicación?**

Para esta pregunta se obtuvo una respuesta del 50 % para **excelente** y el otro 50 % para **bueno**.

#### 2. **¿Cómo considera el espacio o entorno virtual respecto a la comodidad visual?**

Para esta pregunta igualmente se obtuvo una respuesta del 50 % para **excelente** y el otro 50 % para **bueno**.

---

Para la siguiente pregunta (3) se definieron cuatro opciones: **Muy suficiente**, **Suficiente**, **Regular** e **Insuficiente**.

3. **¿Considera usted que la información suministrada dentro de la plataforma y por el equipo de apoyo fue suficiente para el desarrollo de los ejercicios?**

Para esta pregunta se obtuvo una respuesta del 50 % para **Muy suficiente** y el otro 50 % para **Suficiente**.

4. **¿Qué mejoras considera son necesarias o se podrían implementar a la herramienta?**

Las respuestas fueron las siguientes:

- Tal vez se podría poner límite de tiempo para cada ejercicio.
- No mejoraría nada, es una herramienta muy innovadora y completa.
- Mayor variedad de ejercicios.
- Que no se mueva con los controles, poder caminar en la habitación.
- Tal vez podría haber un vídeo animado corto de cómo es la manera correcta de hacer cada rutina.

**Análisis:** Se puede observar que si bien la plataforma tuvo una buena aceptación por parte de los usuarios desde el funcionamiento hasta el apartado visual, hay aspectos que se pueden mejorar, como se observa en la última pregunta de este apartado. Algunos de estos se explicarán en la sección de conclusiones en el ítem de **trabajos futuros**.



---

## ■ Desempeño y evolución del usuario

5. ¿Cuál de los 3 ejercicios desarrollados dentro de la plataforma considera usted que generó mayor dificultad?

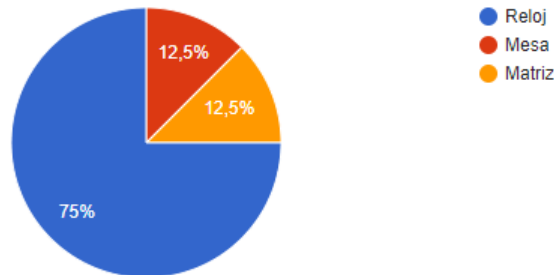


Figura 107: Percepción de los usuarios respecto al ejercicio que le generó más dificultad.

6. Dependiendo de la respuesta anterior, ¿Por qué considera que ese ejercicio le generó mayor dificultad?

Las respuestas fueron las siguientes:

- Las manijas del reloj no se movía de acuerdo a la mano, lo que dificultaba su movimiento.
- Generaba fatiga en el hombro.
- Al ser un ejercicio que implicaba un movimiento circular generaba mayor esfuerzo y dificultad para hacer el ejercicio.
- Porque me cansaba mucho.
- La forma de sujetar el minuterio.
- Eran dos movimientos diferentes.
- Porque la rotación me generaba un pequeño dolor constante luego de realizarlo.
- Debido a que su estructura y aleatoriedad requieren mayor concentración y movimientos combinados más complejos en la articulación del hombro para su cumplimiento adecuado.

---

Para las siguientes dos preguntas (7 y 8) se definieron tres opciones: **Mejoría**, **Neutralidad** y **Empeoramiento**.

7. **¿Desde su perspectiva cómo considera su evolución respecto al dolor en el hombro afectado?**

Para esta pregunta se obtuvo una respuesta del 62,5 % para **mejoría** y un 37,5 % para **neutralidad**.

8. **¿Desde su perspectiva cómo considera su evolución respecto a la movilidad en el hombro afectado?**

Para esta pregunta se obtuvo una respuesta del 75 % para **mejoría** y un 25 % para **neutralidad**.

Para la siguiente pregunta (9) se definieron únicamente dos posibles opciones: **Si** y **No**.

9. **¿Considera usted que hubo una mejoría en cada una de las sesiones respecto a la adaptabilidad con el entorno virtual y la realización de los ejercicios?**

Para esta pregunta se obtuvo una respuesta del 100 % para **Si**.

10. En el tiempo de uso de la aplicación padeció alguno de los siguientes síntomas?

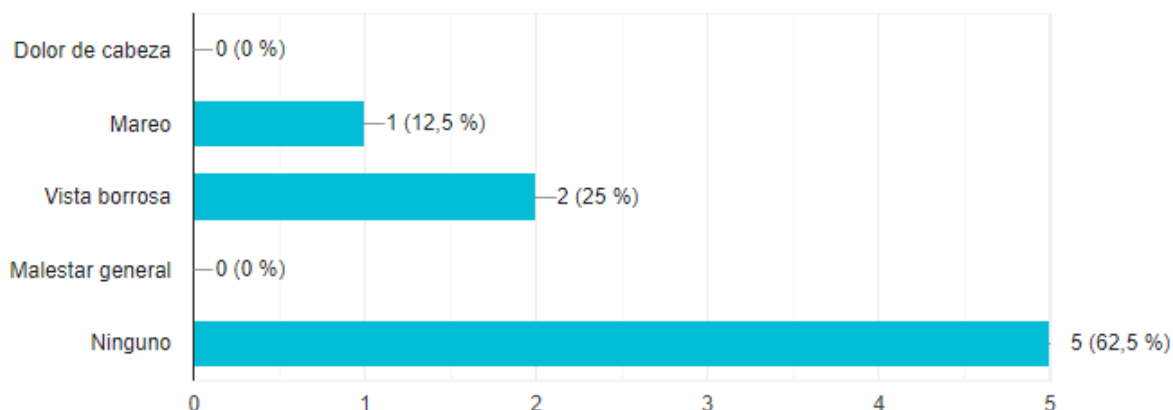


Figura 108: Percepción de los usuarios respecto a los síntomas desarrollados durante el uso de la plataforma.

Para la siguiente pregunta (11) se definieron únicamente dos posibles opciones: **Si** y **No**.

11. ¿Considera usted que la herramienta genera alguna ayuda en la rehabilitación de la movilidad del hombro?

Para esta pregunta se obtuvo una respuesta del 100 % para **Si**.

12. Describa en UNA PALABRA clave, cómo considera usted la herramienta para el proceso de rehabilitación.

Interesante      Cómoda  
**INNOVADORA**  
Eficiente      **Práctica**  
**Tecnológica**

Figura 109: Nube de palabras de cómo consideran los usuarios la plataforma diseñada.

---

**Análisis:** Es posible observar que uno de los ejercicios que generó mayor dificultad a los usuarios en sus sesiones fue el ejercicio del **reloj**, Figura 107, debido a la complejidad de su diseño e implementación. Además la estructura que maneja el motor de desarrollo Unity 3D con respecto a la implementación de los paquetes del dispositivo Quest 2, dificultó presentar ante los usuarios un ejercicio de mayor comodidad para implicar el movimiento de rotación en el hombro.

La mayoría de los usuarios presenta una percepción de mejoría tanto en el dolor como en la movilidad del hombro, si bien un pequeño porcentaje presenta una neutralidad respecto a ello. Es posible evidenciar que ninguno tuvo un empeoramiento, por lo que la plataforma en esta muestra puntual no se presenta como un factor que haya generado o pueda generar una peor condición en los usuarios que la utilicen. Aún así el hecho de que la plataforma esté desarrollada en un entorno virtual implica que los usuarios deben adaptarse a dicha tecnología, por lo que el factor de aprendizaje es necesario para evitar los posibles síntomas negativos que se mostraron en la Figura 108.

Por último se evidencia que los usuarios sintieron que el uso de la plataforma para el proceso de rehabilitación es positivo, tanto por la percepción de sentir mejoría en general de la extremidad, como en lo cómodo, innovador y práctico, Figura 109.

## Capítulo 7

# Conclusiones y trabajos futuros.

Al finalizar el proceso de investigación, desarrollo y pruebas de la plataforma, en este apartado se presentarán las conclusiones y trabajos futuros de este estudio.

### 7.1. Conclusiones.

Después de realizar el análisis de tecnologías basadas en VR para la medición de rangos de movilidad, se observó que en su mayoría estas utilizaban dispositivos externos como cámaras digitales para el cálculo de estos rangos. En este trabajo dichos rangos de movilidad se basan en medidas de referencia como la ubicación del hombro del usuario y la posición de objetos en el plano virtual, sin la necesidad de dispositivos externos. Además al ser un instrumento de medida digital desarrollado en Unity 3D, cuenta con mayor exactitud en la toma de datos debido a que es capaz de determinar el valor con decimales, en comparación a la toma de datos manual la cual se limita únicamente a valores enteros. Pero por otra parte, al no utilizar dispositivos externos, se genera una restricción sobre los rangos máximos que capta la aplicación en el ángulo superior o generado por el movimiento de flexión de hombro, el cual es captado hasta un rango máximo de 155 grados.

La correcta segmentación de la muestra poblacional resultó esencial para llevar a cabo las pruebas, lo cual se logró gracias al uso de un instrumento evaluador diseñado por expertos en el área de aplicación de la plataforma. En el caso de esta investigación, el instrumento evaluador fue diseñado y llevado a la práctica por la estudiante Tania Vanessa Losada Garzón en tutoría de la Docente Clara Inés Paz Peña, ambas pertenecientes al Departamento de Fisioterapia de la Facultad de Salud en la Universidad del Cauca.

---

Este instrumento permitió descartar a nueve de las veinticinco personas iniciales consideradas en el estudio mediante pruebas de provocación. Como resultado, se seleccionaron finalmente catorce usuarios con impresiones diagnósticas por parte de los evaluadores. Aunque estas impresiones no categorizaban a los usuarios como una muestra poblacional con patología, ya que no constituían un diagnóstico médico, permitieron crear una muestra poblacional similar para la realización de las pruebas. De estos catorce usuarios, solo once completaron exitosamente el número de sesiones programadas para ser nuevamente evaluados por el instrumento evaluador y presentar así un análisis de resultados.

Los resultados obtenidos por la plataforma fueron muy cercanos a los tomados de manera manual, por lo que permite validar los datos utilizados durante todo el análisis desarrollado. Por ello, es notorio que cada uno de los usuarios haya presentado una evolución durante el transcurso de cada una de las sesiones dispuestas en los días trabajados, teniendo nueve usuarios con una evolución positiva respecto a los criterios de inclusión definidos por el instrumento evaluador, uno sin variación en los resultados inicial y final, y uno con un aumento en los criterios de inclusión. Es posible determinar, al menos durante el periodo del proceso concluido y con la muestra trabajada, que la plataforma presentó un beneficio en la evolución de los rangos de movilidad de los usuarios. Además la evolución positiva no solo radica en la mejoría de apertura y movilidad de los ángulos de movimiento, sino también en el desempeño de las puntuaciones y los tiempos de interacción con los objetos y/o agarre. Esto se ve reflejado, en menor o mayor medida dependiendo del factor que se analice, en los resultados de fuerza articular, dolor y en cómo los usuarios tuvieron la percepción en su posible proceso de rehabilitación considerando que la plataforma de una u otra manera generó una ayuda en el proceso de fortalecimiento durante el transcurso de cada una de las sesiones.

Disponiendo los datos obtenidos y con su respectivo análisis es posible determinar que el desarrollo e implementación de la **Plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad**, presenta una viabilidad como herramienta de apoyo en los procesos de rehabilitación de miembros superiores en su etapa de fortalecimiento.

---

## 7.2. Trabajos futuros.

- De ser posible, implementar una mejora en la plataforma creada en su componente software para aumentar el rango de medición de los datos respecto al rango máximo captado en el movimiento de flexión de hombro, utilizando más puntos de referencia en el entorno virtual o algún otro método que no implique el uso de dispositivos externos.
- El dispositivo Oculus Quest 2 cuenta con la configuración de seguimiento de manos sin la necesidad de controles debido a sus cuatro cámaras infrarrojas. Como trabajo futuro se propone desarrollar un complemento para la aplicación con la obtención de datos respecto al tiempo de interacción sin la necesidad de controles y permitiendo el desplazamiento en el entorno virtual mediante desplazamiento en un ambiente real para cada usuario.
- Implementar de manera general dentro de la plataforma, el instrumento evaluador, especialmente las pruebas de provocación, para que la plataforma no funcione solamente con el objetivo de fortalecimiento sino también como herramienta de diagnóstico.
- Generar una conexión con una base de datos mejor estructurada, la cual no presente limitaciones de accesibilidad y conectividad con los servidores de la Universidad del Cauca.

# Bibliografía

- [1] S. Arauz, “Lesiones manguito rotador - clínica centro,” 2022.
- [2] Savia, “Lesiones manguito rotador - clínica centro,” 2019.
- [3] Rehametrics, “Rehabilitación virtual — juegos y ventajas — rehametrics,” 2022.
- [4] C. H. Taboadela, “Goniometría,” *Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales. Buenos Aires: Asociart ART*, 2007.
- [5] J. P. A. Dorado, D. M. M. Rodríguez, and O. A. V. Alban, “Prototype system for upper limb rehabilitation using virtual reality (prototipo de sistema para la rehabilitación de miembros superiores mediante realidad virtual),” *Pistas Educativas*, vol. 44, no. 143, 2022.
- [6] A. Caicedo Viveros, L. C. Díaz Villegas, and D. A. Oveira Pulido, “Deserción de pacientes en terapias de rehabilitación física, ocupacional y fonoaudiología de la ips unidad fisioterapeutica de occidente de la ciudad de popayán,” 2018.
- [7] S. Castellanos-Madrigal, E. Magdaleno-Navarro, V. Herrera-Rodríguez, M. D. García, and O. Torres-Bugarín, “Lesión del manguito rotador: diagnóstico, tratamiento y efecto de la facilitación neuromuscular propioceptiva,” *El Residente*, vol. 15, no. 1, pp. 19–26, 2020.
- [8] H. M. Revelo Reyes, “Estudio del impacto del accidente cerebrovascular en la funcionalidad de pacientes atendidos en las áreas de rehabilitación física del ministerio de salud pública de la ciudad de ibarra 2016,” B.S. thesis, 2018.
- [9] M. C. Arbelo Figueredo, A. Estévez Perera, B. González Méndez, and J. Porro Novo, “Caracterización clínica y criterios diagnósticos en mujeres con hipermovilidad articular,” *Revista Cubana de Reumatología*, vol. 19, no. 2, pp. 57–64, 2017.



- 
- [10] D. Lee, B.-h. Chang, and J. Park, “Evaluating the comfort experience of a head-mounted display with the delphi methodology,” *Journal of Internet Computing and Services*, vol. 21, no. 6, pp. 81–94, 2020.
- [11] A. R. A. Agudelo, A. F. B. Becerra, S. Camilo, E. Botero, and C. G. Garcia, “Realidad virtual aplicada a la psicología laboral,”
- [12] J. N. Cárdenas, *Aplicaciones de la realidad virtual y realidad aumentada en medicina: diagnóstico, tratamiento y rehabilitación*. PhD thesis, Universidad de Jaén, 2021.
- [13] M. Sailer and L. Homner, “The gamification of learning: A meta-analysis,” *Educational Psychology Review*, vol. 32, no. 1, pp. 77–112, 2020.
- [14] I. Caponetto, J. Earp, and M. Ott, “Gamification and education: A literature review,” in *European Conference on Games Based Learning*, vol. 1, p. 50, Academic Conferences International Limited, 2014.
- [15] G. Fuertes and J. G. Casero, “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)*, vol. 1, no. 1, pp. 22–31, 2020.
- [16] A. H. Paez, J. A. D. Falcón, and A. A. P. Cruz, “Arquitectura de software para el desarrollo de videojuegos sobre el motor de juego unity 3d,” *I+ D Tecnológico*, vol. 14, no. 1, pp. 54–65, 2018.
- [17] F. Dupuis, K. Perreault, L. Hébert, M. Perron, M. A. Fredette, F. Desmeules, and J. Roy, “Group-based exercise training programs for military members presenting musculoskeletal disorders—protocol for a pragmatic randomized controlled trial,” *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 23, no. 1, pp. 1–9, 2022.
- [18] A. Shirzadi, M. Farzad, A. Farhoud, and E. Shafiee, “Application of continuous passive motion in patients with distal radius fractures: A randomized clinical trial,” *Hand Surgery and Rehabilitation*, vol. 39, no. 6, pp. 522–527, 2020.
- [19] T. J. D. Tomić, A. M. Savić, A. S. Vidaković, S. Z. Rodić, M. S. Isaković, C. Rodríguez-de Pablo, T. Keller, and L. M. Konstantinović, “Armassist robotic system versus matched conventional therapy for poststroke upper limb rehabilitation: a randomized clinical trial,” *BioMed research international*, vol. 2017, 2017.

- 
- [20] I. Aprile, M. Germanotta, A. Cruciani, S. Loreti, C. Pecchioli, F. Cecchi, A. Montesano, S. Galeri, M. Diverio, C. Falsini, *et al.*, “Upper limb robotic rehabilitation after stroke: a multicenter, randomized clinical trial,” *Journal of Neurologic Physical Therapy*, vol. 44, no. 1, pp. 3–14, 2020.
- [21] M. M. Lee, H.-y. Cho, and C. H. Song, “The mirror therapy program enhances upper-limb motor recovery and motor function in acute stroke patients,” *American journal of physical medicine & rehabilitation*, vol. 91, no. 8, pp. 689–700, 2012.
- [22] E. M. Tinoco Mascaró and R. Gil Martin, “Virtual reality applications design for physiotherapy and physical training,” B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
- [23] L. S. Moreno, “Máster universitario en ingeniería biomédica trabajo fin de máster,” Trabajo fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
- [24] H. Paraense, B. Marques, P. Amorim, P. Dias, and B. S. Santos, “Whac-a-mole: Exploring virtual reality (vr) for upper-limb post-stroke physical rehabilitation based on participatory design and serious games,” in *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 716–717, IEEE, 2022.
- [25] P. Dias, R. Silva, P. Amorim, J. Lains, E. Roque, I. Serôdio, F. Pereira, and B. S. Santos, “Using virtual reality to increase motivation in poststroke rehabilitation,” *IEEE computer graphics and applications*, vol. 39, no. 1, pp. 64–70, 2019.
- [26] K. Saurav, A. Dash, D. Solanki, and U. Lahiri, “Design of a vr-based upper limb gross motor and fine motor task platform for post-stroke survivors,” in *2018 IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, pp. 252–257, IEEE, 2018.
- [27] P. Kartick, A. J. U. Quevedo, and D. R. Gualdron, “Design of virtual reality reach and grasp modes factoring upper limb ergonomics,” in *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 798–799, IEEE, 2020.
- [28] Y. Joo, D. Xu, E. Thia, C. Kuah, K. Kong, *et al.*, “A feasibility study using interactive commercial off-the-shelf computer gaming in upper limb rehabilitation in patients after stroke.,” *Journal of rehabilitation medicine*, vol. 42, no. 5, pp. 437–441, 2010.

- 
- [29] J. P. Branco, S. Oliveira, J. Páscoa Pinheiro, and P. L Ferreira, “Assessing upper limb function: transcultural adaptation and validation of the portuguese version of the stroke upper limb capacity scale,” *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [30] F. Grimm, J. Kraugmann, G. Naros, and A. Gharabaghi, “Clinical validation of kinematic assessments of post-stroke upper limb movements with a multi-joint arm exoskeleton,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, no. 1, pp. 1–11, 2021.
- [31] S. Datta, C. K. Karmakar, B. Yan, and M. Palaniswami, “Novel measures of similarity and asymmetry in upper limb activities for identifying hemiparetic severity in stroke survivors,” *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. 25, no. 6, pp. 1964–1974, 2020.
- [32] H. Y. Takahasi, C. A. Fidelis-de Paula-Gomes, C. P. Gabel, and A. V. Dibai-Filho, “Translation, cross-cultural adaptation and validation of the upper limb functional index (ulfi) into brazilian portuguese in patients with chronic upper limb musculoskeletal disorders,” *Musculoskeletal Science and Practice*, vol. 56, p. 102452, 2021.
- [33] M. Hoda, Y. Hoda, B. Hafidh, and A. El Saddik, “Predicting muscle forces measurements from kinematics data using kinect in stroke rehabilitation,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, no. 2, pp. 1885–1903, 2018.
- [34] Meta, “<https://www.meta.com/quest/products/quest-2/>,” 27 de Marzo de 2023.
- [35] U. Technologies, “<https://unity.com/>,” 27 de Marzo de 2023.
- [36] Meta, “<https://developer.oculus.com/>,” 27 de Marzo de 2023.
- [37] Microsoft, “<https://visualstudio.microsoft.com/es/>,” 27 de Marzo de 2023.
- [38] Webhost, “<https://www.000webhost.com//>,” 11 de Abril de 2023.
- [39] J. T. Hansen, *NETTER. Anatomía clínica*. Elsevier, 2020.
- [40] C. U. de Navarra, “<https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/reflejos-03> de Mayo de 2023.
- [41] H. J. Hislop and J. Montgomery, *Daniels & Worthingham Técnicas de balance muscular*. Elsevier, 2003.

- 
- [42] J. M. Moreno Fernández, “Valor diagnóstico de la exploración física en la patología del hombro doloroso,” *Proyecto de investigación.*, 2017.
- [43] B. A. Goldberg, M. M. Scarlat, and D. T. Harryman II, “Management of the stiff shoulder,” *Journal of orthopaedic science*, vol. 4, no. 6, pp. 462–471, 1999.
- [44] Jamovi, “<https://www.jamovi.org/about.html>,” 02 de Junio de 2023.
- [45] J. D. H. Lalinde, F. E. Castro, J. E. Rodríguez, J. G. C. Rangel, C. A. T. Sierra, M. K. A. Torrado, S. M. C. Sierra, and V. J. B. Pirela, “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de pearson: definición, propiedades y suposiciones,” *Archivos venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, vol. 37, no. 5, pp. 587–595, 2018.
- [46] A. Vila, M. Sedano, A. López, and A. Juan, “Correlación lineal y análisis de regresión,” *Barcelona: Universidad Oberta de Catalunya*, 2004.
- [47] B. J. Thompson, M. Whitson, E. J. Sobolewski, and M. S. Stock, “Effects of age, joint angle, and test modality on strength production and functional outcomes,” *International journal of sports medicine*, vol. 39, no. 02, pp. 124–132, 2018.
- [48] F. J. P. Abal, S. E. Auné, and H. F. Attorresi, “Variación de la escala likert en el test de utilidad de la matemática,” *Interacciones. Revista de Avances en Psicología*, vol. 4, no. 3, pp. 177–189, 2018.

---

## Anexos.

En este apartado se encuentra el repositorio en GitHub con los Códigos necesarios para el funcionamiento de la plataforma en Unity y los Códigos php para la conexión con la base de datos mencionados en el apartado **Materiales y métodos**, y por ultimo un enlace directo al repositorio en Google Drive de la base de datos de la muestra investigada en donde se encuentran todos los datos y gráficas del apartado **Análisis de resultados**.

### ■ Repositorio en GitHub

Debido a la gran cantidad de códigos y configuraciones utilizadas en el entorno de Unity se creo un repositorio en la pagina de *https://github.com*, el cual permite crear una copia del proyecto y poder visualizar las configuraciones de cada código por separado, encontrados en la carpeta */Assets/Scripts*.

**URL:** *https://github.com/PoloArango/PRMSQ2.git*

**QR:**



Figura 110: Código QR para acceder repositorio en GitHub.

- 
- Base de datos de la muestra investigada con análisis y gráficos.

Debido a la gran cantidad de datos e imágenes que se utilizaron para el análisis del proyecto, se cuenta con un espacio en la plataforma de Google Drive, para poder acceder al documento Excel llamado **resultados y análisis de la plataforma para la rehabilitación de hombro en realidad virtual con medición de los rangos de movilidad**. Los datos se encuentran separados por usuario en cada hoja y los resultados generales en las hojas iniciales. Para visualizar correctamente los datos se recomienda descargar el archivo y abrirlo con la aplicación Excel de Microsoft office.

**URL:** *https://acortar.link/iB88oT*

**QR:**



Figura 111: Código QR para acceder al documento utilizado como base de datos y análisis del proyecto de grado.