

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Herramienta para analizar movimiento en deportistas de alto rendimiento utilizando arreglos de cámaras infrarrojas.

TECH-382

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Ciencias de la Computación**

Presentado por:

Galo Fernando Ortega Cabrera

Jouberth Rafael Gambarrotti Bermúdez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

Dedico este proyecto a mis padres, Rafael y María, quienes me han guiado hasta este momento; a mis hermanos, Ángel, Bernard y Sandra por el apoyo brindado; a mi abuelito Braulio, que siempre estuvo pendiente; a mi novia Alexandra, mis seres queridos y amigos, quienes me alentaron para alcanzar este logro. Este es tanto mío como de ustedes.

**Joubberth Rafael Gambarrotti Bermúdez**

Dedico este proyecto a aquellos que encuentran la belleza en lo imperfecto y la fortaleza en lo cotidiano, a los que enfrentan sus luchas con valentía y una determinación inquebrantable. A mis abuelos Gonzalo y Bertha, que me enseñaron a navegar las tempestades con la cabeza en alto y a seguir siempre mi propio camino. Finalmente, quiero dedicarlo a mis hermanos, cuyo apoyo constante ha sido una fuente inagotable de fuerza y motivación.

**Galo Fernando Ortega Cabrera**

## Agradecimientos

---

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional en cada paso. A la ESPOL, y a los profesores con quienes me he topado a lo largo de la carrera, por brindarme un entorno académico de excelencia. A mis compañeros y amigos tanto los que hice en la universidad como los que tengo desde mi infancia, por convertirse en una fuente constante de motivación.

**Joubberth Rafael Gambarrotti Bermúdez**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida, guiándome en cada paso de mi camino. A cada una de las personas que me brindaron su apoyo incondicional para levantarme y caminar hacia la mejor versión de mí. Y finalmente, con un amor y gratitud eternos, a mi madre, que ya no está conmigo, pero cuyo espíritu y enseñanzas continúan iluminando mi camino.

**Galo Fernando Ortega Cabrera**

## Declaración Expresa

---

Nosotros, Galo Fernando Ortega Cabrera y Joubberth Rafael Gambarrotti Bermúdez acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de mayo del 2024.

  
Galo Fernando Ortega  
Cabrera

  
Joubberth Rafael  
Gambarrotti Bermúdez

## Declaración Expresa

---

Nosotros, Galo Fernando Ortega Cabrera y Joubberth Rafael Gambarrotti Bermúdez acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de mayo del 2024.

  
Galo Fernando Ortega  
Cabrera

  
Joubberth Rafael  
Gambarrotti Bermúdez

*Recibido  
Aurilia Santay  
23/05/2024*

## Evaluadores

---

**Boris Xavier Vintimilla Burgos, Ph.D.**

Profesor de la materia

---

**Daniel Erick Ochoa Donoso, Ph.D.**

Tutor de proyecto

## Resumen

En deportes de alto rendimiento como la halterofilia, la precisión y técnica son cruciales para el éxito. En este contexto, la tecnología se convierte en un aliado esencial, ofreciendo sistemas avanzados que capturan y analizan el movimiento para mejorar el rendimiento de los deportistas. Por consiguiente, se propone mejorar un sistema de análisis de movimiento previamente desarrollado en el Centro de Tecnologías de Información (CTI) de la ESPOL.

La implementación dividió el proyecto en dos módulos: primero, se sustituyó el traje de captura de movimiento por un prototipo que permite mayor movilidad; segundo, se reestructuró el software en el lenguaje C++ y Qt para disminuir el tiempo de procesamiento, incluyendo herramientas como OpenGL y Assimp para el renderizado y la animación en 3D del deportista.

Como resultados se obtuvo una reducción en los tiempos de procesamiento y una mejora en la visualización del movimiento, permitiendo un análisis más detallado y preciso. La nueva interfaz gráfica facilita la retroalimentación inmediata, crucial para el perfeccionamiento de la técnica y el rendimiento de los deportistas.

En conclusión, las mejoras implementadas en el sistema representan un avance significativo en la biomecánica deportiva, proporcionando una herramienta más precisa y eficiente para la evaluación del rendimiento deportivo. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en otros deportes y escenarios.

Palabras clave: captura de movimiento, animación en 3D, deporte de alto rendimiento, biomecánica deportiva

## **Abstract**

In high-performance sports like weightlifting, precision and technique are crucial for success. With this in mind, technology becomes an essential ally, offering advanced systems that capture and analyze movement to enhance athletes' performance. Therefore, it is proposed to improve a motion analysis system previously developed in Centro de Tecnologías de Información (CTI) at the ESPOL.

The implementation split the project into two modules: first, the motion capture suit was replaced with a prototype that allows greater mobility; second, the software was restructured in C++ and Qt to reduce processing time, including tools like OpenGL and Assimp for rendering and get a 3D animation of the athlete.

The results included a reduction in processing time and an improvement in motion visualization, enabling more detailed and accurate analysis. The new graphical interface facilitates immediate feedback, crucial for refining technique and enhancing athletes' performance.

In conclusion, the improvements implemented in the system represent a significant advancement in sports biomechanics, providing a more precise and efficient tool for evaluating athletic performance. This project lays the foundation for future research and applications in other sports and scenarios.

Keywords: motion capture, 3D animation, high-performance sport, sports biomechanics

## Índice general

Resumen .....	I
Abstract.....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas.....	V
Índice de figuras.....	VI
Índice de tablas.....	VII
Capítulo 1 .....	1
1. Introducción .....	2
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación del Problema .....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 <i>Objetivo General</i> .....	4
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	5
1.4 Marco Teórico.....	5
1.4.1 <i>Biomecánica</i> .....	5
1.4.2 <i>Aplicaciones de la Biomecánica en la Halterofilia</i> .....	5
1.4.3 <i>Captura de Movimiento Óptica (OMC)</i> .....	6
1.4.4 Terminología de los archivos de captura de movimiento .....	8
1.4.5 <i>Estructura del archivo BVH</i> .....	9
1.4.6 Procesamiento de datos de animación.....	14
1.4.7 <i>OptiTrack</i> .....	16
Capítulo 2 .....	17
2. Metodología .....	18
2.1 Módulo 1: Prototipado y optimización del sistema de adquisición de datos de movimiento .....	18
2.1.1 <i>Evaluación inicial del sistema</i> .....	18
2.1.2 <i>Prueba de detección del prototipo</i> .....	20
2.1.3 <i>Pruebas comparativas</i> .....	21
2.2 Módulo 2: Optimización y reestructuración del software para análisis de movimiento con visualización 3D .....	21
2.2.1 <i>Análisis de requerimientos</i> .....	22

2.2.1.1	Requerimientos Funcionales.....	22
2.2.1.2	Requerimientos no Funcionales.....	22
2.2.2	<i>Diseño de la interfaz de usuario</i> .....	22
2.2.3	<i>Implementación del software</i> .....	25
2.2.3.1	Renderizado 3D.....	25
2.2.4	<i>Predicción del error estimado</i> .....	25
2.2.4.1	Modelo de Kriging.....	26
2.2.4.2	Inicialización.....	26
2.3	Alcance y limitaciones de la solución.....	26
2.3.1	<i>Módulo 1</i> .....	26
2.3.2	<i>Módulo 2</i> .....	27
2.4	Riesgos y beneficios de la solución.....	27
2.4.1	<i>Módulo 1</i> .....	27
2.4.2	<i>Módulo 2</i> .....	28
Capítulo 3	.....	29
3.	Solución y resultados.....	30
3.1	Implementación de la solución.....	30
3.1.1	<i>Sprint 0 (20/05/2024 – 03/06/2024)</i> .....	30
3.1.2	<i>Sprint 1 (04/06/2024 – 01/07/2024)</i> .....	31
3.1.3	<i>Sprint 2 (03/07/2024 – 19/08/2024)</i> .....	33
3.1.4	<i>Finalización del proyecto (20/08/2024 – 26/08/2024)</i> .....	43
3.2	Pruebas.....	43
3.3	Resultados.....	44
3.4	Análisis de costos.....	47
3.4.1	<i>Costos de Software</i> .....	47
3.4.2	<i>Costos de Hardware y recursos</i> .....	47
3.4.3	<i>Costos de operación</i> .....	48
3.4.3	<i>Resumen de costos</i> .....	48
Capítulo 4	.....	50
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	51
4.1	Conclusiones.....	51
4.2	Recomendaciones.....	52
Referencias	.....	54

## **Abreviaturas**

3D	Tridimensional
BVH	Bounding Volume Hierarchy
CSV	Comma Separated Values
CTI	Centro de Tecnologías de Información
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
OMC	Optical Motion Capture

## Índice de figuras

Figura 1 Estructura jerárquica de una figura humana.....	9
Figura 2 Cuadros de animación de un archivo BVH.....	10
Figura 3 Ejemplo de un archivo BVH .....	13
Figura 4 Arreglo de cámaras infrarrojas OptiTrack en el CTI.....	19
Figura 5 Sesión de captura de prueba utilizando el arreglo de cámaras infrarrojas en el CTI ...	20
Figura 6 Diagrama de flujo del proyecto.....	21
Figura 7 Pantalla de Inicio de prototipo en Figma .....	23
Figura 8 Carga de archivo.....	23
Figura 9 Pantalla de espera .....	24
Figura 10 Pantalla de Visualización de datos.....	24
Figura 11 Ventana emergente para preguntar por nuevo análisis o comparación .....	25
Figura 12 Prototipo del traje .....	34
Figura 13 Pantalla de inicio al sistema .....	35
Figura 14 Pantalla de selección de opciones .....	35
Figura 15 Pantalla de selección de archivos a importar .....	36
Figura 16 Salida del proceso de limpieza del archivo CSV .....	36
Figura 17 Salida del proceso de cálculo de parámetros de desplazamiento, velocidad, aceleración y ángulos .....	37
Figura 18 Visualización del panel de marcadores .....	37
Figura 19 Visualización de gráfico lineal de coordenadas en el tiempo.....	39
Figura 20 Visualización de gráfico lineal de velocidad en el tiempo .....	39
Figura 21 Visualización de gráfico lineal de aceleración en el tiempo .....	39
Figura 22 Visualización de la animación durante el agarre de las pesas.....	40
Figura 23 Visualización de la animación durante el levantamiento de las pesas por encima de la cabeza .....	41
Figura 24 Pantalla de visualización de datos y animación.....	42
Figura 25 Sesión de captura de movimiento utilizando el prototipo de traje .....	43
Figura 26 Gráfico comparativo de tiempos de procesamiento de la animación entre la versión anterior y actual .....	45
Figura 27 Comparación entre animación en versión anterior y versión actual .....	46

## Índice de tablas

Tabla 1 Revisión de diferentes formatos de captura de movimiento .....	7
Tabla 2 Tiempos de procesamiento de la animación en versión anterior y actual.....	45
Tabla 3 Costos de hardware y recursos .....	47
Tabla 4 Estimación de horas de trabajo .....	48
Tabla 5 Cálculo del costo de implementación.....	48
Tabla 6 Resumen de costos .....	49

## Capítulo 1

## **1. Introducción**

En el ámbito de la halterofilia, la precisión y la técnica son elementos críticos que determinan el éxito y la prevención de lesiones en los deportistas. Cada fase del levantamiento, desde la postura inicial hasta la ejecución final, debe ser ejecutada con exactitud para optimizar el rendimiento y minimizar los riesgos de lesiones.

En este contexto, la tecnología se transforma en un aliado ineludible en el mundo competitivo en el que nos encontramos. Con la ayuda de sistemas avanzados que permiten la captura de movimiento, y proporcionar datos precisos que permiten el análisis durante los entrenamientos, podemos potenciar cada aspecto del rendimiento del deportista.

Del mismo modo que se espera con el deportista, nuestro proyecto busca potenciar un sistema desarrollado anteriormente en el CTI (Centro de Tecnologías de Información) de la ESPOLE [1]. Este sistema cumple con la tarea de captura y análisis de los movimientos. Sin embargo, se han identificado limitaciones en términos de precisión y eficiencia. Nuestro objetivo es optimizar este sistema, mediante la implementación de tecnologías alternativas que permitan una mejor adquisición de datos de los deportistas y reducir los tiempos de procesamiento.

### **1.1 Descripción del problema**

A partir de una investigación previa realizada por Alarcón y Cordero (2023) cuyo objetivo inicial fue calcular el error del sistema y proporcionar una versión alfa de un software para visualizar parámetros de movimientos en deportistas de halterofilia, se identificaron dos problemas principales en su fase inicial; la adquisición de datos obtenida y el costo computacional.

Primero, la adquisición de datos no es la adecuada debido a problemas con la indumentaria utilizada. Se presentan los casos en que el traje empleado en la primera fase limita la libertad de movimiento y no se ajusta a todos los biotipos de los deportistas de esta disciplina, lo que afecta negativamente en la precisión de la captura de movimiento. Esta falta de precisión para tales escenarios genera datos poco fiables, impidiendo una evaluación precisa. Para abordar este problema, se propone evaluar alternativas tecnológicas que permitan una mejor adquisición de datos en distintos escenarios.

Segundo, el programa está implementado en un lenguaje que no explota toda la capacidad de procesamiento de la CPU actual, esto resulta en tiempos de procesamiento elevados y posibles retrasos en el análisis de movimientos. Se propone mejorar y adaptar el software implementado a un lenguaje de programación que permita satisfacer estas necesidades. Estos cambios buscan reducir los tiempos de procesamiento y garantizar una captura de movimiento más eficiente, precisa y en tiempo real.

Estas mejoras son esenciales para lograr una visualización precisa y eficiente de los parámetros de movimiento, contribuyendo no solo a la eficiencia del sistema, sino al perfeccionamiento de la técnica y el rendimiento de los deportistas.

## **1.2 Justificación del Problema**

El sistema desarrollado previamente en el Centro de Tecnologías de Información (CTI) de la ESPOL, diseñado para la captura y análisis de movimientos en halterofilia, ha demostrado ser una herramienta valiosa. Sin embargo, se han identificado limitaciones significativas en términos de precisión y eficiencia. Estas limitaciones incluyen problemas con la indumentaria utilizada por los atletas, que restringen la libertad de movimiento y afectan la precisión de los datos capturados, así como una implementación en un lenguaje que no explota toda la

capacidad de procesamiento de la CPU, que resultan en tiempos de procesamiento elevados y retrasos en el análisis.

Es fundamental optimizar este sistema para superar las limitaciones actuales y potenciar su utilidad en el entrenamiento deportivo. La indumentaria adecuada es crucial para asegurar que los movimientos capturados reflejen con precisión las acciones de los atletas, lo que permitirá una evaluación más fiable y detallada. Además, mejorar el rendimiento del sistema y su interacción con la CPU reducirá los tiempos de procesamiento, permitiendo un análisis más rápido y eficiente, lo cual es esencial para proporcionar retroalimentación inmediata durante los entrenamientos.

Implementar estas mejoras tendrá un impacto significativo en el rendimiento de los deportistas. Un sistema más preciso y eficiente permitirá a los entrenadores y atletas identificar y corregir errores técnicos con mayor rapidez, optimizar la técnica de levantamiento y diseñar programas de entrenamiento más efectivos. En última instancia, estas mejoras tecnológicas promoverán la excelencia en la práctica deportiva, elevando el nivel competitivo de los atletas y contribuyendo a su éxito y bienestar a largo plazo.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo General***

Desarrollar un sistema que mejore el sistema previo de visualización de parámetros de deportistas de halterofilia, para aumentar la eficiencia y proporcionar una retroalimentación inmediata, mejorando el rendimiento deportivo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Desarrollar un sistema mejorado para el análisis y visualización de datos, mediante una plataforma visual con animación en 3D, proporcionando una respuesta rápida, eficiente y detallada a los entrenadores y deportistas.
2. Integrar soluciones de software que reduzcan el costo computacional y los tiempos de procesamiento en el análisis de datos y visualización de la animación.
3. Aumentar la precisión y minimizar los errores en la adquisición de datos asociados al uso del traje actual de OptiTrack, adaptando el traje manteniendo las partes esenciales de captura de datos.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 Biomecánica**

La biomecánica es una disciplina esencial que estudia la mecánica del cuerpo humano y su movimiento, aplicando principios de la física y la ingeniería para entender cómo funcionan las estructuras musculoesqueléticas y cómo se generan y transmiten las fuerzas durante la actividad física [1]. Esta disciplina utiliza principios de la mecánica clásica para analizar los movimientos del cuerpo humano. Incluyendo el estudio de las fuerzas internas y externas que actúan sobre el cuerpo, así como la cinemática y la cinética, que se centran en el movimiento y las fuerzas asociadas con el mismo, respectivamente. Estos principios permiten a los investigadores y entrenadores evaluar la eficiencia de los movimientos atléticos y diseñar programas de entrenamiento y rehabilitación más efectivos.

### **1.4.2 Aplicaciones de la Biomecánica en la Halterofilia**

En la halterofilia, la biomecánica es crucial para optimizar la técnica de levantamiento y reducir el riesgo de lesiones. Los estudios biomecánicos analizan la postura, los ángulos

articulares, la velocidad y la aceleración del movimiento, así como las fuerzas aplicadas durante los levantamientos. Esto ayuda a los atletas a perfeccionar su técnica, permitiendo levantamientos más eficientes y seguros. Además, la biomecánica proporciona información valiosa para ajustar la técnica en diferentes tipos de levantamientos y personalizar los programas de entrenamiento según las necesidades individuales del atleta [3].

### **1.4.3 Captura de Movimiento Óptica (OMC)**

La captura de movimiento óptica (OMC) es una tecnología avanzada utilizada para registrar y analizar los movimientos de sujetos en un espacio tridimensional. Esta tecnología se basa en el uso de cámaras de alta velocidad y precisión que rastrean marcadores reflectantes o emisores colocados en puntos específicos del cuerpo del sujeto [1]. El principal objetivo de OMC es obtener datos cinemáticos detallados que permitan un análisis exhaustivo del movimiento, crucial para aplicaciones en biomecánica, medicina, deportes y entretenimiento [2].

OMC opera mediante la colocación de múltiples cámaras alrededor de un espacio de captura, formando una red que cubre diferentes ángulos. Los marcadores, que pueden ser pasivos (reflectantes) o activos (emisores de luz), son rastreados por estas cámaras. Las imágenes capturadas por cada cámara son procesadas para identificar la posición tridimensional de cada marcador en el espacio. Este proceso se realiza a través de algoritmos de triangulación, que calculan las coordenadas espaciales basándose en la posición relativa de los marcadores en las imágenes [3].

En el campo de la captura de movimiento, existen varios formatos de archivo que se utilizan para almacenar los datos recolectados. Cada formato tiene sus propias características y ventajas dependiendo del tipo de análisis o visualización que se pretenda realizar. A continuación, en la Tabla 1 se proporciona un resumen de los formatos más comunes de captura de movimiento, destacando sus principales características:

**Tabla 1***Revisión de diferentes formatos de captura de movimiento*

<b>Formato</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones Comunes</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>BVH</b>	Formato jerárquico utilizado principalmente para animaciones esqueléticas. Contiene datos de posición y rotación para cada hueso.	Animación de personajes en 3D, biomecánica	Amplio soporte en software de animación, fácil de editar	Limitado en la orientación de huesos complejos
<b>C3D</b>	Formato estándar para almacenar datos de captura de movimiento 3D, incluyendo información cinemática, cinética y de fuerzas.	Biomecánica, análisis de marcha, investigación médica	Almacena una amplia gama de datos, muy detallado	Puede ser complejo de procesar debido a su tamaño
<b>ASF/AMC</b>	Formatos utilizados por Motion Analysis Corporation, donde ASF define la estructura del esqueleto y AMC contiene los datos de movimiento.	Simulación, análisis de movimiento en deportes	Separación clara entre estructura y movimiento	Requiere software específico para su interpretación
<b>FBX</b>	Formato desarrollado por Autodesk, utilizado para intercambiar datos entre aplicaciones 3D.	Animación en 3D, videojuegos, películas	Soporte extenso en software 3D, permite animación compleja	Archivo de gran tamaño, complejo en la edición

#### 1.4.4 Terminología de los archivos de captura de movimiento

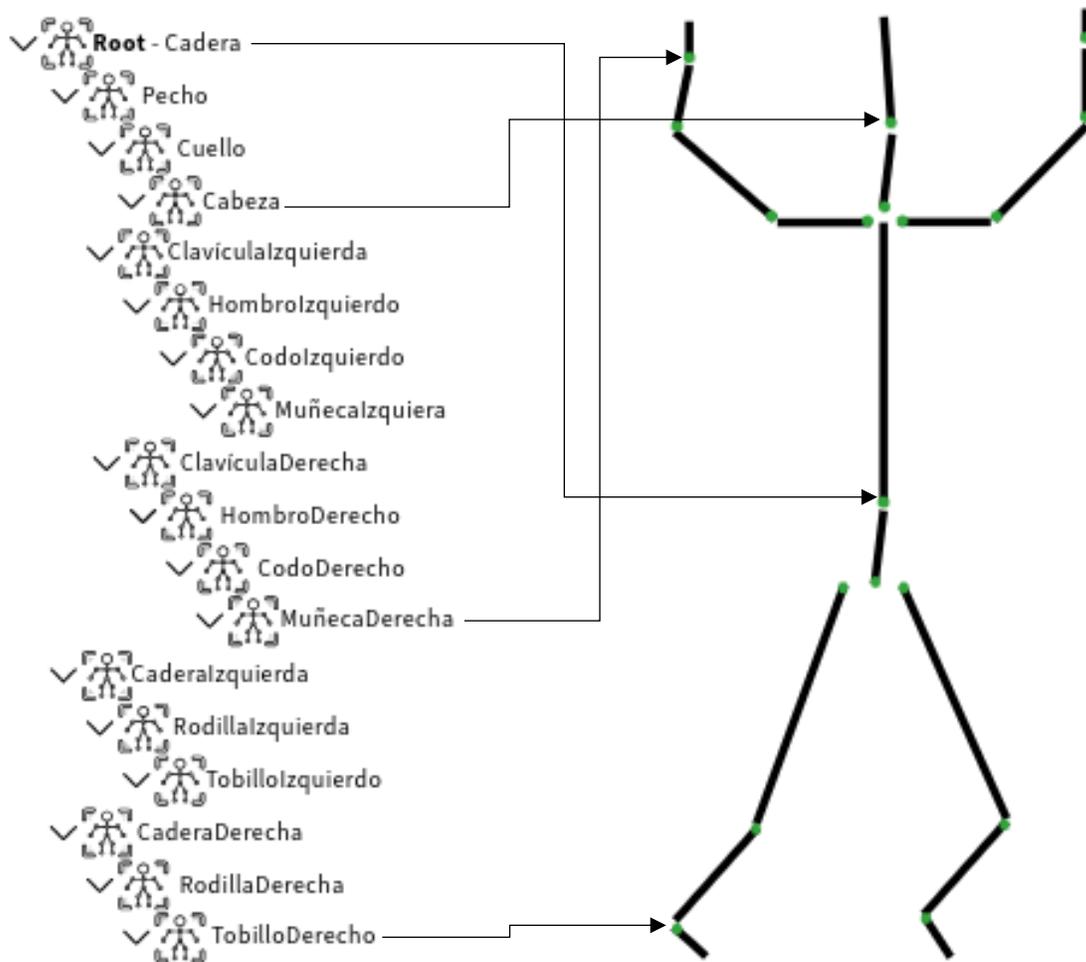
Esta sección proporciona una breve revisión de la terminología y estilo de notación que se utilizará para describir los procesos involucrados en la lectura y procesamiento de datos de captura de movimiento. La siguiente lista describe algunas de las palabras clave más importantes que se utilizarán para identificar y describir diferentes aspectos de un movimiento:

- **Esqueleto:** El personaje completo que el movimiento representa.
- **Hueso:** La entidad básica en la representación de un esqueleto. Cada hueso representa el segmento más pequeño dentro del movimiento que está sujeto a cambios individuales de traslación y orientación durante la animación. Un esqueleto está compuesto por varios huesos (generalmente en una estructura jerárquica, como se ilustra en la Figura 1), donde cada hueso puede estar asociado con una malla de vértices para representar una parte específica del personaje, por ejemplo, el fémur o el húmero.
- **Canal o Grado de Libertad (DOF):** Cada hueso dentro de un esqueleto puede estar sujeto a cambios de posición, orientación y escala a lo largo del curso de la animación, donde cada parámetro se refiere a un canal (o DOF). Los cambios en los datos del canal a lo largo del tiempo dan lugar a la animación.
- **Cuadro:** Cada animación está compuesta por varios cuadros donde se define la información del canal para cada hueso. Los datos de captura de movimiento pueden ser capturados hasta 240 cuadros por segundo, sin embargo, en muchas aplicaciones una tasa de 30 o 60 cuadros por segundo tiende a ser la norma. Se utilizan altas tasas de cuadros para capturar movimientos que contienen contenido de alta frecuencia. Aunque en muchos casos el detalle extra no puede ser mostrado durante una reproducción en tiempo real debido a las tasas máximas de actualización del hardware de visualización,

puede proporcionar información útil para agregar desenfoque de movimiento a la animación o simplemente para el análisis del movimiento.

**Figura 1**

*Estructura jerárquica de una figura humana*



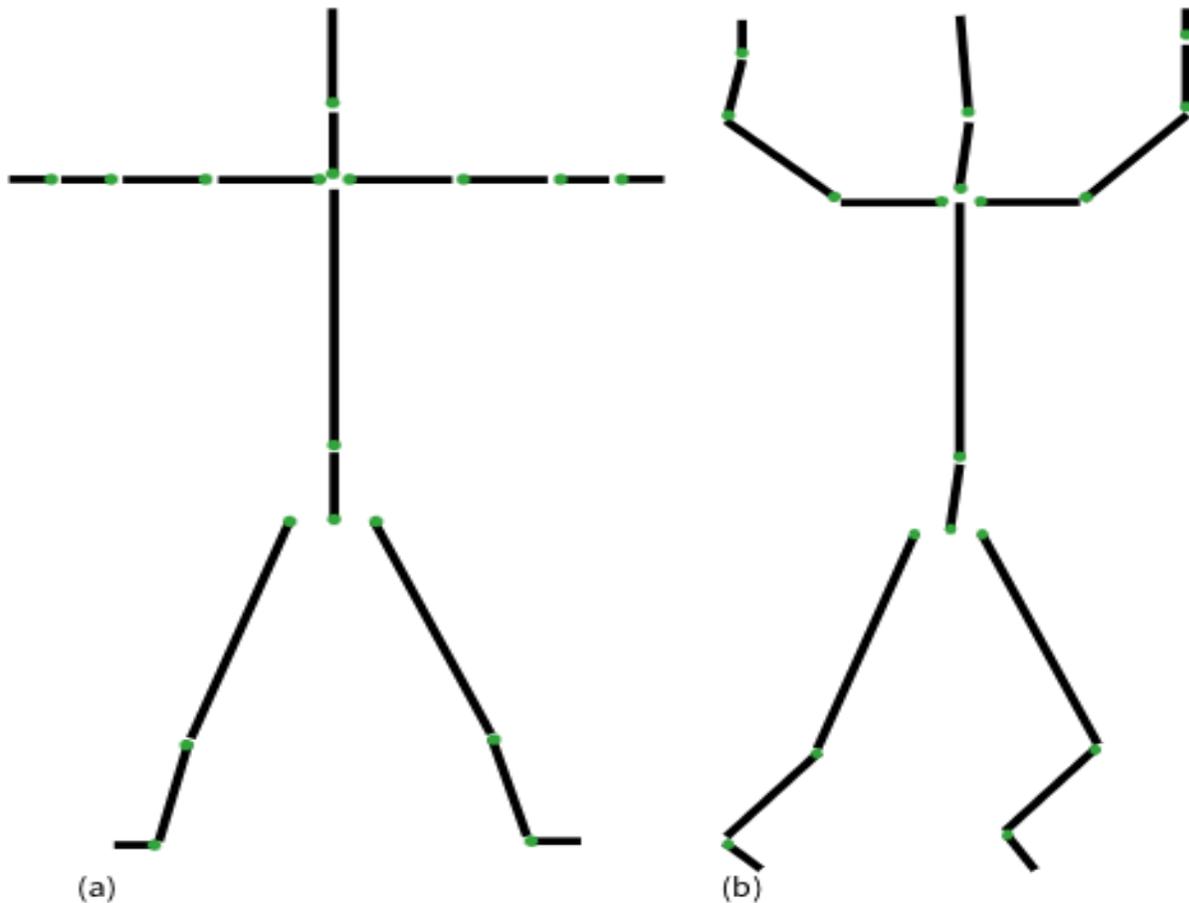
#### **1.4.5 Estructura del archivo BVH**

El archivo BVH consta de dos partes donde la primera sección detalla la jerarquía y la pose inicial del esqueleto y la segunda sección describe los datos del canal para cada cuadro, y, por lo tanto, la sección de movimiento [5]. Las ilustraciones de la posición base y el primer

cuadro de una animación se dan en la Figura 2. El archivo BVH de ejemplo en la Figura 3 se utilizará para discutir más a fondo el formato del archivo BVH en el resto de esta sección.

## Figura 2

*Cuadros de animación de un archivo BVH*



*Nota.* (a) posición inicial; (b) primer cuadro de la animación.

La sección jerárquica del archivo comienza con la palabra clave HIERARCHY, que es seguida en la siguiente línea por la palabra clave ROOT y el nombre del hueso que es la raíz de la jerarquía esquelética. La palabra clave ROOT indica el inicio de una nueva estructura jerárquica esquelética y aunque el archivo BVH es capaz de contener muchos esqueletos, es habitual tener solo un único esqueleto definido por archivo.

La estructura restante del esqueleto se define en una estructura recursiva donde la definición de cada hueso, incluyendo a sus hijos, está encapsulada en llaves, las cuales se delimitan en la línea anterior con la palabra clave JOINT (o ROOT en el caso del hueso raíz) seguida del nombre del hueso [5].

Dentro de la definición de cada hueso, la primera línea, delimitada por la palabra clave OFFSET, detalla la traslación del origen del hueso con respecto al origen de su hueso padre (o globalmente en el caso del hueso raíz) a lo largo de los ejes x, y, y z respectivamente. El desplazamiento sirve para definir implícitamente la longitud y dirección del hueso del padre, sin embargo, el problema con esto es definir la longitud y dirección de un hueso que tiene múltiples hijos. Normalmente una buena opción para determinar la longitud del hueso en esta situación es usar la definición de desplazamiento del primer hijo para inferir la información del hueso padre y tratar los datos de desplazamiento para otros nodos hijo simplemente como valores de desplazamiento.

La segunda línea de la definición del hueso está precedida por la palabra clave CHANNELS, que define los DOF del hueso actual. La importancia del orden en el que se presentan los canales es doble. Primero, el orden en el que se ven los canales en la sección jerárquica del archivo coincide exactamente con el orden de los datos en la sección de movimiento del archivo. Por ejemplo, la sección de movimiento del archivo contiene información para los canales del hueso raíz en el orden definido en la jerarquía, seguida por los datos del canal para su primer hijo, seguidos por los datos del canal para ese hijo y así sucesivamente a través de la jerarquía. El segundo punto por tener en cuenta con respecto al orden del canal es que la concatenación del orden de los ángulos de *Euler* al crear las matrices de rotación del hueso necesita seguir el orden descrito en la sección de CHANNEL. Es importante notar esto porque el orden de *Euler* es especificado para cada hueso, por lo tanto, es posible tener diferentes órdenes para diferentes huesos, lo que debe ser tenido en cuenta para obtener una

animación de aspecto correcto. La figura 3 ilustra un segmento de un archivo BVH en el que los canales de rotación se especifican de manera diferente para diferentes articulaciones.

Después de las líneas OFFSET y CHANNEL, las siguientes líneas no anidadas en la definición del hueso se utilizan para definir elementos hijo, comenzando con la palabra clave JOINT, sin embargo, en el caso de efectores finales, se utiliza una etiqueta especial llamada *End Site*, que encapsula un triple de OFFSET que se utiliza para inferir la longitud y orientación del hueso.

### Figura 3

Ejemplo de un archivo BVH

```
1 HIERARCHY
2 ROOT hip
3 {
4   OFFSET 0 0 0
5   CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Zrotation Yrotation Xrotation
6   JOINT abdomen
7   {
8     OFFSET 0 20.6881 -0.73152
9     CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
10    JOINT chest
11    {
12      OFFSET 0 11.7043 -0.48768
13      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
14      JOINT neck
15      {
16        OFFSET 0 22.1894 -2.19456
17        CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
18        JOINT head
19        {
20          OFFSET -0.24384 7.07133 1.2192
21          CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
22          JOINT leftEye
23          {
24            OFFSET 4.14528 8.04674 8.04672
25            CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
26            End Site
27            {
28              OFFSET 1 0 0
29            }
30          }
31          JOINT rightEye
32          {
33            OFFSET -3.6576 8.04674 8.04672
34            CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
35            End Site
36            {
37              OFFSET 1 0 0
38            }
39          }
40        }
41      }
42    }
43  }
```

Una vez definida la jerarquía esquelética, la segunda sección de un archivo BVH, que se denota con la palabra clave MOTION, contiene el número de cuadros en la animación, la tasa de cuadros y los datos del canal. La línea que contiene el número de cuadros comienza con la palabra clave “Frames”: que es seguida por un número entero positivo (a diferencia del sistema hexadecimal u octadecimal) que es el número de cuadros. La tasa de cuadros está en una línea que comienza con “Frame Time:”, la cual es seguida por un número decimal positivo que representa la duración de un solo cuadro. Para convertir esto en un formato de cuadros por segundo simplemente se necesita dividir 1 por el tiempo de cuadro. Una vez que se han definido el número de cuadros y el tiempo de cuadro, el resto del archivo contiene datos del canal para cada hueso en el orden en que fueron vistos en la sección jerárquica de la definición del hueso, donde cada línea de valores de punto flotante representa un cuadro de animación.

#### **1.4.6 Procesamiento de datos de animación**

Lo primero que debe hacerse para mostrar el movimiento es determinar la transformación local de cada hueso. Dado que los formatos BVH no contienen información de escala, solo necesitamos considerar las matrices de rotación y traslación para construir la transformación local. La construcción de la matriz de rotación,  $R$ , se puede hacer fácilmente multiplicando las matrices de rotación para cada uno de los ejes de canal diferentes en el orden en que aparecieron en la sección jerárquica del archivo. Por ejemplo, considera la siguiente descripción de canal para un hueso:

*CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation*

Esto significaría que la matriz de rotación compuesta,  $R$ , se calcula como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$R = R_Z R_X R_Y$$

Una vez que se calcula la matriz de rotación compuesta, utilizando un sistema de coordenadas homogéneo, los componentes de traslación son simplemente las primeras 3 celdas de la cuarta columna (mientras que los componentes de rotación ocupan las 3x3 celdas superiores izquierdas), como se ilustra en la ecuación:

$$M = \begin{bmatrix} R & R & R & T_X \\ R & R & R & T_X \\ R & R & R & T_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Usando la ecuación  $M = \prod_{i=0}^n M_{local}^i$  y las derivaciones de las transformaciones locales, se pueden calcular las posiciones globales para el origen de cada hueso y desde el origen se dibuja el hueso utilizando la información de desplazamiento en la sección jerárquica del archivo. La ecuación a continuación ejemplifica este proceso para el *Neck* en la Figura 3, donde  $v_0'$  y  $v_1'$  son los puntos finales del hueso cuya orientación local se da por  $v$  y  $M$ ; son las transformaciones locales de los huesos involucrados en la cadena jerárquica. El vector en el lado derecho de la primera expresión en la ecuación,  $[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ , representa el origen local del *Neck*, que se transforma en su posición global mediante la ecuación.

$$V_0' = M_{Hips}M_{Abdomen}M_{Chest}M_{Neck}[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

$$V_1' = M_{Hips}M_{Abdomen}M_{Chest}M_{Neck}V$$

Hay varios problemas inherentes en el formato de archivo BVH. El más notable es el hecho de que no hay una orientación explícita del hueso. Aunque las longitudes de los huesos se pueden inferir a partir de huesos hijos, el problema surge con múltiples hijos, como se discutió anteriormente: ¿qué hijo usar para inferir la longitud del hueso padre? Además, también es deseable tener el hueso a lo largo de un solo eje y una matriz de rotación para orientarlo en su posición base por razones que se discutirán más adelante. Otros problemas con los archivos BVH incluyen la falta de unidades de calibración, como la escala en la que se

miden los desplazamientos de las articulaciones, y detalles sobre el entorno, como la orientación, es decir, ¿qué dirección apunta hacia arriba?

#### **1.4.7 OptiTrack**

OptiTrack es un sistema de captura de movimiento que ha ganado popularidad en diversas aplicaciones biomecánicas. La tecnología de OptiTrack se basa en la estereofotogrametría, que permite obtener coordenadas tridimensionales de puntos en un objeto a partir de imágenes fotográficas tomadas desde diferentes posiciones [4]. Esto se logra mediante el uso de cámaras, marcadores reflectantes y software de procesamiento avanzado. OptiTrack ha sido utilizado en estudios de biomecánica para analizar movimientos humanos con alta precisión, contribuyendo significativamente a la investigación en ciencias del deporte y rehabilitación.

## Capítulo 2

## **2. Metodología**

Para el diseño y elaboración del proyecto se planteó dividir el proyecto en dos principales módulos:

1. Prototipado y optimización del sistema de adquisición de datos de movimiento
2. Optimización y reestructuración del software para análisis de movimiento con visualización 3D.

### **2.1 Módulo 1: Prototipado y optimización del sistema de adquisición de datos de movimiento**

Con el objetivo de mejorar la funcionalidad y precisión en la adquisición de datos, se decidió sustituir el traje de neopreno por un sistema de marcadores que se adhieren directamente al cuerpo, junto con calibraciones específicas. Para lograr esto, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

#### ***2.1.1 Evaluación inicial del sistema***

El sistema de captura de movimiento utilizado en este proyecto consiste en un arreglo de cámaras infrarrojas OptiTrack ubicado en el Centro de Tecnologías de la Información (CTI). Este sistema cuenta con 21 cámaras, dispuestas en formación circular para maximizar la cobertura y precisión de la captura (véase Figura 4).

## Figura 4

Arreglo de cámaras infrarrojas OptiTrack en el CTI



*Nota:* En la figura se puede observar la disposición circular de las cámaras infrarrojas hacia el centro del espacio.

Para evaluar el funcionamiento y conocer los procesos necesarios para realizar las sesiones de captura de movimiento, se llevaron a cabo las siguientes acciones utilizando los sistemas OptiTrack y Motive:

- **Calibración:** La calibración es fundamental para conocer la precisión e incertidumbre del sistema para asegurar mediciones confiables y obtener resultados precisos y consistentes. La calibración del sistema de captura de movimiento óptico (OMC) se realiza manualmente utilizando una varilla de calibración OptiTrack CWM-250.
- **Definir punto central:** Se definió el punto central del área de captura. Esta configuración nos asegura que todas las cámaras estén sincronizadas y alineadas correctamente para una captura precisa.

- **Sesión de captura de prueba:** Se llevó a cabo una sesión de captura de movimiento en el CTI utilizando un traje de neoprene equipado con marcadores reflectantes como se muestra en Figura 5. Esta sesión tuvo como objetivo comprobar la funcionalidad y precisión del sistema de captura.

### Figura 5

*Sesión de captura de prueba utilizando el arreglo de cámaras infrarrojas en el CTI*



#### **2.1.2 Prueba de detección del prototipo**

Se realizó una sesión de captura utilizando el prototipo para asegurar que las cámaras detecten correctamente los marcadores. Esto nos permite verificar la funcionalidad y precisión del sistema de captura de movimiento tras cualquier ajuste o modificación.

### 2.1.3 Pruebas comparativas

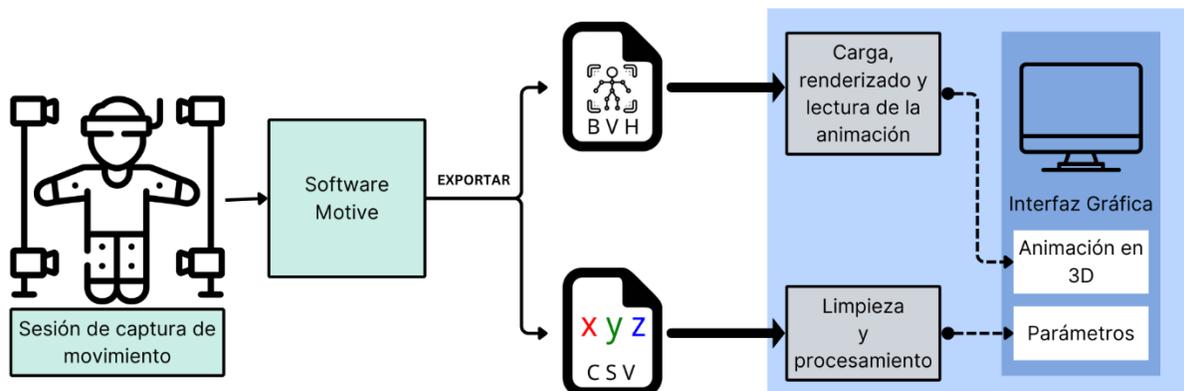
Se realizarán sesiones de captura de movimiento utilizando el prototipo, comparando los datos obtenidos con los registrados en la primera etapa del proyecto. Estas pruebas son esenciales para evaluar las mejoras y asegurar la consistencia y precisión del sistema después de las modificaciones.

## 2.2 Módulo 2: Optimización y reestructuración del software para análisis de movimiento con visualización 3D

Diseñar y desarrollar un software más rápido y con mejor visualización que el utilizado en el proyecto anterior. Este software debe ser capaz de procesar y analizar los datos capturados desde el software Motive, proporcionando una interfaz intuitiva y accesible tanto para entrenadores como para deportistas. Para una visualización de este proceso, véase Figura 6.

**Figura 6**

*Diagrama de flujo del proyecto*



*Nota.* La figura muestra la secuencia de pasos, comenzando por la captura de movimiento, luego el uso de Motive para exportar los archivos para el software a desarrollar en este módulo, dentro se procesan y visualizan los resultados en una interfaz gráfica.

### **2.2.1 Análisis de requerimientos**

Evaluación de las necesidades específicas del cliente y los usuarios finales (entrenadores y deportistas) para definir las funcionalidades y características del software.

#### **2.2.1.1 Requerimientos Funcionales.**

- El sistema debe cargar, filtrar y procesar archivos CSV provenientes del software Motive.
- El sistema debe calcular parámetros de movimiento de los deportistas, tales como ángulos de articulaciones, desplazamientos, velocidades y aceleraciones.
- El sistema debe mostrar los movimientos de los deportistas y los parámetros de movimiento en un entorno 3D interactivo.

#### **2.2.1.2 Requerimientos no Funcionales.**

- El sistema debe ser fácil de usar por parte de los deportistas y sus entrenadores.
- El sistema debe ser eficiente en términos de procesamiento y visualización de los datos para permitir un análisis rápido y preciso.
- El sistema debe ser compatible con diferentes plataformas y dispositivos utilizados por los usuarios.

### **2.2.2 Diseño de la interfaz de usuario**

En esta etapa se desarrolló un prototipo de baja fidelidad para la interfaz de usuario usando la herramienta *Figma*. El objetivo fue crear una nueva interfaz intuitiva que permita el fácil acceso a los datos capturados y su análisis (véase Figuras 7-11).

El flujo de ventanas que se planteó inicia con un mensaje de bienvenida que dirige al usuario a importar un archivo de captura. Una vez elegido el archivo se muestra un mensaje de confirmación y posteriormente se visualiza el panel principal de la aplicación. En este panel el usuario puede interactuar con el sistema de la siguiente forma; seleccionar un marcador, definir un rango de tiempo, elegir una articulación como pivote o importar un nuevo archivo para realizar un nuevo análisis o un análisis comparativo.

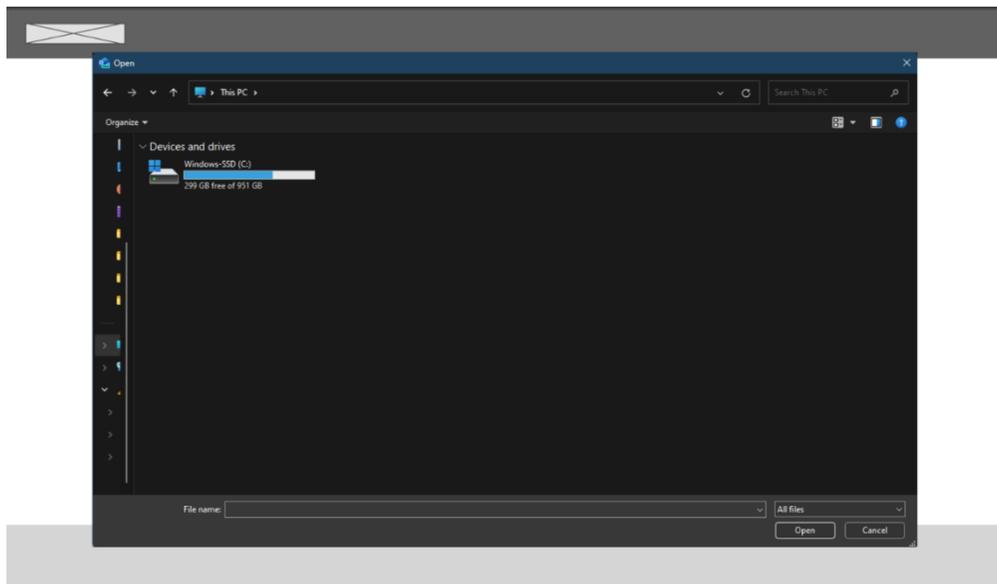
## Figura 7

*Pantalla de Inicio de prototipo en Figma*



## Figura 8

*Carga de archivo*



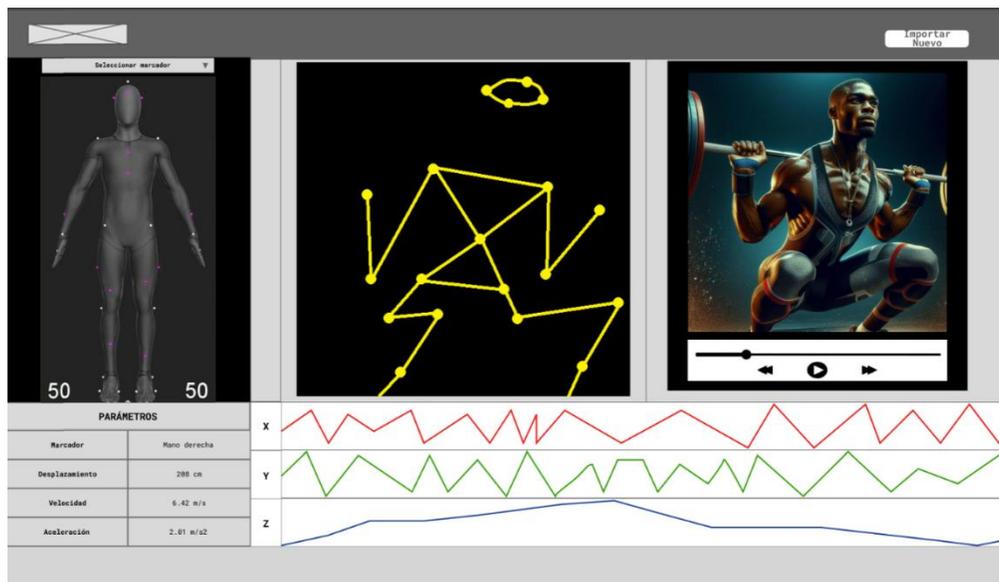
**Figura 9**

*Pantalla de espera*



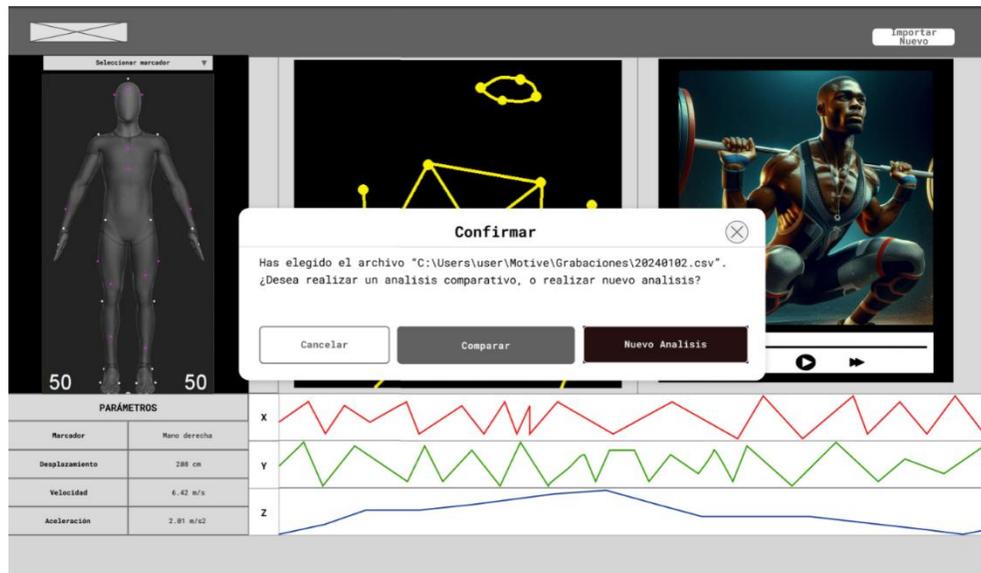
**Figura 10**

*Pantalla de Visualización de datos*



**Figura 11**

*Ventana emergente para preguntar por nuevo análisis o comparación*



### **2.2.3 Implementación del software**

Como herramienta de desarrollo se eligió el lenguaje C++ debido a su flexibilidad en el control que le ofrece al programador con respecto al manejo de memoria. Se implementará un sistema robusto multiplataforma utilizando el entorno de trabajo Qt, esta herramienta ofrece un conjunto completo de aplicativos para diseñar interfaces gráficas de usuario.

**2.2.3.1 Renderizado 3D.** Uno de los principales objetivos del sistema será el de leer el archivo BVH exportado desde Motive para generar la animación 3D del esqueleto. Para lograr este objetivo se proponen las siguientes herramientas:

- **OpenGL:** para renderizar gráficos en aplicaciones de C++.
- **Assimp:** para la lectura e interpretación del archivo BVH.

### **2.2.4 Predicción del error estimado**

Se utilizará el modelo de Kriging.

**2.2.4.1 Modelo de Kriging.** El modelo de Kriging es una técnica de interpolación espacial utilizada en geoestadística y otras disciplinas para hacer predicciones de valores en puntos no muestreados basándose en valores conocidos. Este método se basa en el principio de que las variables espaciales están correlacionadas espacialmente, es decir, los valores en puntos cercanos tienden a ser más similares que los valores en puntos más distantes.

**2.2.4.2 Inicialización.** Para el cálculo del error estimado, se usará el variograma obtenido en la investigación de Alarcón y Cordero (2023).

## **2.3 Alcance y limitaciones de la solución**

### **2.3.1 Módulo 1**

#### **Alcance:**

- Los marcadores adheridos a bandas ajustables facilitan el análisis de la biomecánica al permitir una captura precisa de los movimientos del deportista sin restringir su libertad de movimiento.
- Esta solución ofrece versatilidad en términos de aplicaciones, es decir que con la calibración adecuada puede adaptarse a otras disciplinas.

#### **Limitaciones:**

- La colocación de algunas de las bandas ajustables puede ser un proceso que requiere tiempo y la asistencia de un ayudante para asegurar que estén colocadas correctamente sobre el deportista.

### **2.3.2 Módulo 2**

#### **Alcance:**

- El programa calculará los parámetros de movimiento de los atletas, tales como ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones.
- Se visualizarán los movimientos de los atletas y los parámetros de movimiento en un entorno 3D.

#### **Limitaciones:**

- No se mostrará los parámetros del atleta en tiempo real mientras realiza el movimiento.

## **2.4 Riesgos y beneficios de la solución**

### **2.4.1 Módulo 1**

#### **Riesgos:**

- Existe la probabilidad al realizar movimientos intensos, en que los marcadores adheridos a las bandas ajustables puedan desprenderse, lo cual podría afectar la adquisición precisa de datos durante las sesiones de captura de movimiento.

#### **Beneficios:**

- La utilización de marcadores adheridos a bandas ajustables ofrece mayor precisión en la adquisición de datos de captura, gracias a la libertad de movimiento que proporciona al deportista.

### 2.4.2 Módulo 2

#### Riesgos:

- **Problemas de Integración:** Dificultades en la integración con el hardware y software existente, lo que podría afectar la funcionalidad general del sistema.
- **Errores de Software:** Posibles errores y bugs que podrían surgir durante el desarrollo e implementación, afectando la precisión y eficiencia del sistema.

#### Beneficios:

- **Mejora del Rendimiento:** Reducción significativa de los tiempos de procesamiento y una mayor eficiencia en el análisis de datos.
- **Mejor Visualización:** Representación clara y detallada de los datos, facilitando el análisis y la toma de decisiones informadas.
- **Facilidad de Uso:** Interfaz de usuario intuitiva que mejora la accesibilidad y usabilidad del sistema para entrenadores y deportistas.

## Capítulo 3

### **3. Solución y resultados**

#### **3.1 Implementación de la solución.**

Para una elaboración del proyecto organizada se realizó un diagrama de Gantt a partir del cronograma de actividades, se tomó como fecha de inicio del proyecto el 20 de mayo del 2024 con fecha de finalización el 25 de agosto del 2024, con un total de 14 semanas. La estructura del diagrama de Gantt se desglosa en las siguientes tareas:

##### **3.1.1 Sprint 0 (20/05/2024 – 03/06/2024)**

- **Introducción al proyecto**

Se realizaron reuniones virtuales y presenciales con el tutor y cliente, brindando una introducción general del proyecto, donde se visualizó lo obtenido en la primera fase y se definió los objetivos a obtener en la fase actual.

- **Elaboración del capítulo 1: Introducción**

Se trabajó en la redacción del primer capítulo del proyecto, que incluyó la descripción del proyecto, el problema identificado, la justificación y el marco teórico.

- **Investigación y estado del arte**

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el problema a abordar, incluyendo tecnologías y metodologías existentes.

- **Revisión de documentación de la primera fase**

Se revisó la documentación y se mantuvieron reuniones con los encargados en la primera fase del proyecto.

- **Definición del problema, alcance y objetivos**

Se definió el problema que el proyecto busca resolver, y se establecieron los objetivos generales y específicos del proyecto, así como el alcance de la solución propuesta.

- **Entrega de declaración expresa**

Se elaboró y entregó un documento formal que expresa las intenciones y expectativas del proyecto.

- **Planificación de la resolución del problema**

Se desarrolló un plan detallado para abordar el problema identificado, incluyendo la división del problema en dos módulos, la definición y asignación de responsabilidades a cada integrante.

### **3.1.2 Sprint 1 (04/06/2024 – 01/07/2024)**

- **Elaboración del capítulo 2: Metodología**

Se redactó el segundo capítulo, centrado en la metodología del proyecto, incluyendo la planificación, técnicas, herramientas a utilizar, y gestionando los riesgos y limitaciones que podrían surgir durante la implementación del proyecto.

- **Capacitación para el uso del equipo en el CTI y calibración del software Motive**

El equipo recibió formación específica para el uso del equipo y software Motive en el Centro de Tecnología e Innovación (CTI). Luego se realizaron pruebas y calibraciones del software Motive para garantizar su correcto funcionamiento durante las sesiones de captura.

- **Reunión con el cliente: Requerimientos**

Se llevó a cabo una reunión para presentar los avances y formalizar el documento de los requerimientos funcionales y no funcionales del proyecto, según las necesidades del cliente

- **Revisión de código de la versión anterior**

Se realizó una reunión con uno de los integrantes de la versión anterior del proyecto, donde se revisó el código desarrollado en esa versión, buscando mejoras y optimizaciones.

- **Preparación del entorno de desarrollo con Qt**

Se configuró y preparó el entorno de desarrollo utilizando Qt en las computadoras de los miembros del equipo, en Windows y Linux, asegurando la compatibilidad y funcionalidad necesarias.

- **Reunión con tutor: definición de herramientas**

En conjunto con el tutor, se mostraron y definieron las herramientas que se utilizaron para resolver el problema planteado.

- **Reunión con el cliente: Bocetos y flujo de ventanas**

Se diseñaron los bocetos y el flujo de navegación de las ventanas de la aplicación y se presentaron al cliente para su aprobación.

### **3.1.3 Sprint 2 (03/07/2024 – 19/08/2024)**

- **Elaboración del capítulo 3 y 4:**

Se comenzó la redacción de los capítulos 3 y 4, que abarcan el desarrollo del proyecto, con la implementación de soluciones, las pruebas realizadas, resultados obtenidos y análisis de costos.

- **Creación del repositorio y levantamiento del proyecto**

Se creó el repositorio del proyecto y se iniciaron las primeras actividades de desarrollo.

- **División de la implementación en módulos y submódulos**

Se organizó el desarrollo en los módulos definidos:

- Módulo 1 (M1): Prototipo de traje.
- Módulo 2 (M2): Implementación del Software.
  - Submódulo 1 (s1): Implementación de interfaz gráfica y procesamiento del archivo CSV.
  - Submódulo 2 (s2): Visualización de la animación obtenida del archivo BVH.

- **Sesiones de captura de prueba con traje OptiTrack**

Se realizaron sesiones de captura de movimiento con el traje del sistema OptiTrack, obteniendo archivos CSV y BVH para su uso en pruebas del software.

- **Implementación M1: Diseño y elaboración del prototipo de traje**

Se diseñó y elaboró un prototipo del traje, cumpliendo con los requerimientos establecidos (véase Figura 12).

## Figura 12

*Prototipo del traje*



- **Implementación M2s1:**
  - **Interfaz gráfica:** Se desarrolló la interfaz gráfica de las pantallas de inicio, y la pantalla de visualización de datos (véase Figuras 13-15).

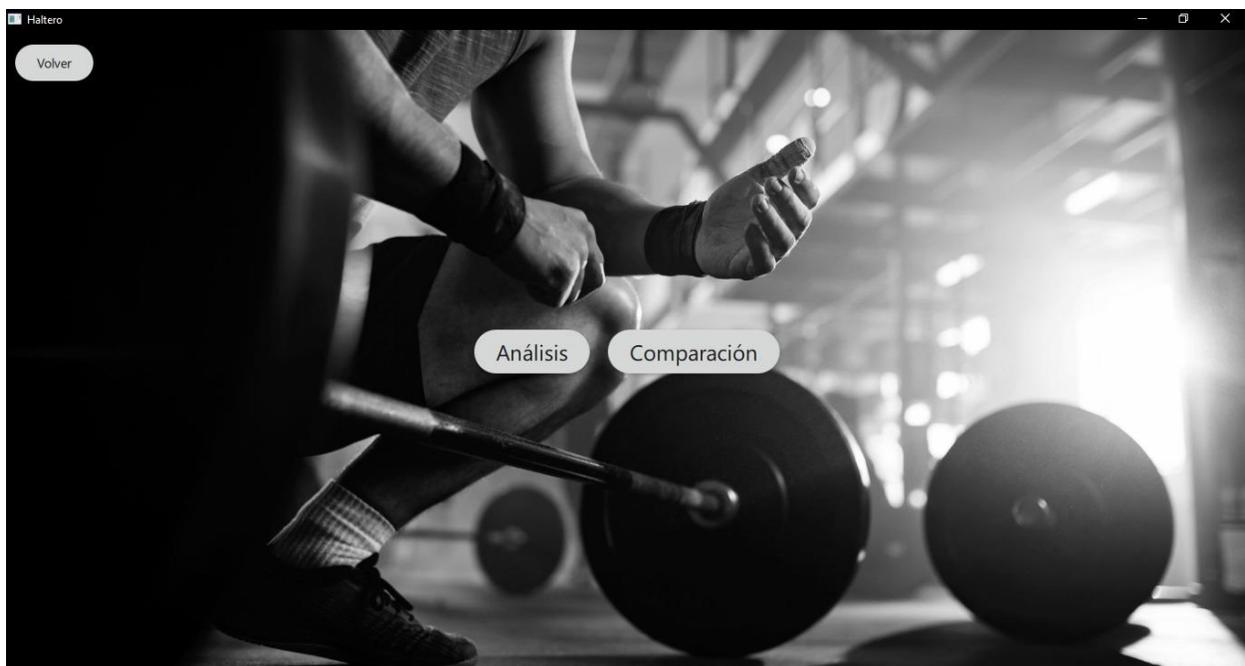
**Figura 13**

*Pantalla de inicio al sistema*



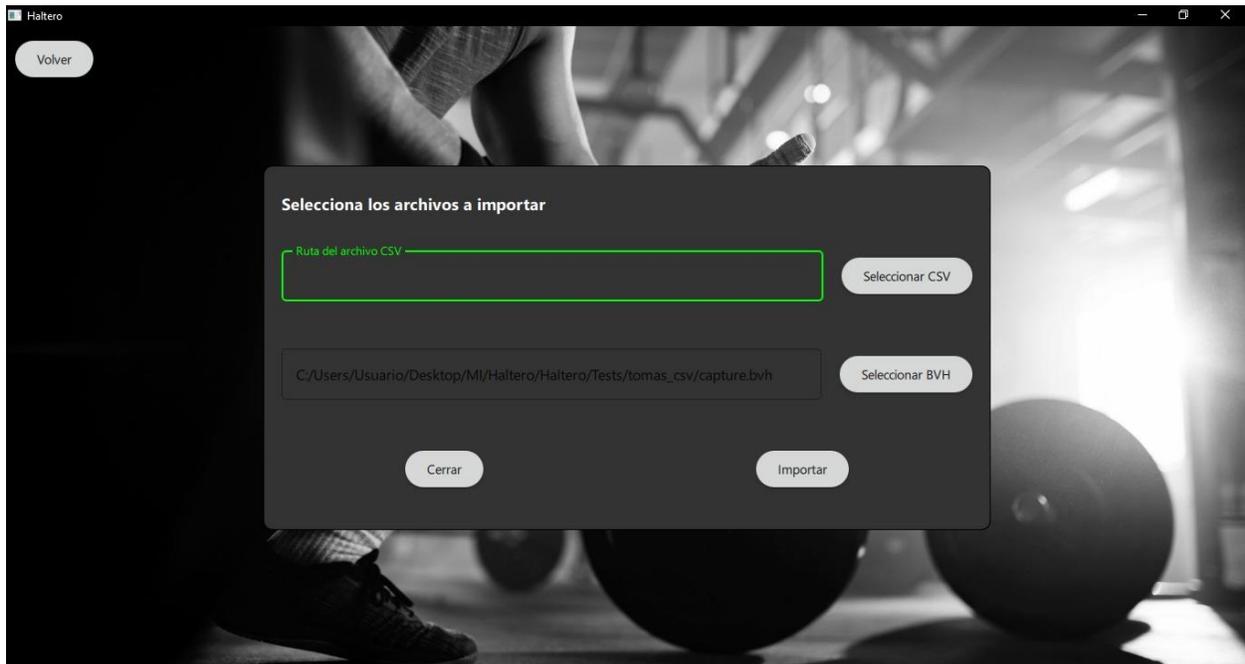
**Figura 14**

*Pantalla de selección de opciones*



## Figura 15

*Pantalla de selección de archivos a importar*



- **Procesamiento de CSV:** Se implementó la funcionalidad para el procesamiento de archivos CSV, con la limpieza del archivo CSV, y la obtención de datos a partir de cálculos realizados dentro de la aplicación como se ve representado en las Figuras 16 y 17 respectivamente.

## Figura 16

*Salida del proceso de limpieza del archivo CSV*

```
qml: CSV file selected: C:/Users/Usuario/Desktop/MI/Haltero/Haltero/Tests/tomas_csv/Take 2024-07-12 07.10.39 AM.csv  
qml: Loaded screen: Dashboard.ui.qml  
Tamaño del CSV: 1201  
Tiempo transcurrido en procesamiento CSV: 0.048 segundos
```

*Nota.* La figura muestra el nombre del archivo recibido, el tamaño del CSV siendo la cantidad de fotogramas y el tiempo transcurrido durante la limpieza.

## Figura 17

*Salida del proceso de cálculo de parámetros de desplazamiento, velocidad, aceleración y ángulos*

```
Regresando coordenadas X: 0.0922629 , Y: 1.70848 , Z: 0.0845372 , en tiempo 0
Regresando coordenadas X: 0.0568306 , Y: 1.63241 , Z: 0.215524 , en tiempo 7
Desplazamiento: 0.156 Velocidad: 0.022 Aceleracion: 0.0031747
qml: Parametros recibidos: 0.156 0.022 0.003174698223749458
Regresando coordenadas X: -0.231165 , Y: 1.25018 , Z: 0.454822 , en tiempo 0
Regresando coordenadas X: -0.0436766 , Y: 1.47819 , Z: 0.482829 , en tiempo 0
Regresando coordenadas X: -0.244872 , Y: 0.932152 , Z: 0.364264 , en tiempo 0
Regresando coordenadas X: -0.283474 , Y: 1.07676 , Z: 0.286608 , en tiempo 7
Regresando coordenadas X: -0.106078 , Y: 1.26048 , Z: 0.315082 , en tiempo 7
Regresando coordenadas X: -0.182131 , Y: 1.24159 , Z: 0.106967 , en tiempo 7
ángulo inicial: 142.275 en tiempo: "00:00:00"
ángulo final: 50.5109 en tiempo: "00:07:00"
qml: Angulos recibidos: 142.27495020948368 50.51092451497046
```

*Nota.* La figura muestra las coordenadas las salidas obtenidas con las coordenadas de un marcador entre dos tiempos, obteniendo los parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración, luego recibe las coordenadas de tres marcadores obteniendo los ángulos en tiempo inicial y tiempo final.

- **Panel de marcadores:** Se desarrolló el panel de selección de marcadores en la interfaz gráfica, permitiendo la obtención y visualización de los parámetros para el marcador seleccionado como se observa en la Figura 18.

## Figura 18

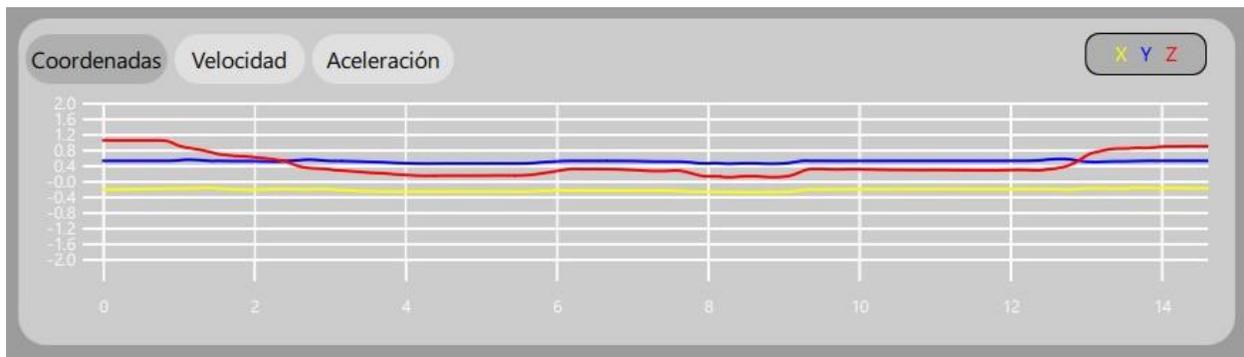
*Visualización del panel de marcadores*



- **Panel de gráficos lineales:** Se añadió la funcionalidad para visualizar gráficos lineales dentro de la interfaz gráfica como se ilustra en las Figuras 19-21.

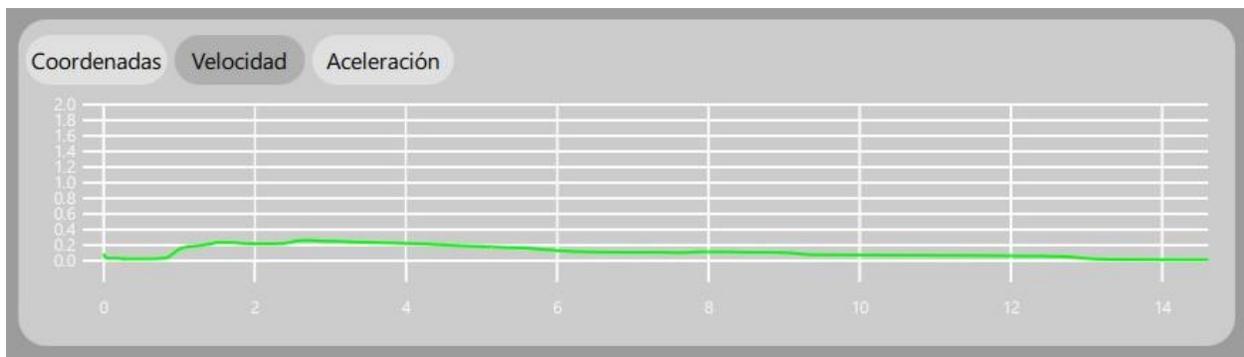
**Figura 19**

Visualización de gráfico lineal de coordenadas en el tiempo



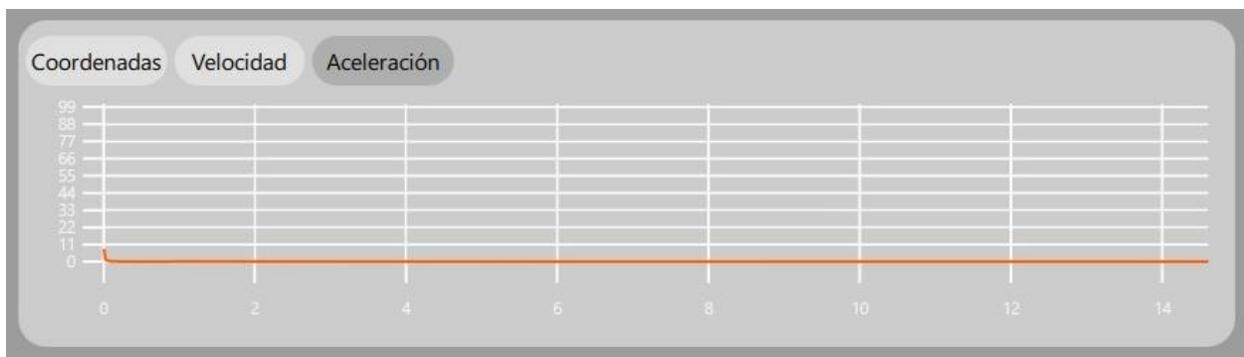
**Figura 20**

Visualización de gráfico lineal de velocidad en el tiempo



**Figura 21**

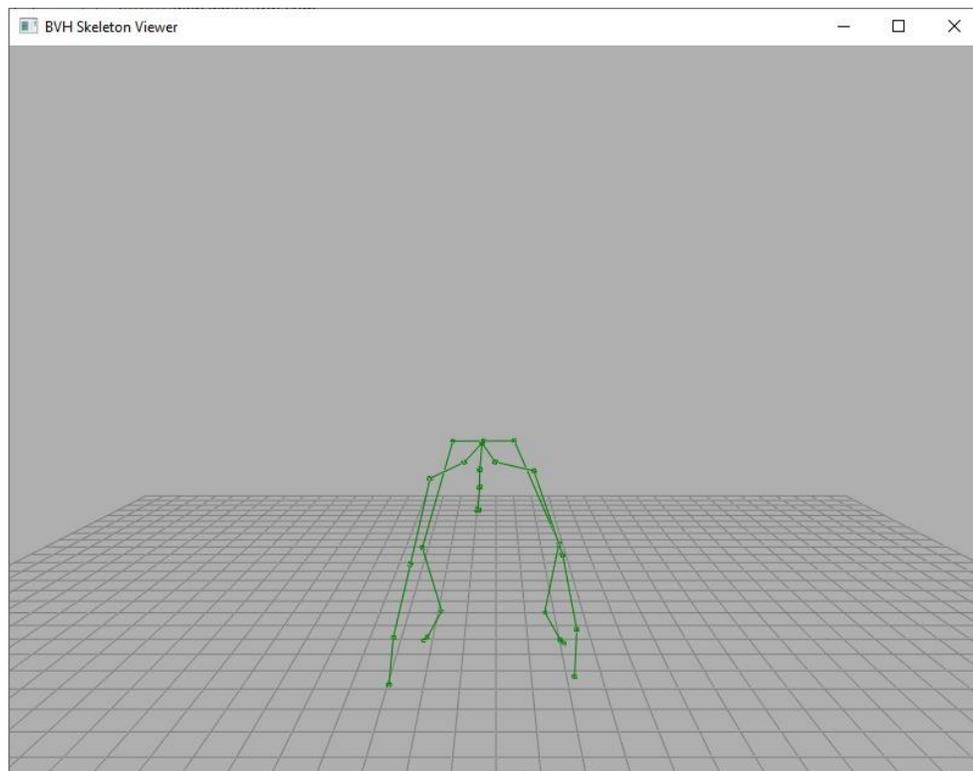
Visualización de gráfico lineal de aceleración en el tiempo



- **Implementación M2s2:**
  - **Investigación de herramientas:** Se investigaron herramientas y metodologías aplicadas con Qt para la visualización del archivo BVH.
  - **Carga de modelo esquelético:** Se implementó la funcionalidad para la carga y visualización del modelo esquelético en 3D.
  - **Investigación para realizar animación utilizando librería Assimp:** Se investigó y revisó la documentación de las librerías de Assimp, aparte se tuvieron reuniones con el tutor para recibir asesoría en esta sección.
  - **Animación del modelo 3D:** Se implementó la animación del modelo esquelético a partir de la lectura del archivo BVH donde se realizó un levantamiento de pesas (véase Figuras 22 y 23).

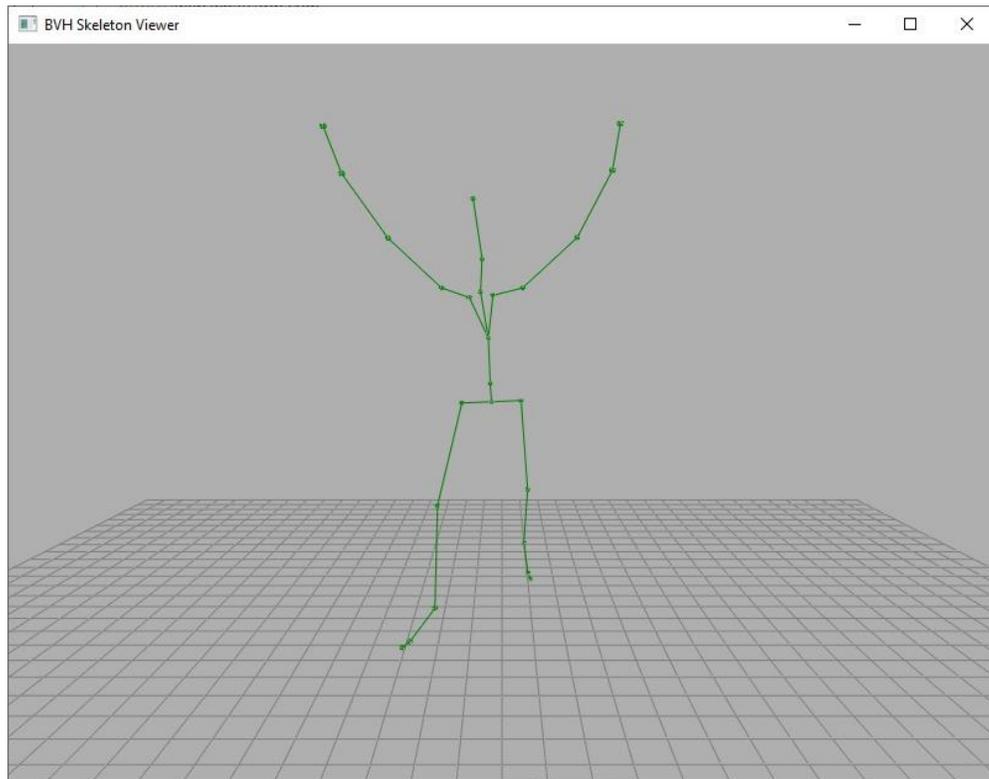
## Figura 22

*Visualización de la animación durante el agarre de las pesas*



## Figura 23

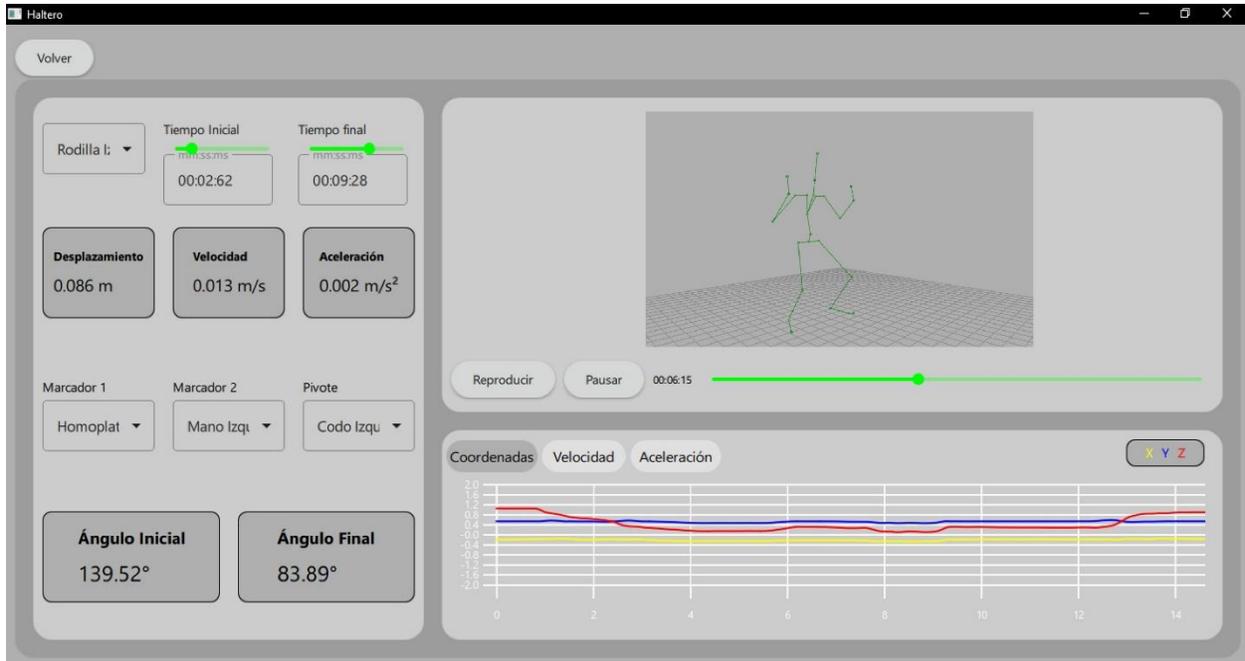
*Visualización de la animación durante el levantamiento de las pesas por encima de la cabeza*



- **Integración de animación en la interfaz gráfica:** Se integraron las animaciones en 3D con la interfaz gráfica, completando el módulo de visualización como se representa en Figura 24.

**Figura 24**

*Pantalla de visualización de datos y animación*



- **Sesiones de captura con prototipo del traje y pruebas finales**

Se llevaron a cabo nuevas sesiones de captura de movimiento, utilizando el prototipo del traje como se muestra en Figura 25, y con el fin de evaluar su rendimiento con el software Motive.

## Figura 25

*Sesión de captura de movimiento utilizando el prototipo de traje*



### **3.1.4 Finalización del proyecto (20/08/2024 – 26/08/2024)**

- **Finalización del documento**

Se completó el documento final del proyecto, incluyendo todos los capítulos, anexos y referencias necesarias.

- **Reunión con tutor: Entrega de documento final**

Se presentó el documento final al tutor para su revisión y aprobación antes de la entrega oficial.

- **Reunión con cliente: Entrega de producto Final**

Se hizo la entrega del producto final en el tiempo establecido al cliente para su revisión y aprobación.

## **3.2 Pruebas**

El módulo de software con la interfaz gráfica y el procesamiento del archivo CSV ha sido sometido a pruebas para asegurar su correcto desempeño en distintas plataformas y entornos. Estas pruebas, llevadas a cabo en sistemas operativos Windows y Linux, han validado tanto el correcto funcionamiento del programa de escritorio como su usabilidad. Además, se realizaron pruebas comparativas entre el traje OptiTrack y el prototipo desarrollado. Estas pruebas permitieron evaluar la precisión y la consistencia de los datos de captura de movimiento, comparando los resultados obtenidos con ambos trajes.

### **3.3 Resultados**

Se logró crear la interfaz gráfica que muestra los parámetros de movimiento y la animación por medio de la lectura y procesamiento de los archivos CSV y BVH. En la obtención de la animación se logró una reducción significativa en el tiempo de procesamiento en la versión actual en comparación con la versión anterior, a medida que aumenta la cantidad de fotogramas. Como se observa en la Tabla 2, la versión actual presenta un incremento más moderado del tiempo de procesamiento en función del número de frames, mientras que, en la versión anterior, el tiempo de procesamiento aumenta considerablemente conforme se incrementan los frames. Esto sugiere una mayor eficiencia y optimización en la gestión de animaciones y procesamiento de datos en la versión actual (ver Figura 26 para una visualización detallada).

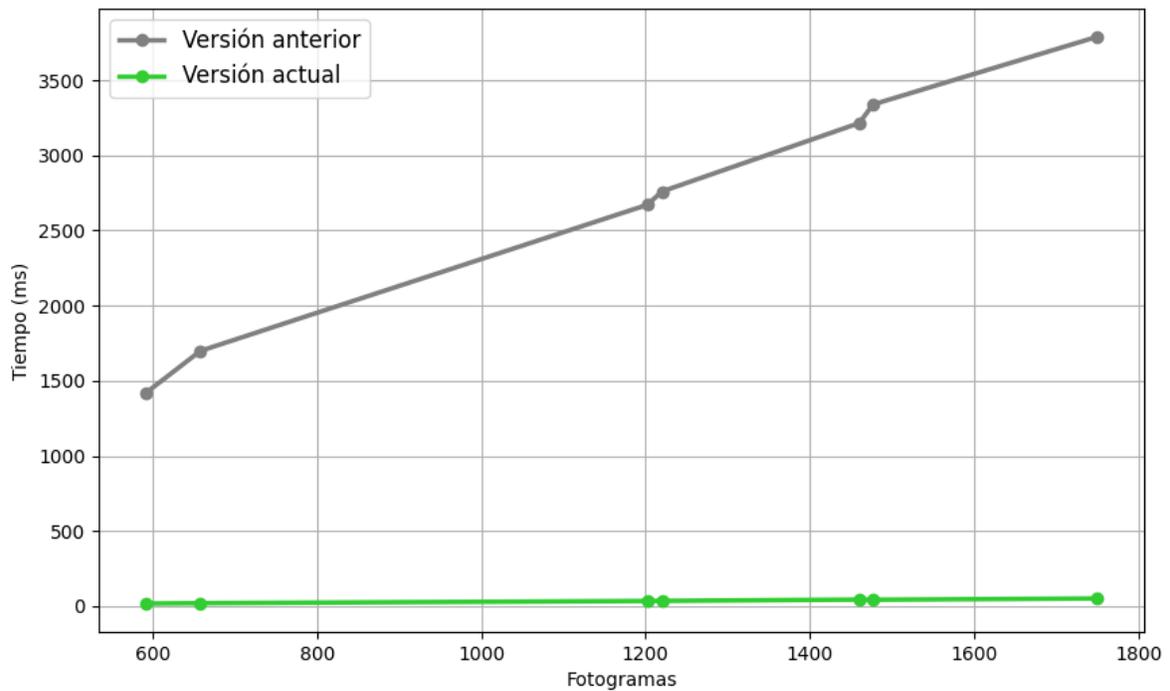
**Tabla 2**

*Tiempos de procesamiento de la animación en versión anterior y actual.*

# de fotogramas	Tiempo (ms)		Incremento
	Versión anterior	Versión actual	
592	17506	1421	1132 %
658	19796	1699	1065 %
1202	34757	2671	1201 %
1220	35350	2760	1180 %
1460	42709	3215	1228 %
1477	43644	3339	1207 %
1749	51217	3788	1252 %

**Figura 26**

*Gráfico comparativo de tiempos de procesamiento de la animación entre la versión anterior y actual*

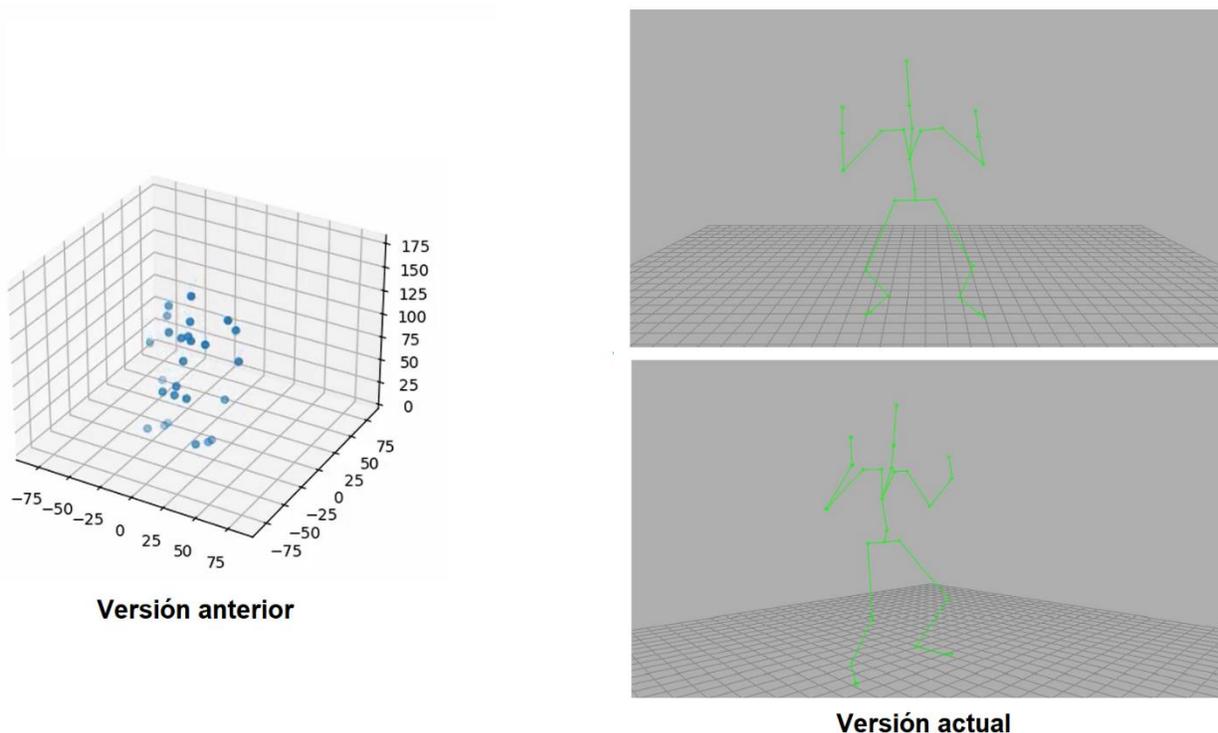


*Nota.* El gráfico muestra el tiempo de procesamiento de animación en función de la cantidad de fotogramas del archivo BVH. Los datos de la versión anterior en gris indican tiempos más elevados, mientras que los datos de la versión actual en verde presentan tiempos más bajos, destacando una disminución en la versión actualmente desarrollada.

La inclusión de la animación del esqueleto mediante la lectura del archivo BVH representa un avance significativo en comparación con la versión anterior, en la que generaba un video de puntos en el espacio. En la versión actual, al ver los nodos conectados, se obtiene una visualización más clara del movimiento, lo que permite un análisis más detallado y preciso como se observa en la Figura 27. Además, el uso de animación ofrece una mayor funcionalidad, como la posibilidad de manipular y revisar las secuencias de movimiento desde diferentes ángulos, facilitando la mejora de la técnica del deportista de manera más efectiva.

### Figura 27

*Comparación entre animación en versión anterior y versión actual*



El uso del traje prototipo no presentó problemas al adherir los marcadores, y se obtuvieron resultados comparables al traje OptiTrack, lo que refuerza la fiabilidad del sistema propuesto para aplicaciones prácticas, especialmente durante la ejecución de movimientos específicos de la disciplina de halterofilia.

### 3.4 Análisis de costos

En esta sección, se presenta un análisis detallado de los costos asociados con el desarrollo e implementación del sistema de captura y análisis de movimiento. El análisis abarca tres categorías principales: costos de software, costos de hardware y recursos, y costos de operación (véase Tablas 3-6). Cada uno de estos elementos es esencial para el correcto funcionamiento del sistema, desde la adquisición de licencias y equipos especializados hasta el tiempo y esfuerzo invertidos en el desarrollo del software.

#### 3.4.1 Costos de Software

- **Licencia de Motive.**

Compra de licencia para uso del software Motive 2.x (licencia permanente)	\$2 999
---	---------

#### 3.4.2 Costos de Hardware y recursos

**Tabla 3**

*Costos de hardware y recursos*

Computadora de escritorio (CPU: Intel Core i7/ GPU: NVIDIA GTX 1050)	\$500
Hardware Key	\$99
21 cámaras infrarrojas Flex 3	\$13180
Equipo para montar escenario (trípodes y ganchos)	\$2000
Herramientas de calibración (Calibration Wand / Calibration Square)	\$658
Kit de marcadores	\$259
Prototipo del traje	\$100
<b>Total</b>	<b>\$16796</b>

### 3.4.3 Costos de operación

- Trabajo de investigación y desarrollo

**Tabla 4**

*Estimación de horas de trabajo*

<b>Actividades</b>	<b>Horas</b>
Levantamiento de requerimientos y funcionalidades con el cliente.	40
Diseño del prototipo del traje de neopreno	30
Diseño del prototipo de la interfaz	20
Implementación del módulo de procesamiento de datos	80
Implementación del módulo de animación esquelética	200
Pruebas al módulo de procesamiento de datos	40
Pruebas al módulo de animación esquelética	40
<b>Total</b>	<b>450</b>

Teniendo en cuenta la cantidad total de horas del desarrollo del módulo de mediciones, además de una estimación de \$20 por hora de desarrollo; se obtiene un costo total de \$9000 por la implementación del software, a continuación, se puede observar dicha información.

**Tabla 5**

*Cálculo del costo de implementación*

Total de horas trabajadas	450
Costo por hora	\$20
Valor total de la implementación	\$9000

### 3.4.3 Resumen de costos

**Tabla 6***Resumen de costos*

Costos de software	\$2999
Costos de hardware y recursos	\$16796
Costos de operación	\$9000
<b>Costo total del proyecto</b>	<b>\$28795</b>

## Capítulo 4

## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones**

A partir de la implementación y los resultados obtenidos, se extraen varias conclusiones clave que resaltan el impacto de las mejoras realizadas en el sistema de captura y análisis de movimiento, las cuales se detallan a continuación:

La creación de una interfaz gráfica que permite la visualización detallada de los parámetros de movimiento y la animación del esqueleto, mediante la lectura y procesamiento de archivos CSV y BVH, representa un avance significativo en comparación con la versión anterior.

La implementación de un sistema de animación que conecta los nodos en un entorno 3D ha mejorado notablemente la claridad y precisión del análisis del movimiento, superando las limitaciones del enfoque previo basado en la visualización de puntos en el espacio.

La eficiencia en la obtención de la animación, con un tiempo de procesamiento significativamente menor en la versión actual, mejora la experiencia del usuario brindándole una retroalimentación inmediata.

El uso del traje prototipo ha permitido superar las limitaciones relacionadas con la indumentaria, mejorando la libertad de movimiento obteniendo resultados comparables a los del traje OptiTrack.

Estos resultados son un avance importante en el campo de la biomecánica deportiva, ya que proporcionan una herramienta más precisa y eficiente para la evaluación y mejora del rendimiento deportivo. Además, este proyecto sienta las bases para futuros trabajos que podrían explorar la aplicación de esta tecnología en otros deportes y escenarios, así como la integración de tecnologías adicionales como el aprendizaje automático para la predicción de movimientos.

## 4.2 Recomendaciones

A continuación, se proponen una serie de recomendaciones orientadas a optimizar el sistema y su aplicación en el ámbito deportivo. Estas sugerencias buscan asegurar la sostenibilidad y mejorar el impacto de las mejoras implementadas:

- Se recomienda realizar ajustes adicionales en el diseño del traje para mejorar aún más la comodidad y adaptabilidad a diferentes tipos de cuerpos. Esto podría incluir el diseño de tallas más grandes y el uso de materiales más flexibles que no afecten la adherencia de los marcadores.
- Al utilizar la librería de Assimp hay que ajustar las coordenadas debido a que, dependiendo del formato utilizado se ajusta la coordenada de Y verticalmente o Y-up por defecto, cuando otras aplicaciones usan Z-up como es el caso de Motive y Blender.
- A medida que nuevas versiones de Motive sean lanzadas, es recomendable actualizar el software desarrollado para asegurar la compatibilidad y aprovechar las nuevas funcionalidades que puedan ofrecerse, como la limpieza automática de datos o la detección avanzada de marcadores.
- Se sugiere explorar la adaptación del sistema a otros deportes que requieran una evaluación precisa de movimientos, como el atletismo o la gimnasia. Esto podría implicar ajustes en los algoritmos de procesamiento de datos para manejar diferentes tipos de movimiento.
- Para validar aún más la robustez del sistema, se recomienda realizar pruebas adicionales en diferentes entornos, como exteriores o bajo diferentes condiciones de iluminación, para garantizar que el sistema mantenga su precisión y eficiencia en situaciones variadas.

- Considerar la integración del sistema con plataformas de entrenamiento en línea podría facilitar el acceso a los datos de movimiento por parte de entrenadores y atletas que no se encuentren en el mismo lugar, permitiendo un análisis y retroalimentación en tiempo real desde cualquier parte del mundo.

## Referencias

- [1] D. A. Alarcón Galeas y E. A. Cordero Sabando, «Visualización de parámetros de movimiento en deportistas de halterofilia utilizando arreglos de cámaras infrarrojas.», Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2023.  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/60608>
- [2] X. Suo, W. Tang, y Z. Li, «Motion Capture Technology in Sports Scenarios: A Survey», *Sensors*, vol. 24, n.º 9, p. 2947, mayo 2024, doi: 10.3390/s24092947.
- [3] J. Lucas, «Is motion capture technology set to revolutionise sports performance? – Dr. Kim Duffy», *Vicon*, 27 de noviembre de 2023. <https://www.vicon.com/resources/blog/is-motion-capture-technology-set-to-revolutionise-sports-performance-dr-kim-duffy/>
- [4] G. Nagymáté y R. M. Kiss, «Application of OptiTrack motion capture systems in human movement analysis», *Recent Innovations In Mechatronics*, vol. 5, n.º 1., ene. 1970, doi: 10.17667/riim.2018.1/13.
- [5] M. Meredith, M. Cohen, y S. Maddock, «Motion Capture File Formats Explained», Production, 2001.  
[https://www.researchgate.net/publication/242308869\\_Motion\\_Capture\\_File\\_Formats\\_Explained](https://www.researchgate.net/publication/242308869_Motion_Capture_File_Formats_Explained)

