

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE DOS EXOESQUELETOS DURANTE LA  
SIMULACIÓN DE TAREAS LABORALES MEDIANTE FOTOGRAMTETRÍA Y  
SENSORES DE INERCIA.**

**ANÁLISIS DE CINEMÁTICA Y CINÉTICA ARTICULAR EN OPENSIM A TRAVÉS  
DE LOS DATOS RECOLECTADOS CON SENSORES INERCIALES (IMUs).**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**RAUL DAVID OBREGÓN MANZANO**

**raul.obregon@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: DR. ROBERTO CARLOS ROJAS MOLINA**

**roberto.rojas@epn.edu.ec**

**Agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, RAUL DAVID OBREGÓN MANZANO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**RAÚL DAVID OBREGÓN MANZANO**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por RAÚL DAVID OBREGÓN MANZANO bajo mi supervisión.

---

**DR. ROBERTO CARLOS ROJAS MOLINA**

**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RAÚL DAVID OBREGÓN MANZANO

DR. ROBERTO CARLOS ROJAS MOLINA

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre Lucía Manzano, quien con su apoyo incondicional y su ejemplo me ha dado las herramientas para enfrentarme a los desafíos presentes en la vida académica y cotidiana. También dedico este logro a mi hermana Gabriela y mis abuelos Fausto Manzano y Eudocia Yezpe quienes, con sus palabras de aliento y su confianza en mí, me han infundado ánimo para siempre seguir adelante. Finalmente es necesario dedicar este trabajo a mi novia Abi que ha sido una fuente de cariño y ánimo inagotables para mí, así como a mis amigos más cercanos Dylan, Jhoan, Santi, Danny y Martín a quienes les debo el que mi etapa académica sea unas de las más felices que recordaré en mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero extender mi agradecimiento al Ing. Esteban Ortiz quien fue una guía fundamental durante el comienzo de este proceso, así como a mi tutor, el Dr. Roberto Rojas, quien ha tenido la mejor disposición durante el desarrollo de este trabajo.

De la misma manera quiero agradecer a la Escuela Politécnica Nacional que me ha formado no solo académicamente sino también en valores y creencias que se han arraigado en mí fuertemente.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcance .....	2
1.4. Marco teórico .....	3
1.4.1. IMUs .....	3
1.4.2. Aplicación de sensores IMUs en biomecánica .....	4
2. METODOLOGÍA .....	7
2.1. Recolección de datos .....	7
2.2. Procesamiento de datos .....	8
2.2.1. Depuración de los datos iniciales .....	8
2.2.2. Adaptación de datos al formato de OpenSim .....	10
2.3. Corrección de la orientación de los sensores .....	11
2.4. Simulación de la cinemática corporal .....	13
2.5. Obtención de curvas de movimiento mediante OpenSim .....	14
2.6. Normalización de datos .....	16
3. RESULTADOS Y CONSLCUSIONES. ....	17
3.1. Análisis de resultados .....	17
3.1.1. Análisis de los participantes sin carga .....	17
3.1.2. Análisis de los participantes con carga media .....	21
3.1.3. Análisis de los participantes con carga máxima .....	22
3.1.4. Análisis del participante sin exosuit .....	23
3.1.5. Análisis de las curvas obtenidas para cadera izquierda .....	24
3.1.6. Comparación de curvas con distintos tipos de carga .....	27
3.2. Conclusiones .....	28

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	30
5. ANEXOS .....	32
ANEXO I .....	32
ANEXO II .....	35

## RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular “ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA Y CINÉTICA ARTICULAR EN OPENSIM A TRAVÉS DE LOS DATOS RECOLECTADOS CON SENSORES INERCIALES (IMUs).” se evalúa la utilidad y la idoneidad del software OpenSim para el procesamiento de datos recolectados a través de sensores inerciales IMU. Los sensores son colocados en distintas partes del cuerpo como la cadera, las rodillas y los tobillos y se analiza la cinemática articular al levantar una caja. Para la evaluación de los resultados, se comparan los resultados de OpenSim con otros enfoques de procesamiento de datos desarrollados. Adicionalmente, se busca destacar la precisión y la confiabilidad de los sensores IMU utilizados en la recolección de datos. Una parte importante del proyecto es la recopilación de datos de sensores IMU durante una variedad de movimientos y actividades. Estos datos se someten a un proceso de preprocesamiento meticuloso, que incluye depuración y organización, con el fin de garantizar la calidad y la integridad de los datos; además de hacer posible la lectura de estos datos en OpenSim. Posteriormente, se procesan los datos en OpenSim, y se interpretan las curvas que este entrega.

Finalmente, estas curvas son comparadas con curvas obtenidas por otros tipos de procesamiento, con lo cual se podrá emitir una valoración sobre las capacidades de OpenSim en el procesamiento de datos recolectados por IMUs, así mismo se juzgará la validez del uso de IMUs para el análisis de ejercicios cotidianos y fuera de un entorno controlado.

PALABRAS CLAVE: OpenSim, IMUs, cinemática articular, procesamiento de datos.



## **ABSTRACT**

In the current curricular integration work titled "ANALYSIS OF JOINT KINEMATICS AND KINETICS IN OPENSIM THROUGH DATA COLLECTED WITH INERTIAL SENSORS (IMUs)," the utility and suitability of the OpenSim software for processing data collected through IMU (Inertial Measurement Unit) sensors are evaluated. These sensors are placed in different parts of the body such as the hips, knees, and ankles, and joint kinematics are analyzed during the act of lifting a box. To assess the results, the outcomes from OpenSim are compared with other developed data processing approaches. Additionally, the aim is to highlight the accuracy and reliability of the IMU sensors used in data collection.

An integral aspect of the project involves gathering IMU sensor data during a variety of movements and activities. These data undergo a meticulous preprocessing procedure, which includes debugging and organization, to ensure data quality and integrity, as well as to facilitate their interpretation in OpenSim. Subsequently, the data are processed in OpenSim, and the resulting curves are interpreted.

Finally, these curves are juxtaposed with curves obtained through alternative processing methods, enabling an assessment of OpenSim's capabilities in processing IMU-collected data. Simultaneously, the validity of using IMUs for analyzing everyday exercises beyond controlled environments is appraised.

**KEYWORDS:** OpenSim, IMUs, joint kinematics, data processing.

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento describe el componente desarrollado para el procesamiento avanzado y la interpretación de datos provenientes de sensores Inertial Measurement Unit (IMU). El propósito fundamental de este componente reside en la adquisición, manipulación y análisis de los datos capturados por los sensores IMU, con el fin de extraer información relevante y discernir patrones significativos para su posterior interpretación.

El componente de procesamiento y análisis opera en varias etapas consecutivas y bien definidas. En primer lugar, se efectúa la recopilación precisa de los datos brutos provenientes de los sensores IMU, los cuales comprenden información relativa a la orientación en el espacio de los diferentes segmentos corporales. Una vez adquiridos, los datos se someten a una fase de preprocesamiento que involucra calibración, filtrado y eliminación de ruido inherente, con el objetivo de asegurar la calidad y consistencia de los datos de entrada.

Posteriormente, los datos preprocesados son adaptados a un formato reconocible por OpenSim y son ejecutados dentro del programa para obtener una simulación del movimiento registrado por los IMU. Todo esto será realizado con la finalidad de obtener curvas que describan los ángulos de apertura y sus variaciones en el tiempo para cada uno de los segmentos.

Finalmente se presenta la interpretación de los resultados y su comparación con datos y curvas que fueron obtenidas usando software de programación.

## **1.1. Objetivo general**

Analizar la cinemática y cinética articular a partir de los datos recolectados con sensores inerciales (IMUs) mediante el uso de software OpenSim.

## **1.2. Objetivos específicos**

1. Organizar los datos recolectados para cada uno de los participantes.
2. Procesar los datos recolectados.
3. Graficar los datos estáticos para todos los participantes.
4. Obtener datos de posición inicial para el análisis de la cinemática articular.
5. Convertir los datos cinemáticos a un formato reconocido por el software de simulación.
6. Ajustar el sistema de referencia de los sensores con el de OpenSim.
7. Evaluar los resultados obtenidos en OpenSim para los datos ingresados.

## **1.3. Alcance**

El alcance del componente de este proyecto está dividido en tres etapas, las cuales serán detalladas a continuación.

1. Etapa de procesamiento de datos de los participantes en el desarrollo de los movimientos realizados para cada prueba efectuada, esta etapa se enfocará en procesar los datos para poder trabajar en el software OpenSim.
2. La etapa de implementación se enfocará en el ingreso y lectura de datos estáticos y dinámicos dentro del programa OpenSim.
3. Etapa de análisis de resultados, se concentrará en organizar y evaluar los resultados obtenidos para poder emitir un criterio sobre la ergonomía de los exoesqueletos estudiados.

## **1.4. Marco teórico**

OpenSim es un software libre que permite a sus usuarios la simulación de sistemas neuromusculares. A través de este paquete es posible crear simulaciones dinámicas de movimiento que permitan el análisis controlado de un modelo. Algunas de las principales herramientas que presenta OpenSim son la importación de datos de análisis de movimiento, el escalado de modelos informáticos del sistema musculoesquelético, el análisis de dinámica inversa, la creación de modelos personalizados y el análisis de la marcha y otros movimientos propios del ser humano (SimTK, 2019). Para información más detallada de las capacidades del software OpenSim, referirse al trabajo de titulación “Evaluación de datos experimentales en un modelo OpenSim del comportamiento de flexo extensión del cuello” (FREIRE BONILLA, 2019).

### **1.4.1. IMUs**

Los sensores IMU (“inertial measurement unit” por sus siglas en inglés o unidades de medición inercial) son dispositivos que miden la aceleración y la velocidad angular de un objeto en movimiento. Estos sensores se utilizan en una variedad de aplicaciones, como: la navegación de vehículos autónomos, la estabilización de cámaras, y la medición de la actividad muscular y el movimiento humano.

Los sensores IMU se componen típicamente de un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro. La precisión de los sensores IMU es importante para muchas aplicaciones; y generalmente, la precisión del acelerómetro y el giroscopio puede verse afectada por factores como la temperatura, el ruido y las vibraciones mecánicas. Los algoritmos de fusión de sensores se utilizan para combinar las mediciones del acelerómetro y el giroscopio para mejorar la precisión general del sensor.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron los sensores Trigno Avanti de Delsys, los cuales son una serie de sensores IMU que se utilizan para medir la actividad muscular y el movimiento humano en tiempo real. Estos sensores son inalámbricos y se pueden colocar en diferentes partes del cuerpo para medir la actividad muscular y el movimiento de las distintas extremidades. El lugar de colocación de los sensores suele ser decisión y criterio del investigador, pues dependen del tipo de movimiento que se va a analizar y los resultados que se esperan obtener. Sin embargo, la bibliografía indica que lo más recomendable es colocar los sensores relativamente lejos de las articulaciones en movimiento. Esto debido a que el desplazamiento relativo de la piel con respecto a la articulación al momento de la flexión puede llegar a generar errores en los resultados arrojados por los IMUs. Para los sensores Trigno Avanti es recomendable que la flecha marcada en cada sensor, este ubicada de forma paralela con las fibras musculares de la extremidad en cuestión (Ortiz Solano, 2021).

Los sensores IMU, al no estar limitados a un espacio físico sino al anclarse al sujeto de prueba, no tienen un sistema de referencia fijo. Los datos que entregan estiman el movimiento por medio de la

unión de información entre sensores. Debido a esto, las estimaciones obtenidas por medio de sensores IMU suelen anclarse a un modelo biomecánico que facilite la interpretación y el procesamiento de estos datos, integrando de esta manera un sistema de referencia global (modelo) a los sensores. Es por esta razón que los resultados obtenidos por medio de sensores de inercia pueden diferir de resultados obtenidos por medio de la captura de movimiento (Riek et al., 2023).

### **1.4.2. Aplicación de sensores IMUs en biomecánica**

Debido a su portabilidad y la facilidad de su colocación, los sensores IMUs se han convertido en herramientas muy utilizadas en el campo de la biomedicina. Los IMUs permiten realizar un seguimiento al usuario mientras este desarrolla diferentes actividades, y con esto es posible intervenir en su rehabilitación o prevención de lesiones.

#### Análisis de marcha

Una de las aplicaciones más utilizadas es para analizar la estabilidad de marcha de un sujeto. Esta aplicación previamente a la utilización de IMUs se realizaba por medio de cámaras ópticas de captura de movimiento, pero este tipo de estudios se realizaban en un ambiente controlado en el cual se encontraban ubicados los equipos. Este tipo de análisis es válido, pero elimina las condiciones reales que un individuo puede encontrarse en el mundo exterior. Esto no permite que se analice un factor de estabilidad que se puede presentar en un terreno inestable y bajo condiciones reales de marcha. Sin embargo, al ser estos factores difíciles de interpretar, puede existir un importante margen de error, o una incorrecta interpretación del movimiento por parte de los sensores (Riek et al., 2023).

#### Retroalimentación de la biomecánica de un cuerpo durante entrenamiento

En el ámbito del rendimiento deportivo; el análisis del movimiento es fundamental para seguir y registrar el movimiento humano de deportistas para analizar su condición física; rendimiento; técnica; y el origen, prevención y rehabilitación de lesiones. Para ello, se utilizan sistemas de captura de movimiento que pueden proporcionar datos cinemáticos bastante confiables. Estos sistemas pueden ayudar a revelar información oculta relacionada con los parámetros cinéticos, como los ángulos de las articulaciones, las fuerzas aplicadas, postura, etc. Sin embargo, existen varios inconvenientes del método optoelectrónico; por ejemplo: la operación complicada, alto costo y dependencia de un laboratorio. Por lo tanto, es necesario desarrollar otros métodos de análisis de movimiento que puedan superar estas dificultades para los profesionales. Por esta razón, el uso de sensores IMUs los cuales presentan un tamaño reducido y son prácticos para usar y transportar, han generado gran interés entre los investigadores. Los sensores de inercia presentan ciertas ventajas como puede observarse en la Tabla 1. Sin embargo, esta tecnología no está lo suficientemente

madura para poder obtener resultados en tiempo real, que sería el principal objeto de interés en el ámbito deportivo.

Sistemas optoelectrónicos tradicionales	Sistemas sin marcadores basados en visión por computadora	Sistemas portátiles
Restricciones de movimiento causadas por al menos 40 marcadores para una captura de movimiento de todo el cuerpo.	Sin restricción de movimientos.	Restricciones de movimiento causadas por al menos 17 marcadores para una captura de movimiento de todo el cuerpo.
La precisión de las trayectorias de los marcadores puede ser de 1 mm.	La precisión de los marcadores virtuales puede llegar al orden de los milímetros,	La precisión de los sensores puede llegar al orden de los centímetros.
Captura realizada en laboratorio.	Por lo general se requiere un espacio de al menos 5*5 [m],	No se ve limitado por un espacio para la captura.
Trabajo de calibración engorroso.	Trabajo de calibración difícil y tardado.	Calibración fácil y rápida.
Requiere mucho tiempo para el procesamiento de datos.	Monitorización en tiempo real, pero requiere hardware de alta calidad y un elevado nivel de modelado.	Monitorización en tiempo real.

**Tabla 1.** Comparación entre sistemas de medición y captura de movimiento (Wang et al., 2022).

#### Monitoreo de rehabilitación de pacientes

Los sensores inerciales o unidad de medición inercial (IMU) son útiles en el área de la salud para la cuantificación y valoración objetiva del movimiento corporal humano. En el caso de la rehabilitación motriz, los sensores IMU se utilizan para evaluar el movimiento de las extremidades y el tronco, lo que permite a los fisioterapeutas diseñar programas de rehabilitación personalizados y monitorear el progreso del paciente. Además, los sensores IMU también se utilizan en la monitorización de pacientes con enfermedades neurológicas, como la enfermedad de Parkinson, para evaluar la calidad del movimiento y detectar posibles caídas.

El hecho de no estar limitados a un espacio de laboratorio abre la posibilidad de monitorear la marcha en el desarrollo de actividades cotidianas para pacientes hospitalizados o en proceso de rehabilitación. Esto permite evaluar el rendimiento y la capacidad de marcha del sujeto en un lapso de tiempo más prolongado, lo cual representa un seguimiento del progreso mucho más preciso y completo (Hendriks et al., 2022).

## Monitoreo del levantamiento de carga

El levantamiento manual de cargas es una actividad común en la vida diaria y en muchas ocupaciones especializadas. Sin embargo, estas tareas son un factor de riesgo bien conocido en el dolor lumbar. Se estima que cuadros de dolor lumbar se presentan en alrededor del 60 y 70% de la población adulta en el Ecuador (Moyano et al., 2016). Numerosos estudios exploran los mecanismos subyacentes y las condiciones de elevación implicadas en las lesiones de la espalda baja. Múltiples modelos biomecánicos de levantamiento exploran las cargas de la zona lumbar y/o de los hombros durante las tareas de levantamiento, así como los movimientos de levantamiento que optimizan el esfuerzo de levantamiento. Entre muchos factores que contribuyen al riesgo de lesiones se encuentran el sobreesfuerzo y la fatiga, como lo revelan los datos electromiográficos (Wang et al., 2022). Otros factores incluyen la edad y la velocidad de levantamiento, la carga, el alcance y la técnica.

El uso de IMU para el seguimiento del movimiento humano fuera de los entornos de laboratorio aumenta potencialmente la validez de las conclusiones de la investigación. Por ejemplo, en un estudio reciente, se consideró el desempeño del equilibrio humano en el contexto de una desafiante barra de equilibrio al aire libre. Los datos recopilados de una serie de IMU corporales revelaron el compromiso fundamental entre velocidad y estabilidad (equilibrio) para los participantes que atravesaban la viga con y sin carga de equipo adicional. Estos estudios están relacionados con investigaciones previas que han utilizado IMU integradas en equipos portátiles, incluidos equipos deportivos (Tamma et al., 2018).

El uso de IMUs representa un paso adelante en el análisis y evaluación de factores de riesgo ergonómicos. Previamente, estos procedimientos se realizan por observación directa de un profesional especializado en el área y, por medio de técnicas y herramientas de falla por fatiga de levantamiento (LIFFT), en donde se estima el daño tisular acumulado en la parte baja de la espalda (Matijevich et al., 2021). Esto con el objetivo de minimizar el impacto del desarrollo de las actividades en el trabajador, siendo estas herramientas muy valiosas, pero a la vez muy costosas pues son evaluadas en un único sujeto y para un solo trabajo específico. Esto representaría grandes costos en estudios realizados para labores que impliquen gran variedad de ejercicios y participantes, y en un caso opuesto pueden no llegar a ser representativas para situaciones fortuitas en las que el daño no es una norma general durante la ejecución de ciertas actividades. Confiabilidad de los sensores portátiles

Para el análisis y estudio del movimiento corporal, el estándar de calidad más alto y confiable es el que se obtiene por medio del uso de sensores de fotogrametría y captura de movimiento que realizan un análisis en un entorno controlado y bajo estándares de laboratorio. Sin embargo, debido sus ventajas antes mencionadas los sensores portables son una opción atractiva. Para mejorar su

confiabilidad, en los sensores portables se han desarrollado y combinado tecnologías como el uso de acelerómetro y giroscopio en un mismo sensor (IMU) u otros que combinan acelerómetro, giroscopio y magnetoscopio (MIMU). Esto con el afán de disminuir la falta de precisión que es ocasionada por el aumento de la aceleración en un segmento específico y otras desviaciones. El giroscopio es el encargado de estimar la orientación del sensor por medio de la integración de señales de velocidad angular relativa a los ejes xyz. El acelerómetro por otro lado analiza la señal de la aceleración y entrega una medida de la orientación estática en relación con la gravedad, mientras que el magnetoscopio utiliza la orientación del sensor en relación con el campo magnético terrestre para determinar un rumbo. Siendo unos más aptos para la estimación de movimientos lentos y otros para movimientos más dinámicos.

En esta referencia (Poitras et al., 2019) se sugiere que los sensores M/IMU son válidos para articulaciones superiores para movimientos de flexión/extensión bajo cualquier contexto en el que se esté trabajando, pero dependiendo de la complejidad del movimiento puede existir una mayor variabilidad en la abducción/aducción. Por otro lado, para los miembros inferiores se encontró que los resultados obtenidos son similares a los que se obtendrían por medio de un estudio de captura de movimiento, con excepción del componente de rotación. Esto indica que este sería un método viable para un estudio centrado principalmente en los planos sagital y frontal, más no en el plano transversal.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que se han realizado estudios (Bergmann et al., 2009) en donde se ha puesto en duda la confiabilidad de los sistemas de captura de movimiento por medio de cámaras, en especial para movimientos complejos. Se ha destacado que los errores que presentan estos sistemas en comparación con el goniómetro, el inclinómetro y las mediciones radio-estereométricas están en un rango similar al que se obtienen por medio de sensores M/IMU, y al igual que estos su variabilidad se ve afectada según la complejidad del movimiento y los planos en los que se trabaje.

## **2. METODOLOGÍA**

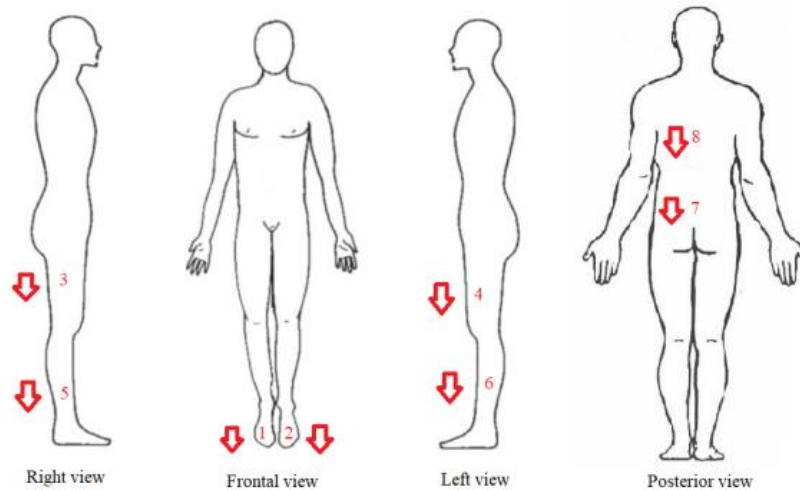
### **2.1. Recolección de datos**

En este estudio se llevó a cabo una investigación para determinar si el uso de un exoesqueleto ergonómico facilita el levantamiento de una caja con pesos regulados. Para ello, se contó con la participación de 20 voluntarios, todos ellos con consentimiento informado. Cada uno de los participantes llevó 8 sensores de la marca Delsys, ubicados en la parte inferior para medir la actividad en la rodilla, tobillo y cadera durante la tarea de levantamiento de la caja. Estos sensores fusionan los datos del magnetómetro, el acelerómetro y el giroscopio para estimar su orientación en el espacio



y los expresan en un formato de cuaterniones para cada instante de tiempo (DELSYS INCORPORATED, 2021) como se muestra en la Figura 1. Los sensores del modelo Delsys son ampliamente utilizados en la investigación biomecánica debido a su alta precisión y facilidad de uso.

### Participante 1



**Figura 1.** Colocación y orientación de los sensores para el sujeto 1.

La tarea consistió en levantar una caja con un peso de 15 kg, utilizando el exoesqueleto ergonómico. El exoesqueleto fue diseñado para mejorar la biomecánica del levantamiento de cargas y proporcionar un apoyo adecuado para la espalda y las piernas de los participantes durante la tarea. Se midieron las variables biomecánicas correspondientes durante la tarea, como el ángulo de flexión de la rodilla, tobillos y otros segmentos que están involucrados en la actividad de levantamiento. Los datos registrados por los sensores fueron recopilados de forma diferenciada para distintos tipos de carga y diferentes participantes, con la finalidad de determinar si la utilización del exoesqueleto facilitaba el levantamiento de la caja con pesos regulados.

## 2.2. Procesamiento de datos

Los datos registrados por los IMU requieren ser procesados para poder ser leídos e interpretados por el software OpenSim. Este procesamiento cuenta con varias etapas secuenciales que se repiten para cada sujeto y para cada actividad realizada.

### 2.2.1. Depuración de los datos iniciales

En el presente estudio, se desarrolló un código en el lenguaje de programación Python, con el objetivo de eliminar los valores de “0” presentes en los datos recolectados por los sensores Delsys. Los valores de 0 se debían a que, en pequeños intervalos de tiempo, los sensores no reaccionan y no

entregan un valor. Además, porque los datos iniciales todos son ceros debido a que existe un tiempo de encendido de los sensores. Los datos de los sensores se entregan en forma de cuaterniones, con un cuaternión por cada sensor colocado en el sujeto. Como se explicó antes, cada sujeto llevaba un total de 8 sensores distribuidos en diferentes segmentos corporales, para medir la actividad muscular y la posición angular de las extremidades durante la tarea de levantamiento de una caja con un peso regulado.

Los datos recolectados a través de los sensores tienen valores de 0 regados alrededor de los datos. Esto es un problema importante ya que estos valores de 0 alteraban el promedio de los valores del sensor y afectan la precisión de los resultados obtenidos. El código utilizó una serie de funciones para detectar y eliminar los valores de 0 de los datos. Primero, se realizó una limpieza inicial de los datos, eliminando los valores nulos y los valores de 0 que estaban al principio y al final de cada archivo de datos. Posteriormente, se implementó una función de detección de valores de 0, que detectaba los valores de 0 presentes en los datos recolectados. Una vez detectados, se procedió a reemplazar los valores de 0 por un valor de promedio de los valores circundantes en el tiempo, de modo que los valores del sensor se mantuvieran precisos y no se viera afectada la calidad de los datos. La implementación de este código en Python permitió eliminar los valores de 0 presentes en los datos recolectados por los sensores Delsis, mejorando así la calidad de los datos y la precisión de los resultados obtenidos en la tarea de levantamiento de la caja con peso regulado.

#### Obtención de datos iniciales

Para garantizar la precisión de los datos recolectados durante las pruebas dinámicas con los sensores Delsis, es fundamental contar con valores iniciales precisos de cada participante. Estos valores representan la posición y orientación estática de los sensores en relación con el cuerpo del participante, y se utilizan como referencia para calcular la posición y orientación del cuerpo durante los movimientos realizados durante la prueba.

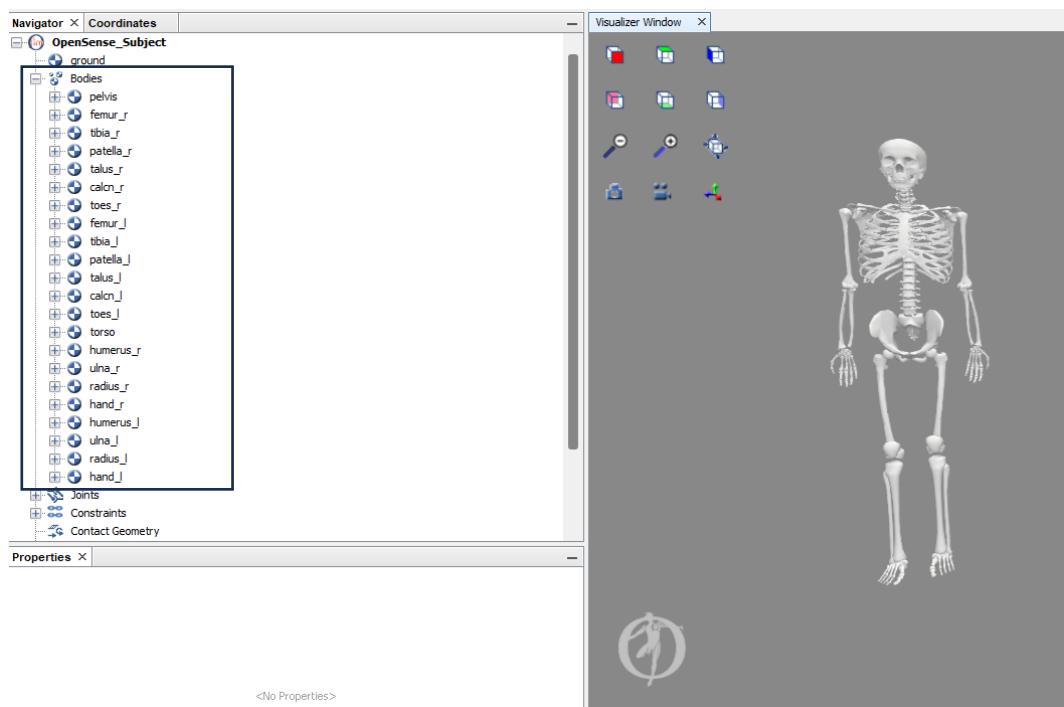
Para obtener estos valores iniciales precisos, se llevó a cabo una prueba estática donde el participante permaneció inmóvil durante un periodo de tiempo mientras se recopilaban datos de los 8 sensores Delsis colocados en diferentes segmentos del cuerpo. Los datos recolectados se depuraron para eliminar los valores de "0" generados por intervalos de tiempo pequeños en los que los sensores no respondían. Posteriormente, se graficaron los valores de cada uno de los cuaterniones (orientación W, X, Y y Z) en función del tiempo, y se buscó el rango de tiempo donde los datos se estabilizaban para obtener un valor promedio más preciso de la posición estática de cada sensor. Para esto, se requirieron un total de 32 gráficas (4 gráficas por cada uno de los 8 sensores) por cada participante.

Es importante destacar que la obtención de valores iniciales precisos es un paso fundamental en cualquier estudio que involucre sensores de movimiento. Estos valores permiten una mayor precisión

en el análisis de los datos recolectados durante las pruebas dinámicas y, por lo tanto, mejoran la confiabilidad de los resultados obtenidos.

## 2.2.2. Adaptación de datos al formato de OpenSim

La adaptación del formato de los datos existentes al formato de datos reconocido por el programa OpenSim es un proceso crucial en el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se identificó la nomenclatura que utiliza el modelo para las diferentes extremidades y secciones corporales, con el fin de asignar correctamente los nombres a las extremidades en nuestros datos, como se puede apreciar en la Figura 2.



**Figura 2.** Nombres de extremidades corporales en el modelo Rajagopal2015\_opensense; Software OpenSim.

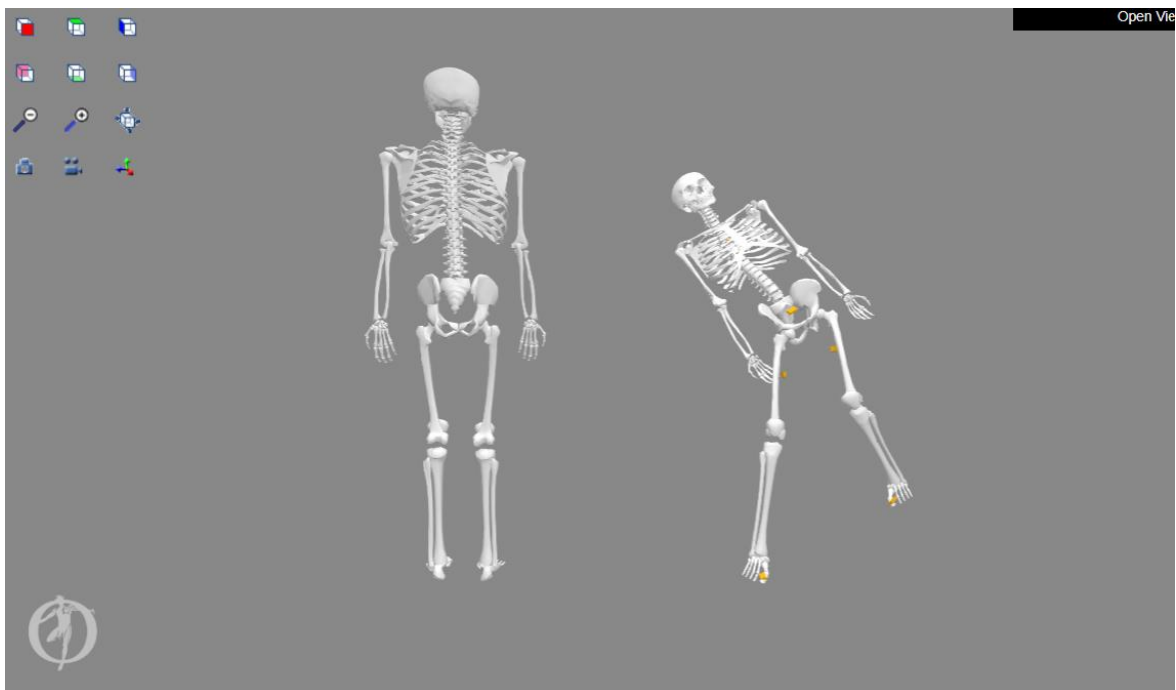
Esta tarea es esencial, ya que cada modelo musculoesquelético presenta su propia nomenclatura para las extremidades. Esto significa que los datos no serían reconocidos si los nombres asignados a las extremidades no coincidieran con la nomenclatura del modelo utilizado. Una vez que se identificaron y asignaron correctamente los nombres a las extremidades, se procedió a clasificar los datos de tal manera que el programa pudiera leerlos. En primer lugar, se trabajó con los datos estáticos, que presentaron una dificultad baja, ya que se trata de un pequeño número de datos que se reemplazaron manualmente en el archivo del modelo original y se comprobó si el programa los reconocía.

Sin embargo, el mayor problema surgió al trabajar con los datos dinámicos, ya que el número de datos era muy grande para reemplazarlos manualmente. En este caso, los datos se encontraban en formato de archivo de Excel, mientras que el programa utilizaba un formato de texto en el que separaba el valor del tiempo de los sensores por medio de tabuladores y los valores entre sensores por medio de comas. Además, los datos entre sensores están separados con espacios, lo que hacía imposible pegar directamente los datos en el archivo de texto. Debido a esto, se desarrolló un código en Python que utilizó la biblioteca Pandas para leer el archivo de Excel y transformarlo en un archivo de texto en el que se distinguen las columnas y se separan las diferentes secciones de datos utilizando comas o tabuladores, dependiendo del orden de las columnas en el archivo.

Una vez que se tuvo el código en funcionamiento, se ordenaron los datos entregados en el archivo de texto final, en el que también se incluyeron los datos estáticos y dinámicos. De esta manera, se logró que el programa OpenSim reconociera los datos entregados por los IMU y se pudiera utilizar para el análisis de la cinemática humana.

### **2.3. Corrección de la orientación de los sensores**

Una vez que se han reconocido los datos en OpenSim y se ha corrido el programa, es común encontrar que el modelo musculoesquelético no se encuentra en la posición adecuada, como se puede observar en la Figura 3. Esto se debe a que la orientación de los ejes de los sensores, con respecto al sistema de referencia del programa, no se encuentra adecuadamente alineada. Esto implica la necesidad de realizar una corrección en el sentido de los ejes.

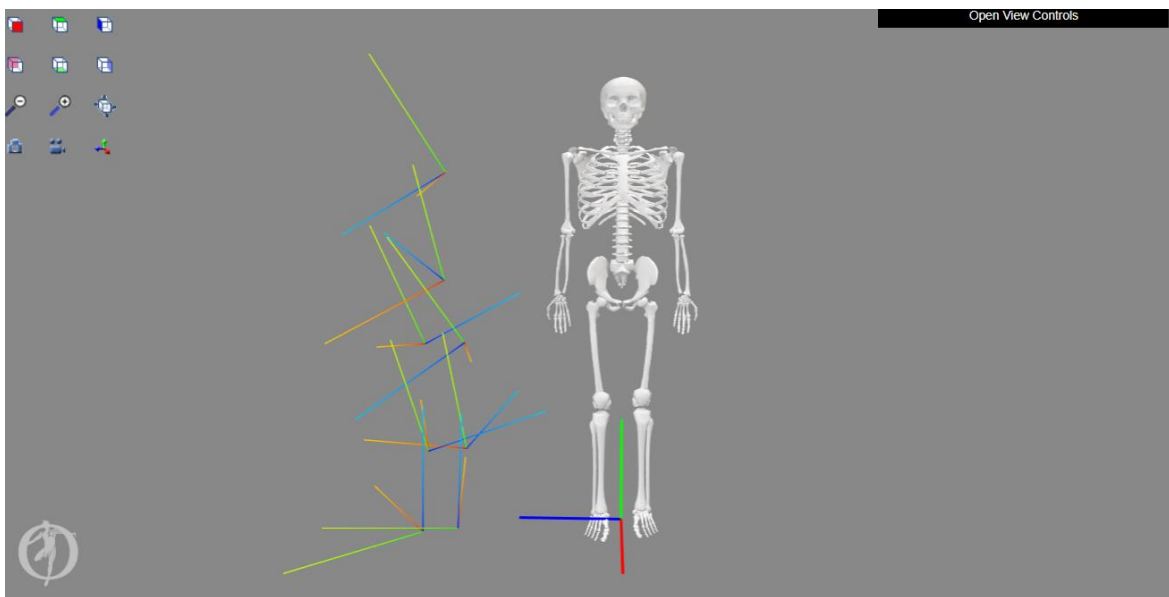


**Figura 3.** Herramienta “IMU inverse Kinematics” usada en el sujeto 1; Software OpenSim.

Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza la herramienta "Preview sensor data", que muestra el sistema de ejes coordenados de cada sensor ubicado en su respectiva extremidad o segmento del modelo musculoesquelético. Esta herramienta permite rotar el eje coordenado alrededor de los distintos ejes, ya sea usando ángulos negativos o positivos, con la intención de que los ejes de coordenadas de los sensores se aproximen a la posición del eje de coordenadas global en OpenSim.

El proceso de corrección de la orientación de los ejes se lleva a cabo mediante un método heurístico, en el que se van adaptando nuevas soluciones en base a los resultados que se obtienen previamente. Esto implica una iteración constante entre la orientación de los ejes de los sensores y la posición del modelo musculoesquelético en OpenSim hasta alcanzar el resultado deseado.

Es importante destacar que este procedimiento de corrección es fundamental para obtener resultados precisos en el análisis de la biomecánica del movimiento humano. La correcta orientación de los ejes de los sensores asegura que la información obtenida sea válida y confiable, lo que es esencial en el desarrollo de investigaciones científicas y en la aplicación clínica de la biomecánica del movimiento. Por lo cual se tendrá que ajustar el sentido de los ejes de los IMUs al eje de referencia global sobre el modelo con el que se está trabajando, como se muestra en la Figura 4.

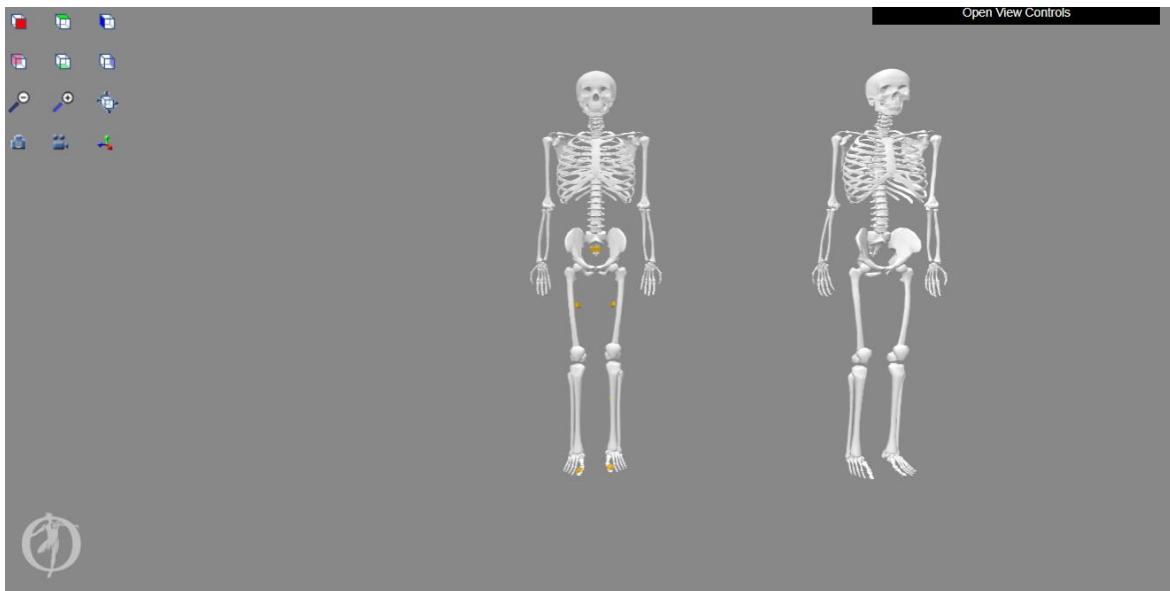


**Figura 4.** Herramienta “preview sensor data” usada en el sujeto 1; Software OpenSim.

Teniendo en cuenta que debido al factor humano y a la propia naturaleza de los sensores, alcanzar una posición exactamente igual al sistema referencial, no es posible; esta parte del proceso sirve como una guía en base a la cual se seguirá probando la segunda parte del proceso en la que se simulará el movimiento a partir los datos recolectados y previamente depurados y adaptados.

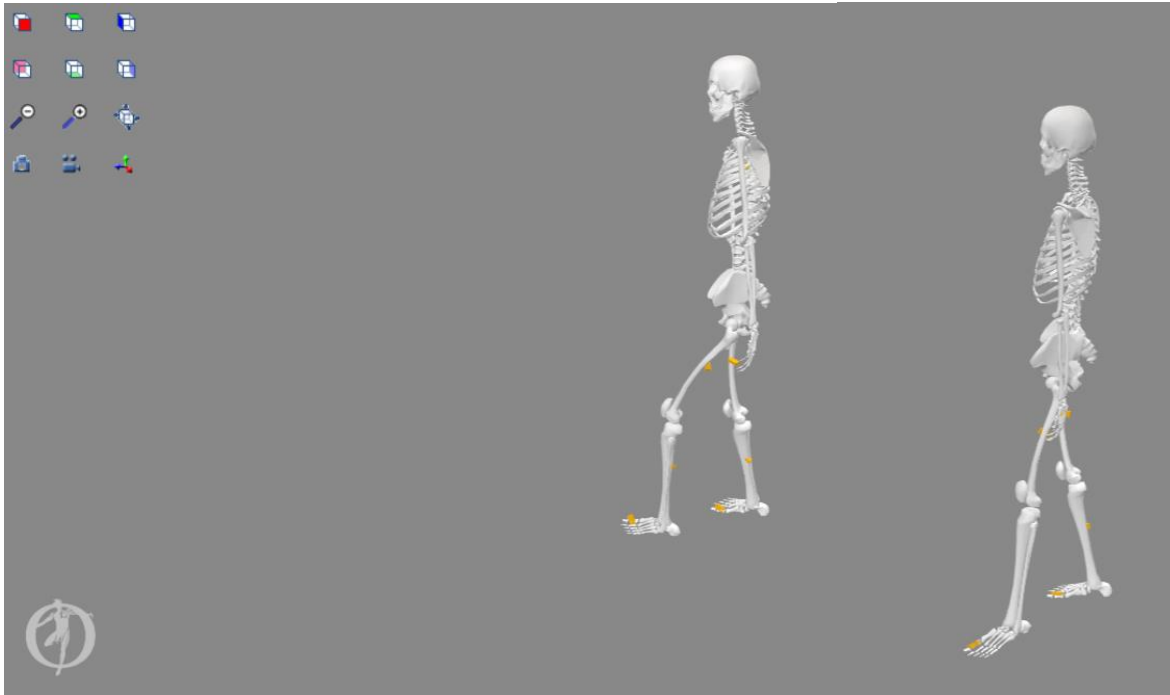
## 2.4. Simulación de la cinemática corporal

Una vez que se haya alcanzado una secuencia de ángulos que se aproxime al resultado deseado, se procede a simular el movimiento haciendo uso de los datos cinemáticos que fueron procesados anteriormente. Es necesario inicialmente colocar los sensores para los datos estáticos y consecutivamente correr los datos cinemáticos, lo cual nos dará como resultado la simulación del movimiento para nuestro modelo musculoesquelético, como se puede apreciar en la Figura 5.



**Figura 5.** Herramienta “IMU Placer” usada en el sujeto 1 (Software OpenSim).

Este posicionamiento de los sensores se debe mantener al llevar a cabo la simulación pues caso contrario los ejes referenciales del sistema cinemático no coincidirían con los del sistema estático, y el modelo aparecería rotado en el espacio. Al ser colocados adecuadamente, se obtendría un movimiento similar al de los que realizó el participante que usó los sensores durante la recolección de datos. Esto se puede observar en la Figura 6.

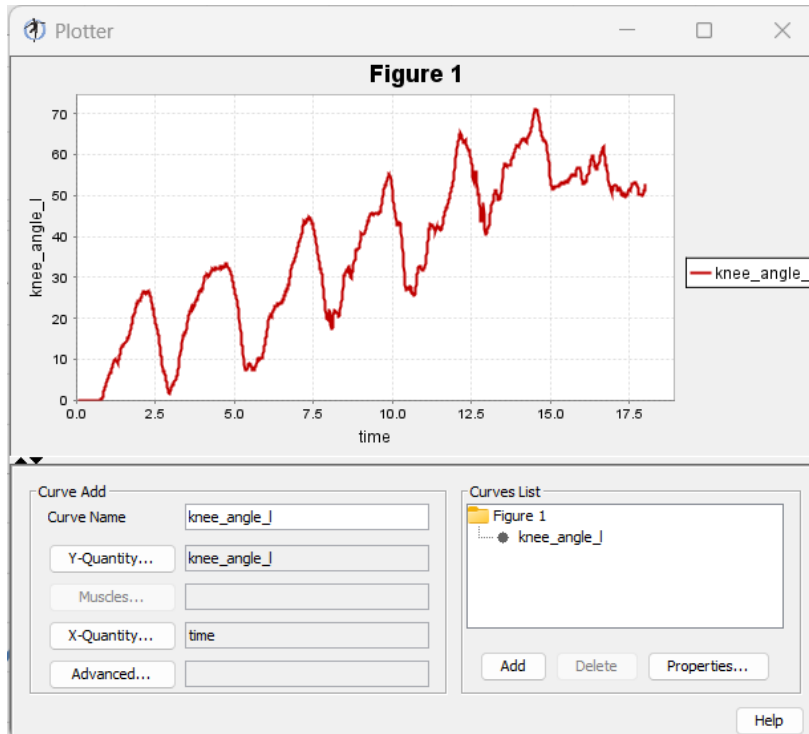


**Figura 6.** Herramienta “IMU Inverse Kinematics “usada en el sujeto 1; Software OpenSim.

## **2.5. Obtención de curvas de movimiento mediante OpenSim**

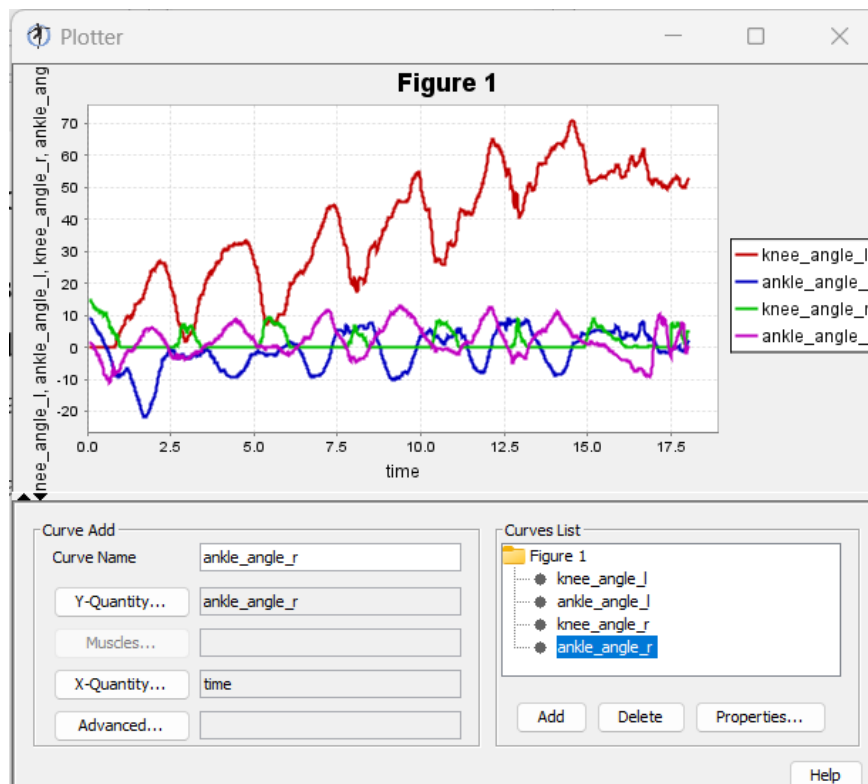
Al tener la simulación de movimiento terminada, el programa permite guardar los datos en dos tipos de formato, estos pueden ser “.sto” o “.mot” Siguiendo la línea de trabajo que se ha llevado, se mantiene el formato “. sto” para los datos y se guarda para cada participante y para el tipo de prueba que se haya ejecutado.

Con el nuevo archivo de datos que ha creado el programa OpenSim se procede a obtener la representación gráfica del ángulo de flexión, rotación, abducción o extensión dependiendo del segmento que se esté analizando y el tipo de movimiento que el software detecte. Este proceso se lleva a cabo mediante la herramienta “plot”, en la que se cargará el archivo que recopiló el programa OpenSim a partir de la simulación de movimiento. Esta herramienta permitirá seleccionar los datos del archivo y específicos para el modelo, que se quiera representar en el eje de coordenadas “Y” y también que datos serán destinados al eje de coordenadas “X”, como se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7.** Representación gráfica de las curvas de movimiento para segmentos corporales; Software OpenSim.

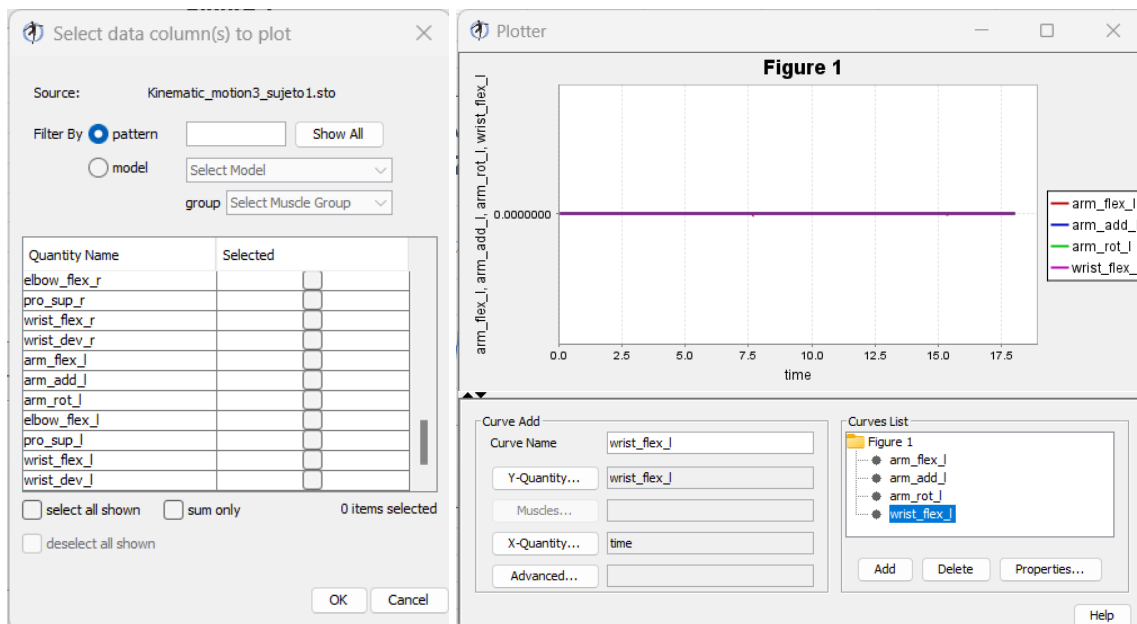
La herramienta “plot” además permite graficar más de una curva a la vez, lo que puede permitirnos comparar la amplitud del movimiento que tiene una sección corporal en comparación con otra, como se observa en la Figura 8.





**Figura 8.** Representación gráfica de curvas de movimiento para múltiples segmentos corporales; Software OpenSim.

Además, la herramienta nos permite exportar los datos a un formato de texto, que nos permitirá analizar y comparar los resultados obtenidos en OpenSim frente a resultados obtenidos por medio del procesamiento de datos en otros programas como puede ser Matlab o Python. Considerar también que el programa reconocerá otros segmentos pertenecientes al modelo utilizado, como se muestra en la Figura 9. Sin embargo, estos segmentos no tendrán un valor asignado pues los datos que se entregaron al programa mediante el archivo “.sto” cargado al IMU placer, contienen la información de que segmentos cuentan con sensores inerciales. Lo que dará como resultado que todos estos segmentos que no cuenten con sensores sean representados como una constante en el valor 0 en “Y”.



**Figura 9.** Representación gráfica de las curvas de movimiento para segmentos corporales no participantes; Software OpenSim.

## 2.6. Normalización de datos

Una vez obtenidas las curvas por medio de OpenSim es necesario normalizar los datos, que es una modificación de la escala para hacer posible la comparación con los resultados obtenidos por otros medios. De esta forma se estará en la capacidad de confirmar la validez del software OpenSim en el análisis de datos cinemáticos por medio de la utilización de IMUs. Este proceso se realizó exportando los datos de las curvas de OpenSim hacia texto y graficándolas junto con las curvas de datos que fueron procesadas mediante el software de programación con las cuales se establece la comparación.

Para normalizar los datos se utilizó el método de escalado de variables, con el cual los datos de ambas curvas se establecen en una escala entre 0 y 1, haciendo que las curvas obtenidas sean comparables, esto se logró mediante el uso de la siguiente fórmula.

$$X_n = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

En donde:

$X$  : valor a normalizar.

$X_{min}$  : valor mínimo.

$X_{max}$  : valor máximo.

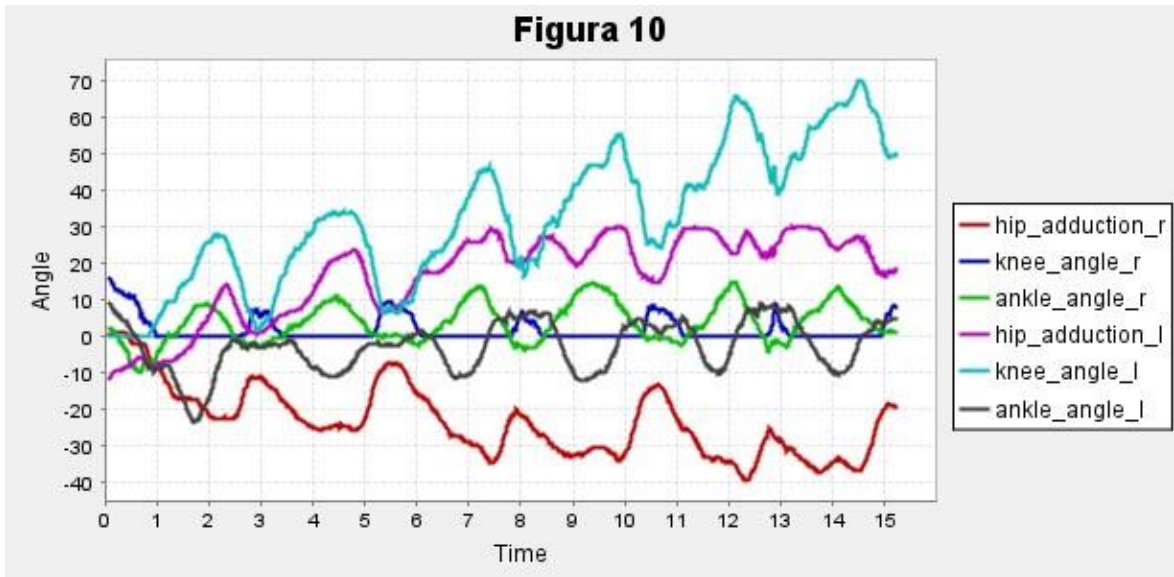
### **3. RESULTADOS Y CONSLCUSIONES.**

Esta sección se enfocará en el análisis de resultados para el sujeto 1, el cual lleva la configuración de sensores original. Esta configuración no se mantuvo para todos los participantes debido a que uno de los sensores presentó mucho ruido, por lo cual este fue removido para las siguientes pruebas.

#### **3.1. Análisis de resultados**

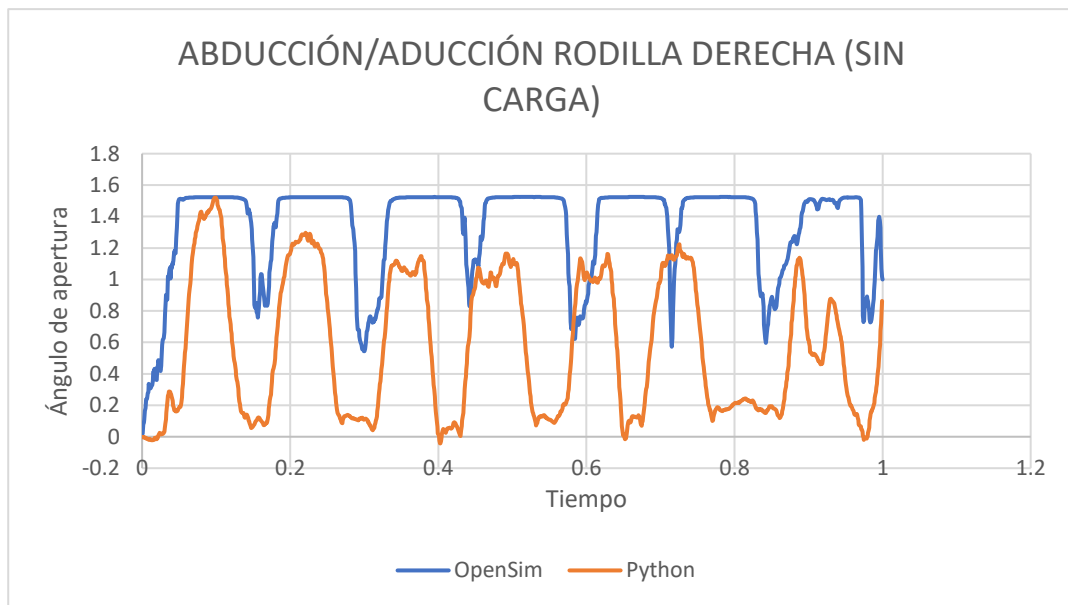
##### **3.1.1. Análisis de los participantes sin carga**

Puesto que se está analizando el primer participante, se comparará la variación del ángulo desarrollado para cada tipo de movimiento que el software OpenSim reconoce para cada segmento/articulación del modelo en el que se está trabajando. Las curvas que el programa proporciona de acuerdo con el modelo utilizado son abducción/aducción rodilla derecha, abducción/aducción rodilla izquierda, abducción/aducción cadera derecha, abducción/aducción cadera izquierda, flexo/extensión tobillo derecho, flexo/extensión tobillo izquierdo. Las curvas para las diferentes secciones se pueden observar en la Figura 10.



**Figura 10.** Curvas para el sujeto 1 sin carga (Software OpenSim).

La primera prueba por analizar será del participante número 1 sin carga. Este caso se representa en la Figura 11.



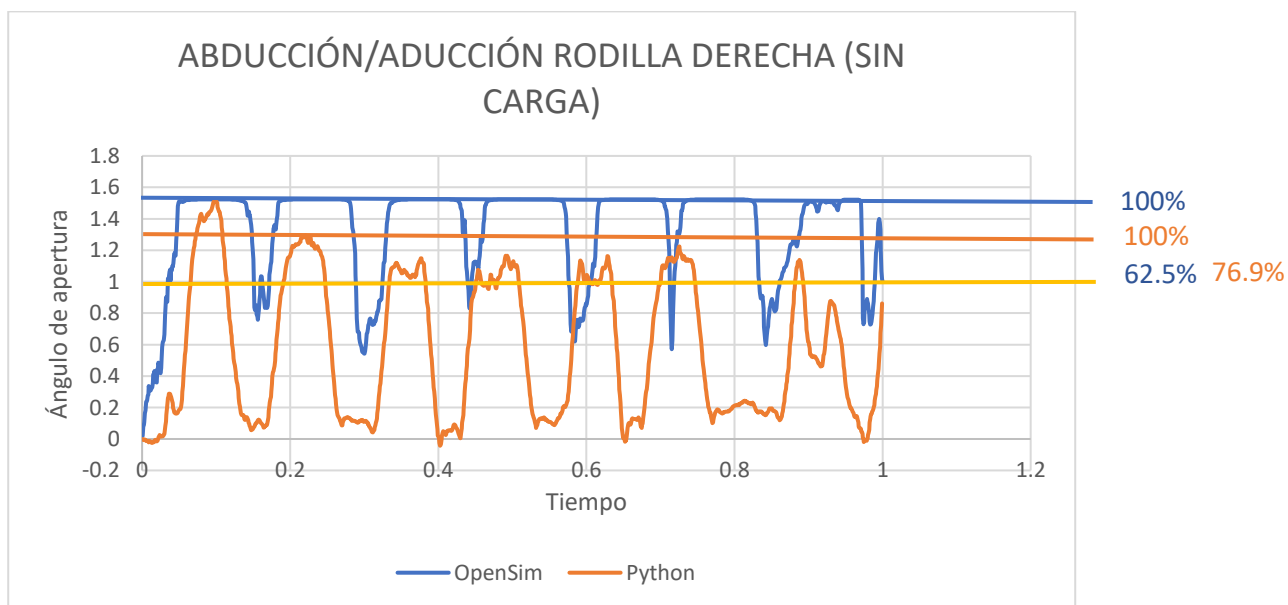
**Figura 11.** Curva normalizada abducción/aducción rodilla derecha sin carga para el sujeto 1.

En la Figura 11 se puede identificar que el patrón angular que se sigue es el mismo para las dos curvas, teniendo un crecimiento hasta un pico en el que se estabiliza durante un corto periodo de tiempo y posteriormente decreciendo. Este comportamiento es repetitivo, pues el participante realizó el mismo movimiento durante el tiempo que duró la prueba. Además, existe un desfase en el tiempo

que poco a poco se vuelve más notable pues los picos que presenta la curva de OpenSim permanece por un periodo de tiempo mayor que en la curva obtenida por Python.

Pese a que las gráficas presentan una misma tendencia, los valores que estas presentan para un mismo instante no son lo mismo. Por tanto, el error existente es variable a lo largo del tiempo. Para estimar el error existente relativo a los datos procesados por medio del presente trabajo se utilizarán dos técnicas. En primera instancia se graficarán líneas de nivel porcentual en cada curva y se obtendrá la diferencia para un mismo nivel angular. Como segundo método se calculará el error existente entre los picos de una curva y otra, para obtener un error promedio.

En la Figura 12 se puede observar que las líneas porcentuales muestran una brecha de un 14.4% sobre un mismo nivel para los valores angulares entregados por las dos opciones de procesamiento de datos. Por otro lado, en la Tabla 2, se presenta el error obtenido por medio de la diferencia existente entre los picos de cada curva (7 picos para este intervalo de estudio), el error que existe entre una curva y otra ronda entre el 14.4 y 19.5%, para el procesamiento de datos de un participante sin carga añadida. Estos datos podrían indicar que la fiabilidad de OpenSim para el procesamiento de datos no es confiable, sin embargo, esta puede darnos una idea de que tipo de ejercicio y con que amplitud se está desarrollando en el sujeto de estudio. Además de si este presenta un aumento, disminución o mantiene igual la amplitud de sus movimientos.

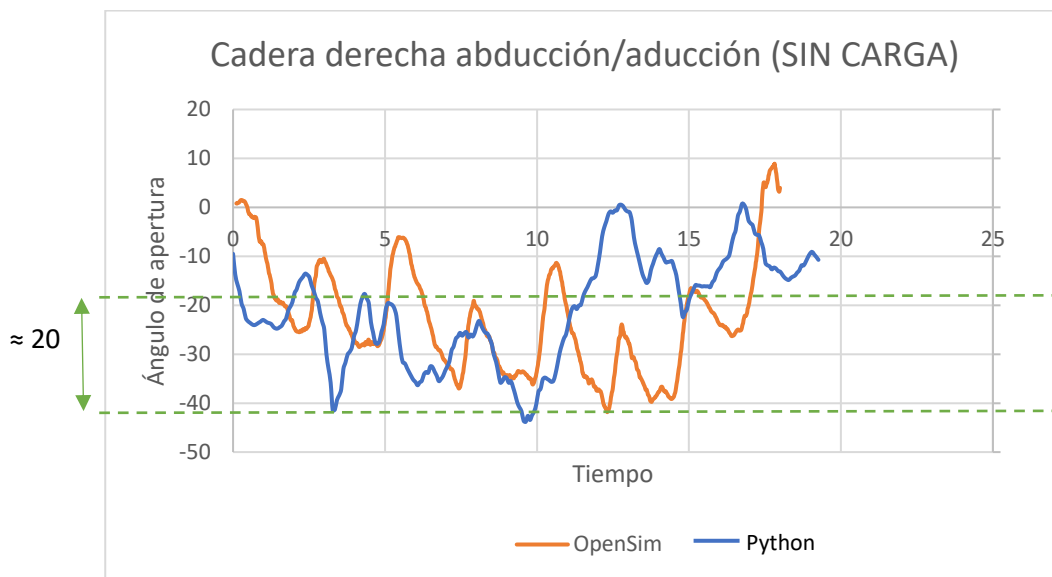


**Figura 12.** Curva abducción/aducción rodilla derecha sin carga con líneas porcentuales para el sujeto 1.

Pico	OpenSim	Python	Error relativo
1	1.52	1.50	0.01
2	1.52	1.29	15.13
3	1.52	1.12	26.31
4	1.52	1.13	25.00
5	1.52	1.14	25.00
6	1.52	1.22	19.73
7	1.51	1.13	25.16
			19.47

**Tabla 2.** Tabla de error relativo entre curvas obtenidas para rodilla derecha sin carga.

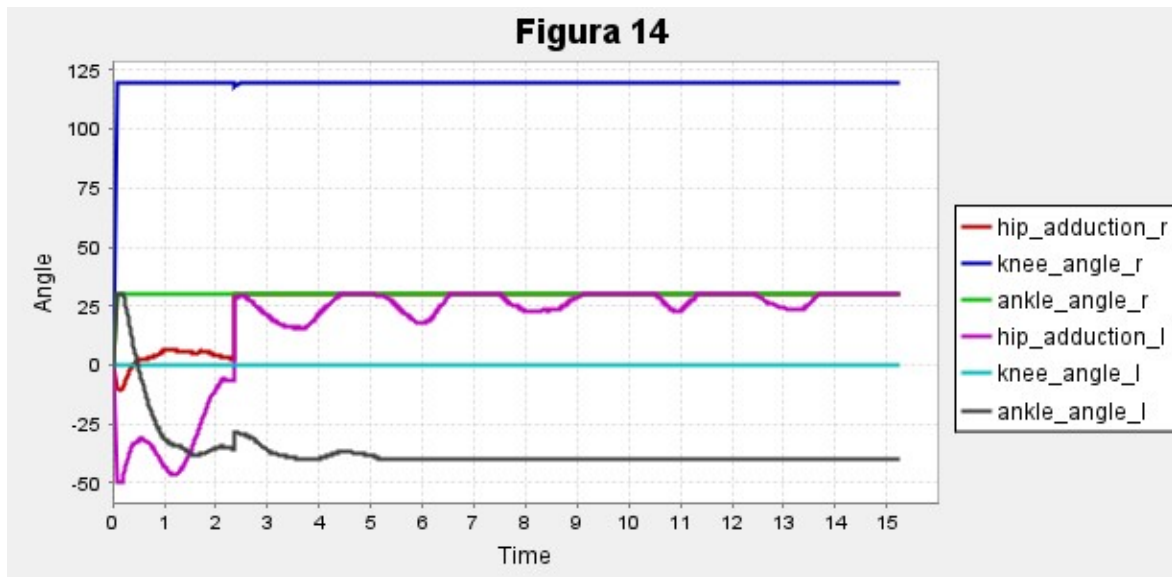
Las curvas para otra sección del modelo se muestran en la Figura 13. Como se puede observar se sigue manteniendo una tendencia, pero de igual manera los datos distan mucho entre un tipo de procesamiento y otro. Los datos reflejan un patrón de picos y valles con tendencia creciente para la cadera derecha sin carga. De estos datos podemos determinar que la amplitud que se presenta para diferentes segmentos corporales es similar, pues entre sus picos y valles se mantiene una amplitud del alrededor de 20 grados. Esto puede indicar que ciertos segmentos realizan un movimiento de profundidad similar al realizar las pruebas sin carga, y que esta amplitud se mantiene pese a la diferencia de la posición angular que presente cada segmento.



**Figura 13.** Curva abducción/aducción cadera derecha para el sujeto 1.

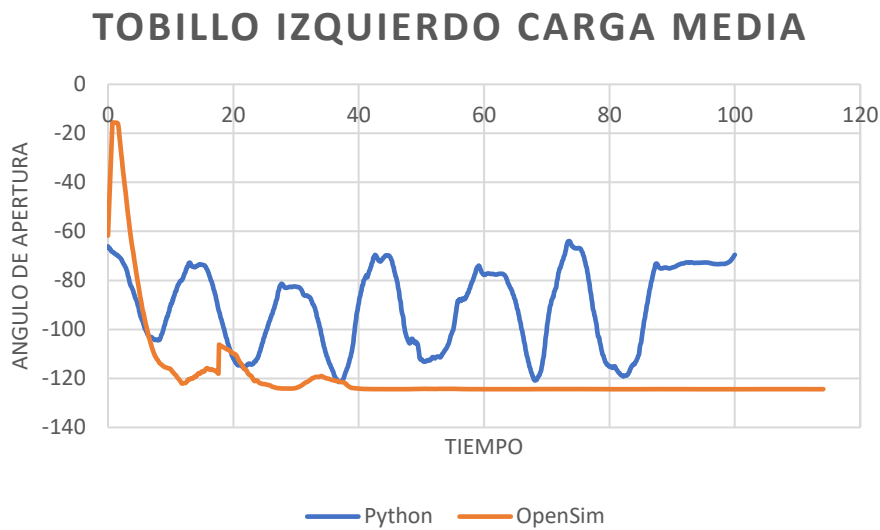
### 3.1.2. Análisis de los participantes con carga media

Como se muestra en la Figura 14, para el participante 1 con una carga media, los resultados obtenidos con OpenSim y los obtenidos por Python muestran escasa similitud. Esto se debe a que los resultados del programa OpenSim no muestran cambio en los ángulos para la mayoría de los segmentos. Los resultados arrojados por OpenSim muestran una gráfica decreciente que se vuelve constante a partir de cierto instante de tiempo. Se puede observar que todas las curvas obtenidas para una carga media se aplanan al llegar a los 2.4s de prueba (con excepción de la curva de abducción cadera izquierda). Esto indica un error en el procesamiento de los datos por parte del software, o un mal funcionamiento de los sensores IMUs durante estas pruebas.



**Figura 14.** Curvas para el sujeto 1 con carga media (Software OpenSim).

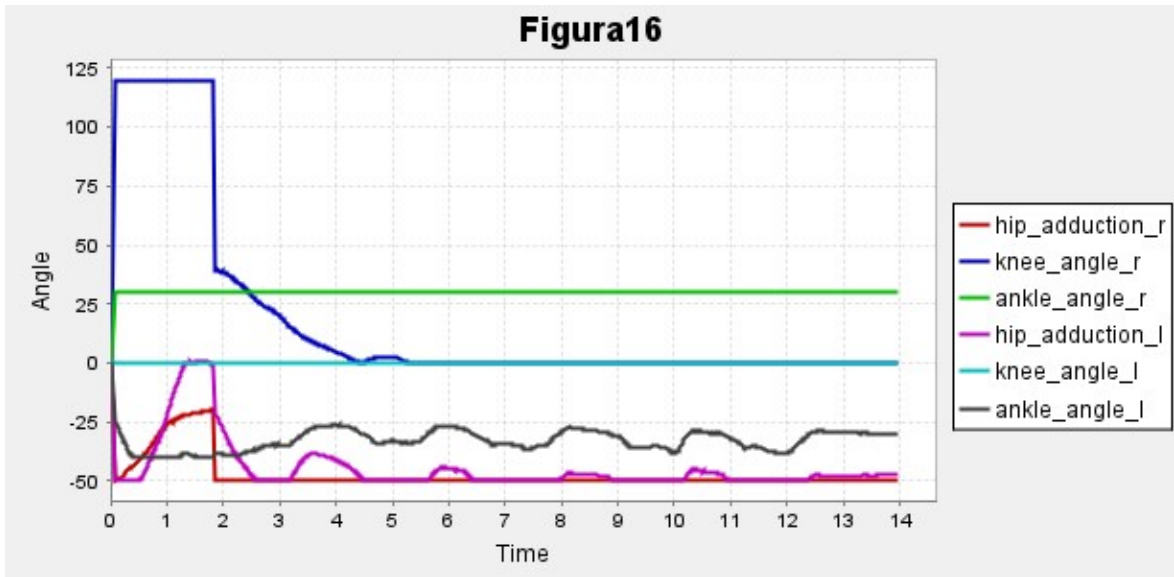
Al realizar la comparación de las curvas de la Figura 14 con las curvas obtenidas en Python para las pruebas del sujeto 1 bajo la acción de una carga media, y bajo los mismos parámetros que fueron establecidos para las pruebas sin carga, se obtuvieron resultados discordantes que dejan de mostrar similitud y no pueden ser comparables, así como se puede observar en la Figura 15.



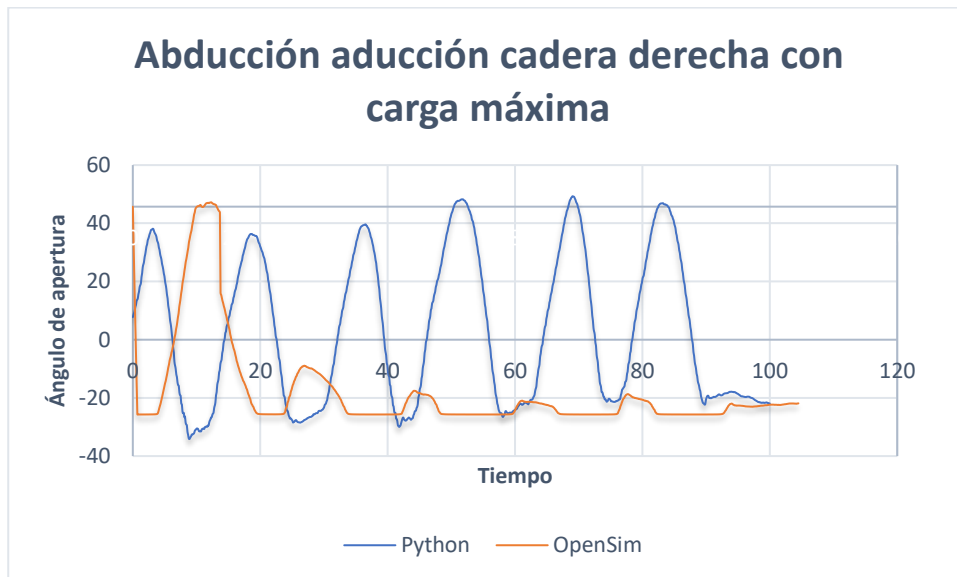
**Figura 15.** Curva tobillo izquierdo sujeto 1 con carga media.

### 3.1.3. Análisis de los participantes con carga máxima

En la Figura 16 se puede apreciar el análisis con carga máxima para el participante 1. Las curvas con carga máxima presentan el mismo problema que el reflejado en las curvas con carga media. Al igual que en el caso anterior ciertas curvas presentadas tienden a aplanarse a partir de 2.0s, lo que confirma un error en el registro de datos de los IMUs para las pruebas de carga. Es posible que llegado a cierto instante los IMUs dejaron de registrar el movimiento del participante adecuadamente, lo que hace que los valores de ciertos sensores no puedan ser comparados con los valores obtenidos por medio de otro tipo de procesamiento de datos. Sin embargo, las curvas abducción cadera izquierda y flexión tobillo izquierdo muestran un patrón de picos y valles indicando que estas dos secciones si registraron datos durante todo el periodo de prueba. En la gráfica 9 se muestra la comparación de estas curvas.



**Figura 16.** Curvas del sujeto 1 con carga máxima (Software OpenSim).



**Figura 17.** Comparación curvas abducción/aducción con carga máxima.

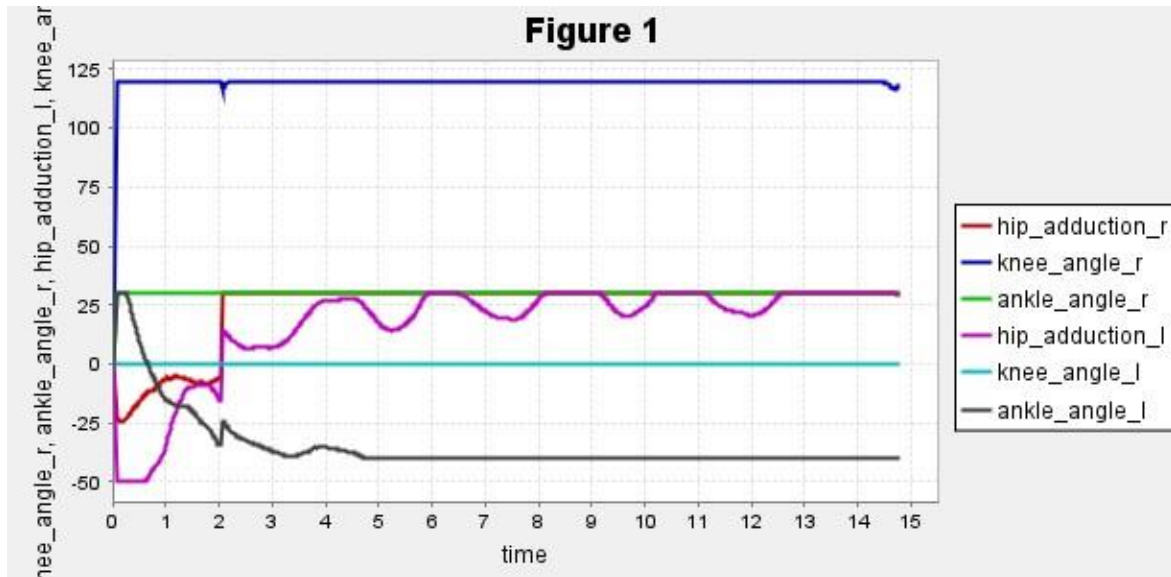
En la Figura 17 se puede observar que en un inicio la amplitud del movimiento estaba oscilando en un rango similar al que se presenta para las curvas procesadas por medio del presente trabajo, pero a partir de los 2 segundos el resultado de OpenSim decrece y oscila en un rango menor al que maneja la curva obtenida en Python. También se puede notar un aplanamiento en los valles.

### 3.1.4. Análisis del participante sin exosuit

En la Figura 18, se presentan el análisis del participante 1 sin el exosuit y sin carga. Estas curvas presentan la misma tendencia que las curvas de carga media y carga máxima, lo cual afirma la



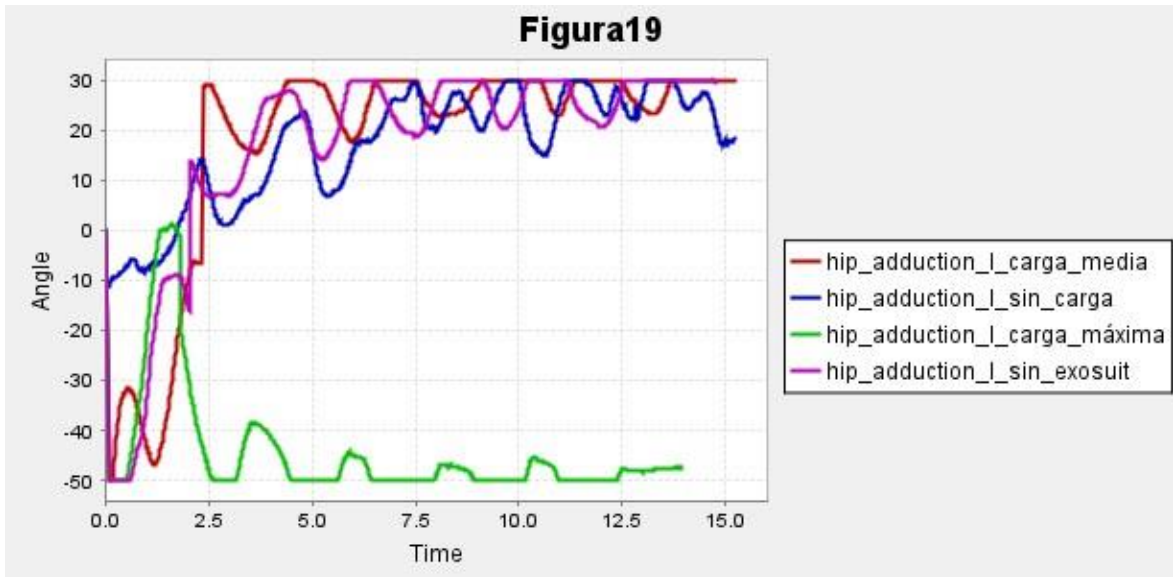
posibilidad de un error en el funcionamiento de los IMUs al momento de recolectar datos para ciertos sensores. Se mantiene el comportamiento para los distintos segmentos y se muestra un aplanamiento en las curvas a partir de 2s. Sin embargo, la curva de la cadera izquierda sí tiene un comportamiento oscilatorio. es similar con las curvas presentadas en las pruebas de carga media y carga máxima, lo cual puede indicar que el sensor destinado a esta sección fue el único que siguió trabajando al menos de manera parcial.



**Figura 18.** Curvas sujeto1 para la prueba final sin exosuit (Software OpenSim).

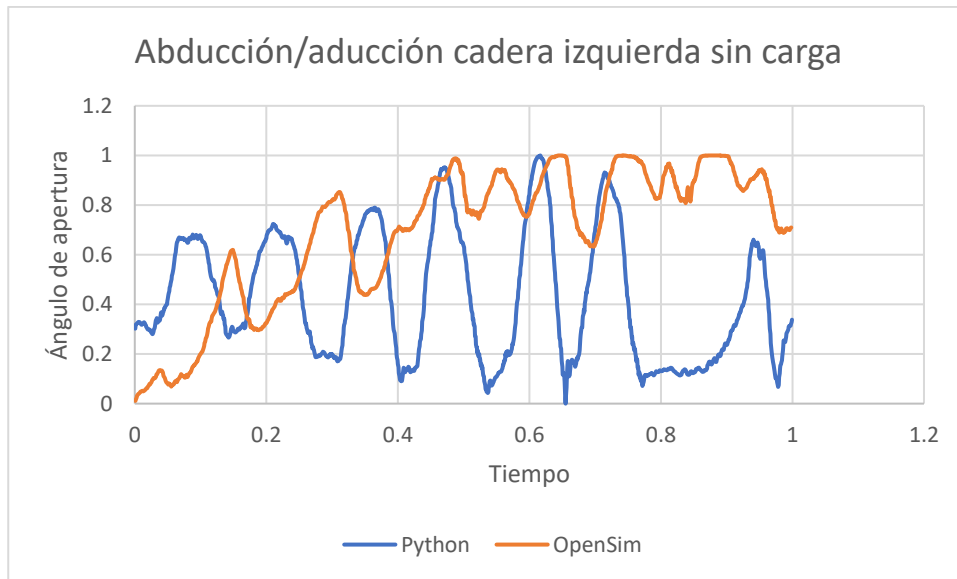
### 3.1.5. Análisis de las curvas obtenidas para cadera izquierda

Finalmente, en la Figura 19 se realiza una comparativa de las curvas de abducción/aducción para las 4 pruebas registradas de la cadera izquierda del participante 1. Se observa que las curvas presentan una misma tendencia y oscilan en un rango similar con excepción de la prueba realizada con carga máxima, la cual oscila alrededor de otros valores, pero mantiene un rango de oscilación similar. También es notorio que las curvas de carga media y la curva final sin carga se aplanan en los 30°, lo que se asocia de la misma manera al error en el registro de datos.



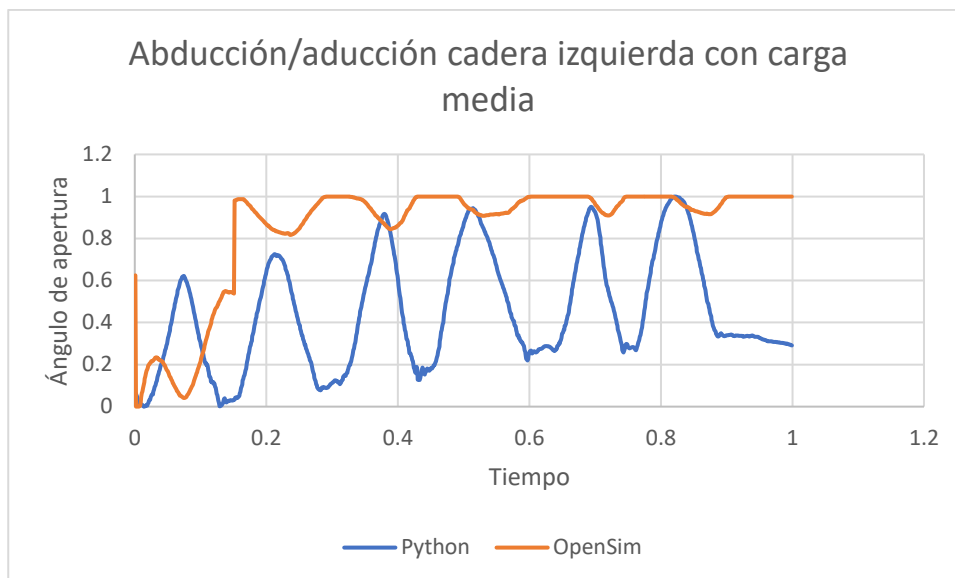
**Figura 19.** Curvas sujeto 1 abducción cadera izquierda (Software OpenSim).

En la Figura 20 se puede observar la comparación de la curva procesada por Python y por OpenSim para la prueba realizada al sujeto 1 sin carga.

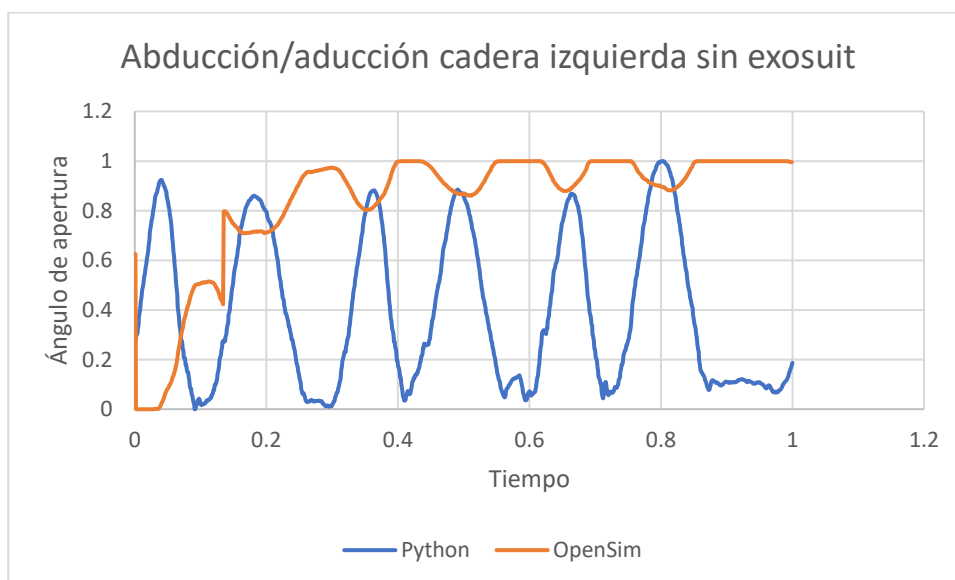


**Figura 20.** Comparación curvas abducción/aducción para cadera izquierda sin carga.

En la Figura 20 se puede observar que la amplitud existente entre picos y valles para las curvas obtenidas por OpenSim es menor que las que se obtienen en las curvas obtenidas por medio de Python, pero los picos presentes en la gráfica tienen valores muy similares, al contrario de sus valles que cada vez distan más unos de otros. Este es un comportamiento que se repite para las demás pruebas como se puede observar en las Figuras 21 y 22.



**Figura 21.** Comparación curvas abducción/aducción para cadera izquierda con carga media.



**Figura 22.** Comparación curvas abducción/aducción para cadera izquierda sin exoesqueleto

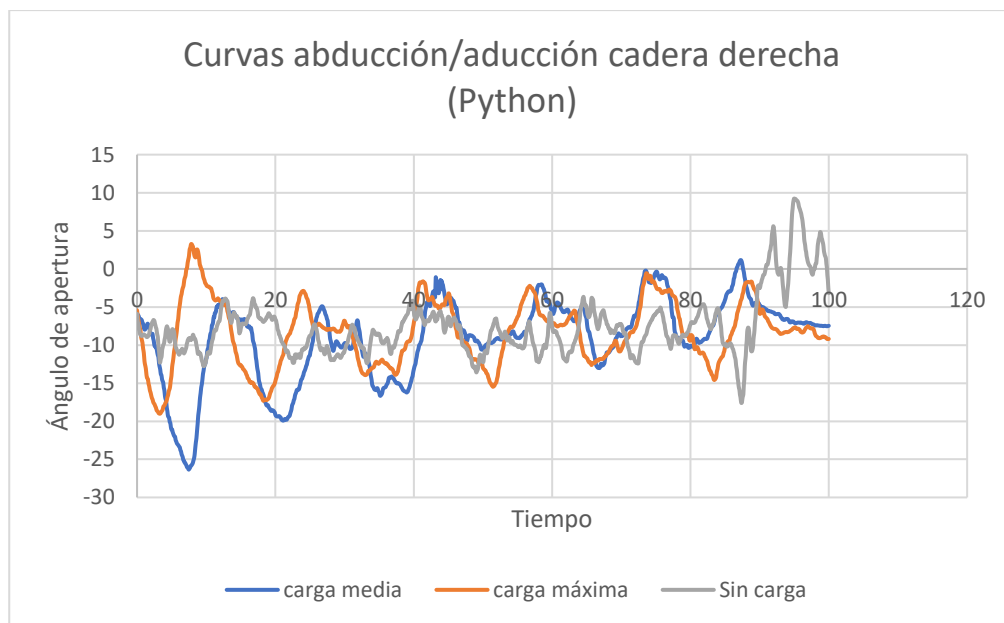
Este comportamiento asevera la idea de que los sensores utilizados durante estas pruebas no recopilaban los datos adecuadamente durante la toma de datos, esto sumado a las limitaciones de OpenSim en cuanto a los segmentos corporales que son reconocibles para el modelo musculoesquelético utilizado, dificultan el tener resultados confiables.

Los resultados mostrados en esta sección nos permiten determinar que por el momento OpenSim no es la herramienta más adecuada para el análisis y procesamiento de datos recopilados por IMUS en ambientes no controlados, pues parte de los problemas se deben a que desde un inicio la orientación de los sensores no pueden ser alineados exactamente con el sistema de referencia global de OpenSim,

lo cual hace que la simulación sea imperfecta y por ende los resultados disten en exactitud pero mantengan tendencias similares. Este problema también acarrea el hecho de que al no tener la misma alineación todos los sensores, y al no poder cambiar su orientación individualmente, sino que el programa y el modelo musculoesquelético fuerza a cambiar la orientación de todo el sistema de sensores a la vez, existen secciones que presentan un movimiento errático, teniendo como resultado curvas con amplitudes incompletas como se observo en el análisis de las curvas para la cadera izquierda.

### 3.1.6. Comparación de curvas con distintos tipos de carga

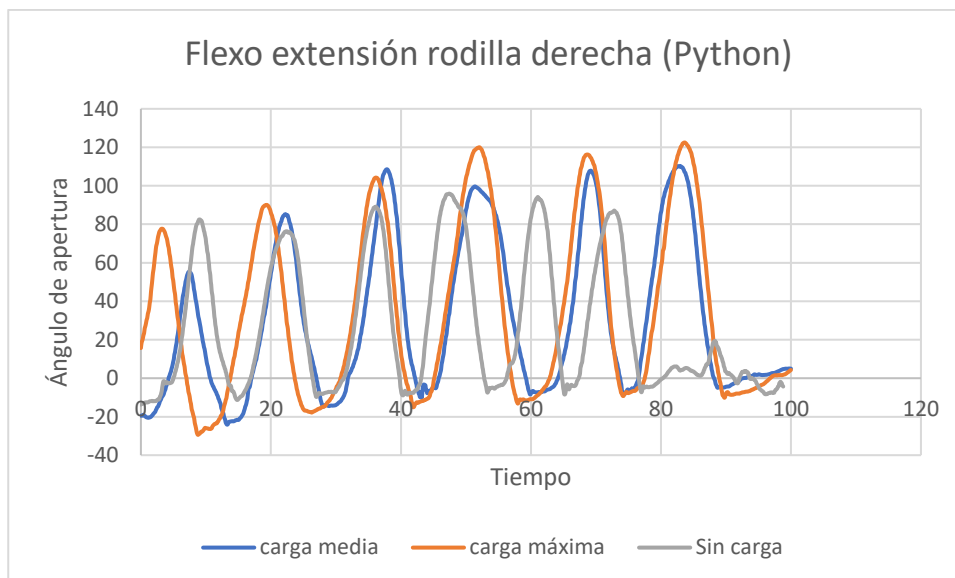
Finalmente, con la intención de determinar si el uso del exosuit es beneficioso para el sujeto durante las distintas pruebas, se va a comparar las curvas obtenidas por medio de Python como se puede observar en la Figura 23.



**Figura 23.** Comparación de curvas abducción/aducción para cadera derecha con distintos tipos de carga.

En la Figura 23 se observa que la amplitud de las curvas de carga máxima y carga media son similares, pero también es notorio que la amplitud de la prueba sin carga es ligeramente menor, lo cual podría indicar que al realizar las pruebas con mayor carga es cuando el exosuit demuestra ser más útil y brindar un mayor apoyo al sujeto.

Al realizar la comparación de las curvas para otro segmento obtenemos los resultados presentados en la Figura 24.



**Figura 24.** Comparación de curvas flexo extensión rodilla derecha con distintos tipos de carga.

Los resultados mostrados en la Figura 24 coinciden con el análisis realizado para la Figura 23, lo cual confirma la utilidad del exosuit para ejercicios de carga, siendo más útil mientras mayor sea la carga, demostrando ser una herramienta muy valiosa en cuanto a ergonomía para trabajos que requieren de esfuerzos grandes y que puedan comprometer la salud del trabajador.

### 3.2. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para la recolección, depuración y procesamiento de datos obtenidos por sensores inerciales (IMU) colocados en distintas partes de una persona y bajo un movimiento definido. Una vez obtenidos los datos se simuló las pruebas realizadas en el software OpenSim y se comparó con otros métodos desarrollados. Una vez analizados los datos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La organización de los datos para los participantes permite una optimización del procesamiento de estos, simplificando la ejecución de procesos repetitivos que llevan una misma secuencia de acciones.
- El procesamiento de los datos permite que estos puedan ser usados de forma adecuada, pues los datos recolectados en la primera etapa del proyecto no pueden ser interpretados por el software OpenSim debido a errores puntuales en su recolección.
- Las gráficas de las pruebas estáticas para cada participante permiten que se pueda apreciar el rango en que los datos se aproximan a una constante, el cual es el idóneo para tomar un valor más preciso que represente su posición.
- Los datos que registran los IMU's no cuentan con un valor que represente la posición inicial del participante por lo cual es necesario obtener estos datos por medio del promedio de los valores recolectados durante una prueba estática.

- El software OpenSim no permite modificar el sistema de referencia de cada sensor individualmente, lo cual fuerza a modificar la orientación de todos los sensores a la vez, imposibilitando el que todos se encuentren bien alineados con respecto al sistema de referencia global del programa OpenSim.
- OpenSim es capaz de procesar los datos entregados por los IMU's y entregar una respuesta acorde a otros tipos de procesamiento. Sin embargo, por el hecho de estar limitados a un modelo musculoesquelético preexistente, el tipo de movimientos entregados para cada segmento es el permitido por el modelo seleccionado, lo cual reduce el campo de análisis para el sujeto de prueba y puede dar como resultado movimientos erráticos para ciertos segmentos.
- Los sensores IMUs son susceptibles a presentar ruido o dejar de funcionar por instantes de tiempo, lo que implica que para pruebas de corta duración como las que se realizaron a los participantes destinados al análisis de OpenSim, presenten muchos problemas, lo que demuestra que es mejor realizar pruebas que tengan una mayor duración, de este modo si los sensores dejan de funcionar por cierto lapso de tiempo ya se tendría otro rango de tiempo lo suficientemente grande como para obtener un análisis adecuado
- El uso de exoesqueletos mejora la ergonomía del usuario y da soporte para ejercicios que requieran grandes esfuerzos y levantamiento de peso, siendo más útiles mientras mayor sea el esfuerzo que se deba hacer.
- Finalmente, a pesar de las muchas herramientas que presenta OpenSim, el hecho de verse limitado a un modelo no modificable limita y degrada los resultados que se pueden obtener al procesar los datos y simular las pruebas.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bergmann, J. H., Mayagoitia, R. E., & Smith, I. C. (2009). A portable system for collecting anatomical joint angles during stair ascent: A comparison with an optical tracking device. *MDPI*.
- DELSYS INCORPORATED. (2021). *DELSYS Trigno Wireless Biofeedback System*. DELSYS INCORPORATED.
- FREIRE BONILLA, B. A. (2019). *EVALUACION DE DATOS EXPERIMENTALES EN UN MODELO ' OPENSIM DEL COMPORTAMIENTO DEL MOVIMIENTO DE FLEXO EXTENSION DEL CUELLO*. Escuela Politécnica Nacional.
- Hendriks, M. M., Vos-van der Hulst, M., Wijs, R. W., Lotringen, J. H., Geurts, A. C., & Keijsers, N. L. (2022). Using Sensor Technology to Measure Gait Capacity and Gait Performance in Rehabilitation Inpatients with Neurological Disorders. *MDPI*.  
<https://doi.org/10.3390/s22218387>
- Matijevich, E. S., Volgyest, P., & Zelik, K. E. (2021). A Promising Wearable Solution for the Practical and Accurate Monitoring of Low Back Loading in Manual Material Handling. *MDPI*.  
<https://doi.org/10.3390/s21020340>
- Moyano, J., Hernández, M., de la Torre, S., Villacrés, J., Medina, J., Ochoa, M., Ahtty, E., & Aguinaga, G. (2016). *Dolor Lumbar. Guía Práctica Clínica (GPC)*. Ministerio de Salud Pública.
- Ortiz Solano, E. P. (2021). *Implementación de protocolos para el estudio cinemático del cuerpo humano considerado como un sistema biomecánico*. escuela Politécnica Nacional.
- Poitras, I., Dupuis, F., Bielman, M., Campeau-Lecours, A., Mercier, C., Bouyer, L. J., & Roy, J.-S. (2019). Validity and Reliability of Wearable Sensors for Joint Angle Estimation: A Systematic Review. *MDPI*. <https://doi.org/10.3390/s19071555>

Riek, P. M., Best, A. N., & Wu, A. R. (2023). Validation of Inertial Sensors to Evaluate Gait Stability.

*MDPI*. <https://doi.org/10.3390/s23031547>

SimTK. (2019). *OpenSim* (4.3) [Software]. Stanford University.

Tamma, A., McKay, C., Cain, S. M., Davidson, S. P., Vitali, R. V., Ojeda, L., & Stirling, L. (2018).

Load-embedded inertial measurement unit reveals lifting performance. *Elsevier*.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.01.014>

Wang, Y., Shan, G., Li, H., & Wang, L. (2022). A Wearable-Sensor System with AI Technology for

Real-Time Biomechanical Feedback Training in Hammer Throw. *MDPI*.

<https://doi.org/10.3390/s23010425>



## 5. ANEXOS

### ANEXO I

#### Código en Python para la eliminación de “ceros”.

```
#important functions to manage the IMU data
#Read data from inertial measurement units
#no siempre son 8 sensores deberás verificar que sean 8 sensores y si no adaptar esta lectura
#import numpy as np #library to manage arrays
import pandas as pd #library to manage data in frames

data=pd.read_excel('Pl_con_exosuit_carga_media_v1_Plot_and_Store_Rep_1.4.xlsx') #solo le cambias el nombre del archivo
time_1=data.iloc[:,2].tolist()
time_2=data.iloc[:,2].tolist()
time_3=data.iloc[:,2].tolist()
time_4=data.iloc[:,2].tolist()
time_5=data.iloc[:,2].tolist()
#time_6=data.iloc[:,2].tolist()
time_7=data.iloc[:,2].tolist()
time_8=data.iloc[:,2].tolist()
w_sensor_1=data.iloc[:,3].tolist()
x_sensor_1=data.iloc[:,5].tolist()
y_sensor_1=data.iloc[:,7].tolist()
z_sensor_1=data.iloc[:,9].tolist()

w_sensor_2=data.iloc[:,13].tolist()
x_sensor_2=data.iloc[:,15].tolist()
y_sensor_2=data.iloc[:,17].tolist()
z_sensor_2=data.iloc[:,19].tolist()

w_sensor_3=data.iloc[:,23].tolist()
x_sensor_3=data.iloc[:,25].tolist()
y_sensor_3=data.iloc[:,27].tolist()
z_sensor_3=data.iloc[:,29].tolist()

w_sensor_4=data.iloc[:,33].tolist()
x_sensor_4=data.iloc[:,35].tolist()
y_sensor_4=data.iloc[:,37].tolist()
z_sensor_4=data.iloc[:,39].tolist()

w_sensor_5=data.iloc[:,43].tolist()
x_sensor_5=data.iloc[:,45].tolist()
y_sensor_5=data.iloc[:,47].tolist()
z_sensor_5=data.iloc[:,49].tolist()

w_sensor_7=data.iloc[:,53].tolist()
x_sensor_7=data.iloc[:,55].tolist()
y_sensor_7=data.iloc[:,57].tolist()
z_sensor_7=data.iloc[:,59].tolist()

w_sensor_8=data.iloc[:,63].tolist()
x_sensor_8=data.iloc[:,65].tolist()
```

```

#w_sensor_8=data.iloc[:,73].tolist()
#x_sensor_8=data.iloc[:,75].tolist()
#y_sensor_8=data.iloc[:,77].tolist()
#z_sensor_8=data.iloc[:,79].tolist()

#function to eliminate zeros in IMUs data
def nonzeros(a,b,c,d,e): # 'a' must be the time data
    f=len(b)
    i=f
    while i>=0:
        i-=1
        if b[i]==0:
            b[i]='s'
        else:
            b[i]=b[i]
    i=f
    while i>=0:
        i-=1
        if b[i]=='s':
            del a[i]
            del b[i]
            del c[i]
            del d[i]
            del e[i]
        else:
            a[i]=a[i]
            b[i]=b[i]
            c[i]=c[i]
            d[i]=d[i]
            e[i]=e[i]
    return a,b,c,d,e
time_1,w_sensor_1,x_sensor_1,y_sensor_1,z_sensor_1=nonzeros(time_1,w_sensor_1,x_sensor_1,y_sensor_1,z_sensor_1)
time_2,w_sensor_2,x_sensor_2,y_sensor_2,z_sensor_2=nonzeros(time_2,w_sensor_2,x_sensor_2,y_sensor_2,z_sensor_2)
time_3,w_sensor_3,x_sensor_3,y_sensor_3,z_sensor_3=nonzeros(time_3,w_sensor_3,x_sensor_3,y_sensor_3,z_sensor_3)
time_4,w_sensor_4,x_sensor_4,y_sensor_4,z_sensor_4=nonzeros(time_4,w_sensor_4,x_sensor_4,y_sensor_4,z_sensor_4)
time_5,w_sensor_5,x_sensor_5,y_sensor_5,z_sensor_5=nonzeros(time_5,w_sensor_5,x_sensor_5,y_sensor_5,z_sensor_5)
#time_6,w_sensor_6,x_sensor_6,y_sensor_6,z_sensor_6=nonzeros(time_6,w_sensor_6,x_sensor_6,y_sensor_6,z_sensor_6)
time_7,w_sensor_7,x_sensor_7,y_sensor_7,z_sensor_7=nonzeros(time_7,w_sensor_7,x_sensor_7,y_sensor_7,z_sensor_7)
time_8,w_sensor_8,x_sensor_8,y_sensor_8,z_sensor_8=nonzeros(time_8,w_sensor_8,x_sensor_8,y_sensor_8,z_sensor_8)

#save the data into an excel file:

col1 = "time 1"
col2 = "w_sensor_1"
col3 = "x_sensor_1"
col4 = "y_sensor_1"
col5 = "z_sensor_1"

col6 = "time 2"
col7 = "w_sensor_2"
col8 = "x_sensor_2"
col9 = "y_sensor_2"
col10 = "z_sensor_2"

col11 = "time 3"
col12 = "w_sensor_3"
col13 = "x_sensor_3"
col14 = "y_sensor_3"
col15 = "z_sensor_3"

col16 = "time 4"
col17 = "w_sensor_4"
col18 = "x_sensor_4"
col19 = "y_sensor_4"
col20 = "z_sensor_4"

col21 = "time 5"
col22 = "w_sensor_5"
col23 = "x_sensor_5"
col24 = "y_sensor_5"
col25 = "z_sensor_5"

#col26 = "time 6"
#col27 = "w_sensor_6"
#col28 = "x_sensor_6"
#col29 = "y_sensor_6"
#col30 = "z_sensor_6"

col31 = "time 7"
col32 = "w_sensor_7"
col33 = "x_sensor_7"
col34 = "y_sensor_7"
col35 = "z_sensor_7"

col36 = "time 8"
col37 = "w_sensor_8"

```

```

col38 = "x_sensor_8"
col39 = "y_sensor_8"
col40 = "z_sensor_8"

data_1 = pd.DataFrame((col1:time_1,col2:w_sensor_1,col3:x_sensor_1,col4:y_sensor_1,col5:z_sensor_1))
data_2 = pd.DataFrame((col6:time_2,col7:w_sensor_2,col8:x_sensor_2,col9:y_sensor_2,col10:z_sensor_2))
data_3 = pd.DataFrame((col11:time_3,col12:w_sensor_3,col13:x_sensor_3,col14:y_sensor_3,col15:z_sensor_3))
data_4 = pd.DataFrame((col16:time_4,col17:w_sensor_4,col18:x_sensor_4,col19:y_sensor_4,col20:z_sensor_4))
data_5 = pd.DataFrame((col21:time_5,col22:w_sensor_5,col23:x_sensor_5,col24:y_sensor_5,col25:z_sensor_5))
#data_6 = pd.DataFrame((col26:time_6,col27:w_sensor_6,col28:x_sensor_6,col29:y_sensor_6,col30:z_sensor_6))
data_7 = pd.DataFrame((col31:time_7,col32:w_sensor_7,col33:x_sensor_7,col34:y_sensor_7,col35:z_sensor_7))
data_8 = pd.DataFrame((col36:time_8,col37:w_sensor_8,col38:x_sensor_8,col39:y_sensor_8,col40:z_sensor_8))

#data_final=pd.concat([data_1,data_2,data_3,data_4,data_5,data_6,data_7,data_8], axis=1)
data_final=pd.concat([data_1,data_2,data_3,data_4,data_5,data_7,data_8], axis=1)

data_final.to_excel('P1_con_exosuit_mod_carga_media_v1_Plot_and_Store_Rep_1.4.xlsx', sheet_name='sheet1', index=False) #change the name of the file if you need.

```

## ANEXO II

### Código Python para adaptar los datos al formato de OpenSim.

```
import pandas as pd

# Lee el archivo de Excel
df = pd.read_excel('P1_final_mod_sin_exosuit_v1_Plot_and_Store_Rep_1.5.xlsx')

# Abre un archivo de texto para escribir los datos
with open('P1_final_mod_sin_exosuit_v1_Plot_and_Store_Rep_1.5.txt', 'w') as f:
    # Itera sobre cada fila del DataFrame
    for index, row in df.iterrows():
        # Escribe el tiempo y un tabulador
        f.write(str(row[0]) + '\t')
        # Itera sobre los 8 quaternions
        for i in range(8):
            # Escribe los valores del quaternion separados por comas y un tabulador al final
            f.write(str(row[i*4+1]) + ',' + str(row[i*4+2]) + ',' + str(row[i*4+3]) + ',' + str(row[i*4+4]) + '\t')
        # Escribe un salto de línea al final de la fila
```