



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ADAPTACIÓN DE MODELO BIOMECÁNICO DE  
CADERA EN OPENSIM**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ANTONIO ISAIAS GARCÍA REYES**

**[antonio.garcia@epn.edu.ec](mailto:antonio.garcia@epn.edu.ec)**

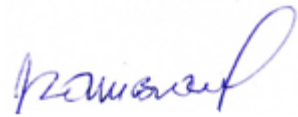
**DIRECTOR: Ing. ZAMBRANO OREJUELA OSCAR IVAN  
MSc.**

**[ivan.zambrano@epn.edu.ec](mailto:ivan.zambrano@epn.edu.ec)**

**Quito, Febrero 2023**

## **CERTIFICACIÓN**

Por medio del presente certifico que el proyecto de grado titulado “ADAPTACIÓN DE MODELO BIOMECÁNICO DE CADERA EN OPENSIM” ha sido elaborado por Antonio Isaias García Reyes.



---

Ing. Iván Zambrano MSc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Antonio Isaias García Reyes**, declaro que este documento representa mi propio trabajo, y no ha sido previamente incluido para ningún grado o calificación profesional.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

**Antonio Isaias García Reyes**

Autor

## **DEDICATORIA**

Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta.

A mis padres, por acompañarme en cada paso que doy en la búsqueda de ser mejor persona y profesional.

A mis hermanos, por todo su apoyo incondicional, espero les sirva de ejemplo de que todo se puede lograr.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Le agradezco al director de este trabajo de investigación, al Ing. Iván Zambrano, MSc por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada, de igual manera agradezco a William Venegas, PhD, por su tiempo y guía para transmitirme los conocimientos necesarios.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
GLOSARIO.....	12
RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos .....	16
Alcance .....	16
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Biomecánica.....	17
1.2 Anatomía de la pierna humana .....	17
1.3 Articulación de la cadera .....	18
1.4 Biomecánica de la cadera .....	19
1.4.1 Movimiento de Flexión-extensión.....	19
1.4.2 Movimientos de abducción y aducción. ....	20
1.4.3 Movimiento de rotación interna y externa .....	21
1.5 Fuerzas que actúan en la cadera.....	21
1.6 Ciclo de la marcha .....	22
1.7 Captura de movimiento .....	22
1.8 Fotogrametría.....	23
1.9 Kinescan .....	24
1.10 Video análisis .....	24
1.11 OpenSim. ....	24
1.11.1 Funciones .....	25
1.11.2 Repositorio de modelos y simulaciones.....	26
1.11.3 Interfaz gráfica de usuario de OpenSim.....	28
1.11.4 Secuencia de comandos.....	29

1.11.5 Limitaciones .....	30
1.11.6 El modelo OpenSim .....	30
1.11.7 Importación de datos experimentales .....	31
1.11.8 Escalado .....	31
1.11.9 Métodos inversos.....	31
1.11.9.1 Cinemática inversa .....	32
1.11.9.2 Dinámica inversa .....	33
1.11.9.3 Simulaciones .....	33
1.11.9.4 Análisis de Simulaciones .....	34
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>35</b>
2.1 Modelo musculoesquelético .....	35
2.1.1 Acceso al modelo.....	36
2.1.2 Geometría del modelo musculo esquelético 2392 .....	38
2.1.3 Modelo 2392 en Opensim .....	38
2.1.4 Escalado del Modelo 2392.....	40
2.1.5 Cinemática inversa Modelo 2392.....	44
2.2 Análisis de movimiento .....	47
2.2.1 Captura de video .....	47
2.2.2 Obtención de trayectorias .....	49
2.3 Técnica de Fotogrametría .....	50
2.3.1 Marcadores de referencia .....	51
2.3.2 Protocolo de pruebas.....	52
2.4 Programación utilizada.....	53
<b>3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
3.1 Escalado del modelo de Opensim .....	54
3.2 Análisis cinemático.....	58
3.2.1 Posición Angular .....	58
3.2.2 Velocidad Angular.....	59
3.2.3 Aceleración Angular.....	60
3.2.4 Movimiento de Flexión de la Cadera.....	61
3.2.5 Movimiento de Aducción de la Cadera .....	63

3.2.6 Movimiento de Rotación de la Cadera .....	64
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>68</b>
4.1 Conclusiones .....	68
4.2 Recomendaciones .....	69
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>717</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>719</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura del miembro inferior .....	17
Figura 1.2 Planos de análisis .....	18
Figura 1.3 Unión coxofemoral .....	18
Figura 1.4 Movimientos de la cadera.....	19
Figura 1.5 Rangos de movimiento de Flexión .....	19
Figura 1.6 Rangos de movimiento de Extensión.....	20
Figura 1.7 Posiciones de abducción de la cadera.....	20
Figura 1.8 Rotación interna y externa .....	21
Figura 1.9 Fuerzas que actúan en la cadera.....	21
Figura 1.10 Ciclo de la marcha humana.....	22
Figura 1.11 Técnica de Fotogrametría .....	23
Figura 1.12. Captura de movimiento mediante fotogrametría .....	23
Figura 1.13 Video análisis a través del software Tracker .....	24
Figura 1.14 Repositorio de Opensim.....	26
Figura 1.15 Repositorio de Opensim.....	27
Figura 1.16 Modelos musculoesqueléticos de Opensim .....	27
Figura 1.17 Modelos musculoesqueléticos de Opensim .....	28
Figura 1.18 Interfaz de OpenSim .....	29
Figura 1.19 Método inverso.....	32
Figura 1.20 Marcadores experimentales .....	32
Figura 1.21 Dinámica Inversa.....	33
Figura 1.22 Simulación.....	33
Figura 2.1 Descarga del modelo .....	36
Figura 2.2 Acceso al modelo.....	37
Figura 2.3 Elección archivo .....	37
Figura 2.4 Articulaciones y ejes del modelo .....	38
Figura 2.5 Actuadores Modelo 2392.....	39
Figura 2.6 Modelo 2392 en Opensim. ....	39
Figura 2.7 Escalado del modelo .....	40

Figura 2.8 Escalado del modelo .....	41
Figura 2.9 Escalado del modelo. ....	41
Figura 2.10 Escalado mediante distancia entre marcadores.....	42
Figura 2.11 Escalado mediante factores de escala.....	43
Figura 2.12 Modelos escalados; izquierda (sujeto 1), centro (modelo genérico), derecha (sujeto 2) .....	43
Figura 2.13 Cinemática Inversa en Opensim .....	45
Figura 2.14 Pesos de marcadores .....	45
Figura 2.15 Marcadores genéricos y experimentales.....	46
Figura 2.16 Propiedades del video.....	47
Figura 2.17 Posiciones de marcadores .....	48
Figura 2.18 Interfaz del software Tracker .....	49
Figura 2.19 Gráficas de posición del marcador: cadera derecha .....	50
Figura 2.20 Gráficas de posición del marcador: cadera media .....	50
Figura 2.21 Laboratorio de bioingeniería, EPN .....	51
Figura 2.22 Marcadores .....	51
Figura 3.1 Modelos escalados; izquierda (sujeto 1), centro (modelo genérico), derecha (sujeto 2) .....	54
Figura 3.2 Resultados modelo genérico.....	55
Figura 3.3 Resultados modelo escalado sujeto 1.....	56
Figura 3.4 Resultados modelo escalado sujeto 2.....	57
Figura 3.5 Posición angular.....	59
Figura 3.6 Velocidad Angular .....	60
Figura 3.7 Aceleración angular.....	61
Figura 3.8 Movimiento de Flexión de la cadera.....	62
Figura 3.9 Movimiento de Aducción de la cadera.....	63
Figura 3.10 Movimiento de Rotación de la cadera .....	64
Figura 3.11 Método SEM para posición angular .....	65
Figura 3.12 Método SEM para velocidad angular .....	66
Figura 3.13 Método SEM para aceleración angular .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Identificación de los marcadores.....	48
<b>Tabla 2.2</b> Colocación de marcadores reflectantes .....	52
<b>Tabla 3.1</b> Resultados posición angular .....	57
<b>Tabla 3.2</b> Resultados posición angular .....	59
<b>Tabla 3.3</b> Resultados velocidad angular .....	60
<b>Tabla 3.4</b> Resultados aceleración angular .....	61
<b>Tabla 3.5</b> Resultados validación posición angular .....	66
<b>Tabla 3.6</b> Resultados validación velocidad angular .....	67
<b>Tabla 3.7</b> Resultados validación aceleración angular. ....	68

## GLOSARIO

GUI.....	(Interfaz gráfica de usuario)
C++.....	(Lenguaje de programación)
IK .....	(Cinemática Inversa)
ID .....	(Dinámica Inversa)
IBV .....	(Instituto de Biomecánica de Valencia)
SEM .....	(Error estándar del promedio)
CMC.....	(Coeficiente de correlación múltiple)

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad adaptar y editar un modelo musculoesquelético de Opensim a condiciones de interés mediante el análisis de movimiento de la extremidad inferior con un enfoque en la articulación de la cadera. Se inicia con la elección del modelo musculoesquelético que simule la caminata, este modelo está disponible en la biblioteca en línea del software Opensim. El modelo musculoesquelético permite cargar y editar puntos de referencia o marcadores obtenidos mediante Fotogrametría y así poder realizar un análisis cinemático de las articulaciones a diferentes condiciones antropométricas.

En la fase experimental se ubica los marcadores reflectantes en el cuerpo humano, en sitios aproximados al modelo de Opensim para aplicar la técnica de Fotogrametría a través del sistema Kinescan. Después se realiza la captura de video a través de un celular para analizar el movimiento mediante el software Tracker, en el cual se asigna un nombre a cada marcador para obtener las trayectorias de cada uno de ellos. Con esto, se puede validar y comparar los resultados de video análisis y los resultados de la fase experimental realizada en el Laboratorio de Bioingeniería de la Escuela Politécnica Nacional. De la misma forma, se compara los resultados del modelo disponible en la biblioteca de Opensim y los modelos musculo esqueléticos editados a características antropométricas propias de cada sujeto.

Una vez que el modelo haya sido adaptado a las condiciones de interés, se realiza un análisis cinemático mediante el uso del software Opensim y Matlab para los modelos musculo esqueléticos, datos de fotogrametría y video análisis, con el fin de obtener una serie de gráficas que describan el movimiento. El proyecto describe la biomecánica de la cadera humana y describe los pasos necesarios tanto en la técnica de fotogrametría, elección y edición del modelo, análisis de movimiento y validación del modelo.

## **ABSTRACT**

The purpose of this project is to adapt and edit an Opensim musculoskeletal model to conditions of interest through the analysis of lower extremity movement with a focus on the hip joint. It starts with the choice of the musculoskeletal model that simulates walking, this model is available in the Opensim software online library. The musculoskeletal model allows you to load and edit reference points or markers obtained by Photogrammetry and thus be able to perform a cinematographic analysis of the joints at different anthropometric conditions.

In the experimental phase, the reflective markers are located on the human body, in places close to the Opensim model to apply the Photogrammetry technique through the Kinescan system. Afterwards, video capture is carried out through a cell phone to analyze the movement using the Tracker software, in which a name is assigned to each marker to obtain the trajectories of each one of them. With this, it is possible to validate and compare the results of the video analysis and the results of the experimental phase carried out in the Bioengineering Laboratory of the National Polytechnic School. In the same way, the results of the model available in the Opensim library and the musculoskeletal models edited to the anthropometric characteristics of each subject are compared.

Once the model has been adapted to the conditions of interest, a kinematic analysis is performed using the Opensim and Matlab software for the musculoskeletal models, photogrammetry data, and video analysis, in order to obtain a series of graphs that describe the movement. The project describes the biomechanics of the human hip and describes the necessary steps both in the photography technique, choice and edition of the model, movement analysis and validation of the model.

## INTRODUCCIÓN

La Biomecánica estudia, analiza y describe el movimiento de los seres vivos, enfocado a un análisis de carácter mecánico, además permite solucionar problemas anatómicos y de movimiento. Es objeto de estudio de biólogos, ingenieros, médicos, físicos, licenciados en ciencias del deporte, etc. [1]

El análisis de movimiento ayuda a solucionar muchos problemas del cuerpo humano, evitar lesiones por malas posturas, identificar movimientos anormales o patológicos de la persona, y así facilitar el diseño de posibles tratamientos o aumentar la eficiencia de los movimientos, por ejemplo, para el mejoramiento de una técnica deportiva. [2]

Para esto, se realiza la simulación biomecánica, la cual sirve para analizar patrones en el movimiento humano, la geometría, cinemática y dinámica de las articulaciones y las propiedades de los músculos, los cuales son los que generan fuerzas y momentos [3]. El trabajo inicia con la elección de un modelo musculoesquelético que simule la marcha humana, el cual está disponible en las bibliotecas del software Opensim, este modelo se utiliza como referencia para recrearlo en la fase experimental del proyecto a través de técnicas de análisis de movimiento mediante fotogrametría y análisis de video a través del software Tracker. Las trayectorias obtenidas de los marcadores de la cadera se exportan al modelo elegido para poder realizar el análisis de diferentes parámetros a condiciones anatómicas propias del sujeto, así mismo se determina los resultados de la simulación del modelo de Opensim con los modelos escalados.

## **Objetivo general**

Adaptar un modelo biomecánico de cadera disponible en Opensim a condiciones específicas de interés con validación de fotogrametría.

## **Objetivos específicos**

- Establecer el modelo biomecánico del caso de estudio.
- Editar modelos matemáticos en Opensim.
- Validar el modelo biomecánico de forma experimental.

## **Alcance**

El propósito del proyecto es el estudio, edición y validación de un modelo biomecánico adaptado a condiciones de interés, en este caso, la caminata humana, este modelo se obtiene de la biblioteca en línea de Opensim y se escala a condiciones antropométricas de la persona. Una vez obtenidos los modelos escalados se realiza el análisis de movimiento mediante gráficas del mismo software.

En cuanto a la fase experimental, se realiza la técnica de Fotogrametría simulando el movimiento de caminata, el cual se captura a través del sistema Kinescan y un dispositivo de grabación para poder realizar el análisis de video mediante el software Tracker, con esto se obtiene las trayectorias que siguen los marcadores en función del tiempo, esto permite desarrollar comparaciones con la simulación biomecánica en Opensim con enfoque en la articulación de la cadera. Los resultados obtenidos en la simulación se validan de forma experimental en el Laboratorio de Bioingeniería mediante el equipo de fotogrametría, técnica que captura el movimiento de caminata, además se determina la fiabilidad mediante la toma de datos de dos sujetos de prueba con diferentes medidas antropométricas.



## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Biomecánica

Se encarga de evaluar el movimiento de un ser vivo y el efecto de fuerzas sobre él. Este análisis puede ser cualitativo, al observar y describir el movimiento, o cuantitativo, que evalúa o mide algún aspecto del movimiento. Sus aplicaciones incluyen:[3]

- Identificación de trastornos de movimiento.
- Prevención, seguimiento y recuperación de lesiones.
- Optimización de movimiento y métodos de entrenamiento.
- Mejoras en aspectos relacionados al rendimiento deportivo.

### 1.2 Anatomía de la pierna humana

El miembro inferior es el conjunto de segmentos, uniones y músculos, los que permiten la ejecución de cierta acción, como caminar, correr y saltar. La (Figura 1.1) muestra los segmentos que componen la pierna humana, los cuales son tres; cadera, pierna y pie. [2]

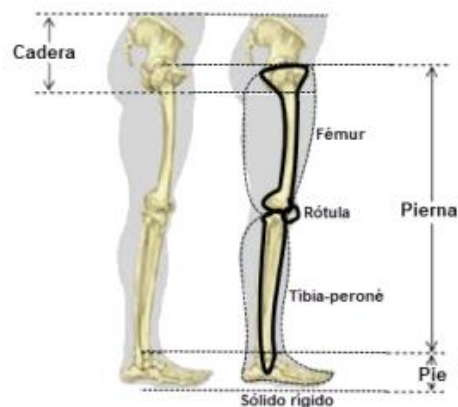
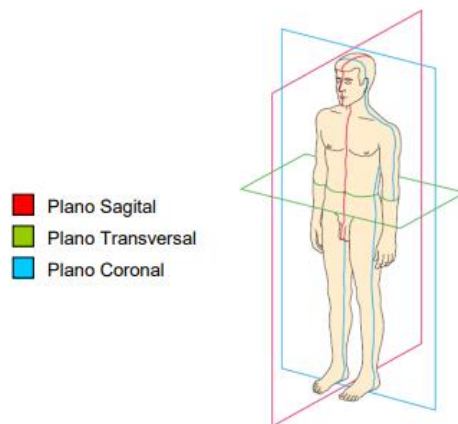


Figura 1.1 Estructura del miembro inferior. [4]

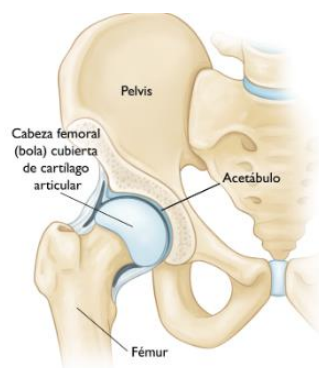
Para el análisis de movimiento, es necesario dividir al cuerpo humano en 3 planos: sagital, transversal y coronal; los mismos se indican en la (Figura 1.2).



**Figura 1.2** Planos de análisis. [5]

### 1.3 Articulación de la cadera

Es la articulación que soporta el mayor peso del cuerpo humano. También se conoce como articulación esférica y está rodeada de músculos, ligamentos y tendones. Cualquier lesión o enfermedad de la cadera afectará negativamente el rango de movimiento de la articulación y su capacidad para soportar peso. (Figura 1.3). [6]



**Figura 1.3** Unión coxofemoral. [6]

## 1.4 Biomecánica de la cadera

Esta articulación cuenta con 3 tipos de movimientos o tres grados de libertad, dichos movimientos se pueden diferenciar por el plano en que se encuentre y el eje de movimiento: [6]

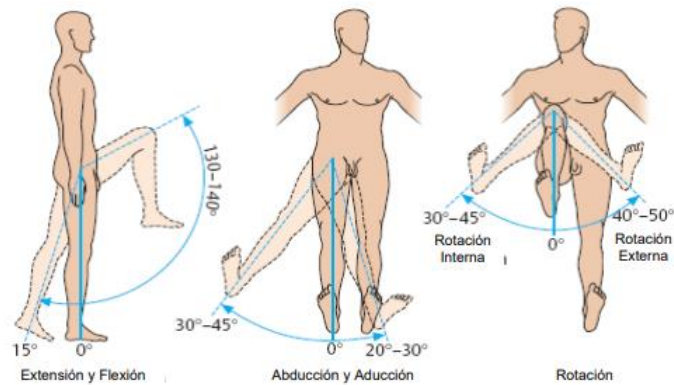


Figura 1.4 Movimientos de la cadera. [5]

### 1.4.1 Movimiento de Flexión-extensión

La flexión es la acción en la cual, el muslo parte de una posición de reposo a una posición que tenga contacto con el tronco o hacia éste, esta acción se ejecuta en el plano sagital. [7]

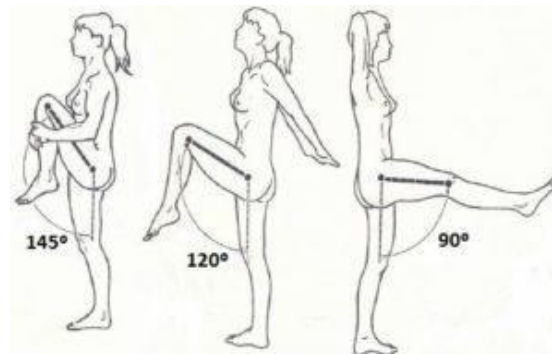
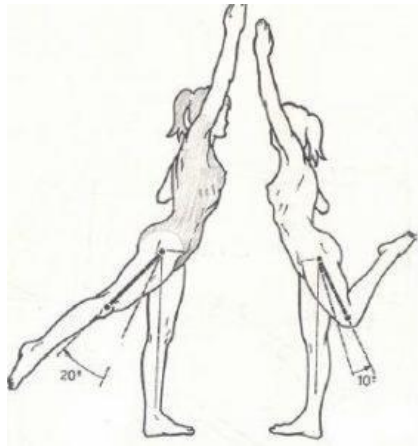


Figura 1.5 Rangos de movimiento de Flexión. [7]

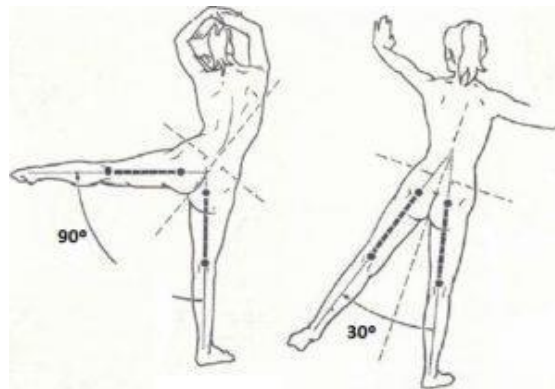
El movimiento de extensión ocurre cuando la pierna, con rodilla flexionada o no, se dirige hacia atrás del plano frontal. [7]



**Figura 1.6** Rangos de movimiento de Extensión. [7]

#### **1.4.2 Movimientos de abducción y aducción.**

En este movimiento, la pierna se dirige hacia afuera en el plano frontal, es decir la pierna se aleja del cuerpo, el rango de movimiento promedio de abducción es de 90 a 120 grados, pero puede alcanzar los 180 grados. La aducción es aquel movimiento en donde la pierna se dirige hacia el interior. [7]



**Figura 1.7** Posiciones de abducción de la cadera. [7]

### 1.4.3 Movimiento de rotación interna y externa

Este movimiento se da al momento en el cual el pie se desplaza hacia el interior (rotación interna), y hacia afuera (rotación externa). El rango promedio de rotación interna se desarrolla entre los 30 y 40 grados, el rango para la rotación externa se alcanza los 60 grados. [7]

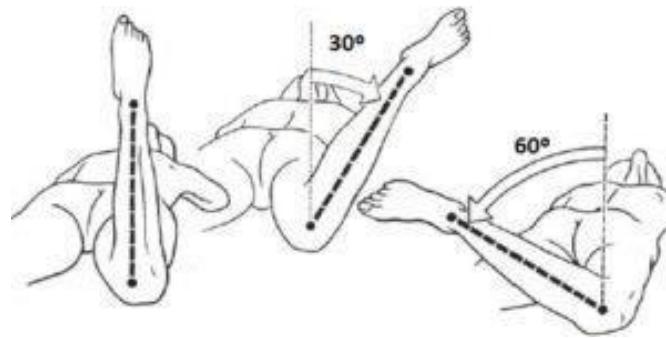


Figura 1.8 Rotación interna y externa. [7]

### 1.5 Fuerzas que actúan en la cadera

Las cargas que actúan en la articulación de la cadera son las siguientes: [8]

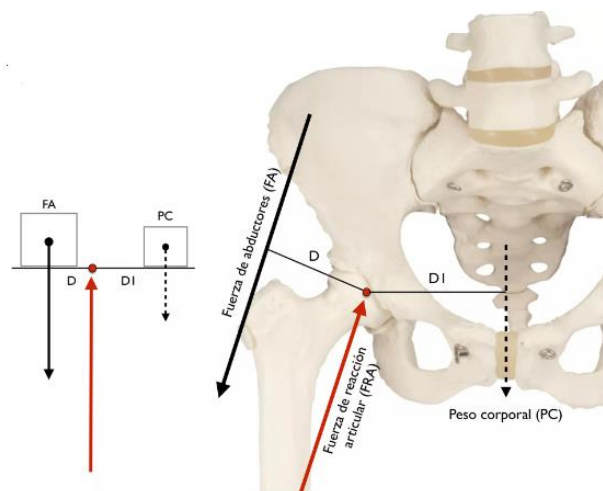


Figura 1.9 Fuerzas que actúan en la cadera. [8]

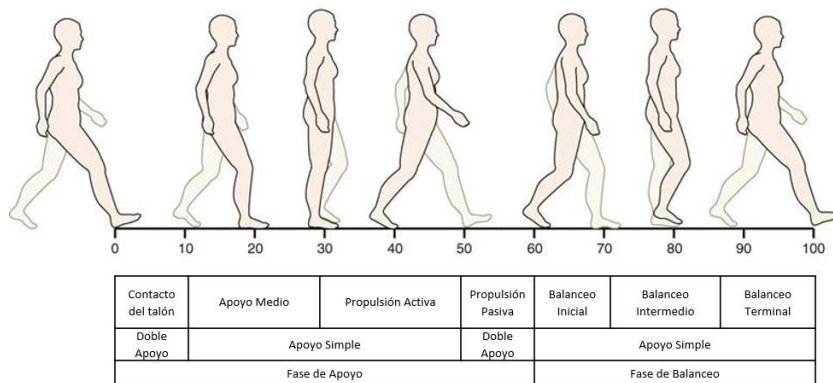
El mayor estrés en la articulación de la cadera ocurre al caminar y bajar escaleras. Desarrollo de patología de cadera, por ejemplo. La osteoartritis se puede predecir cuando estas actividades se realizan repetidamente y / o en condiciones defectuosas. [9]

Nota: "los tropiezos o los períodos de inestabilidad durante la postura de una sola pierna pueden generar fuerzas resultantes superiores a ocho veces el peso corporal". [9]

### 1.6 Ciclo de la marcha

Se divide en dos etapas, de postura o de apoyo, en donde uno de los pies se encuentra en contacto con el suelo, y la etapa de balanceo, en donde el pie se encuentra en el aire. [10]

Así, el ciclo empieza desde la fase de apoyo, es decir cuando un pie se encuentra en contacto con el suelo y se acaba cuando el pie nuevamente tenga contacto con el suelo. [10]

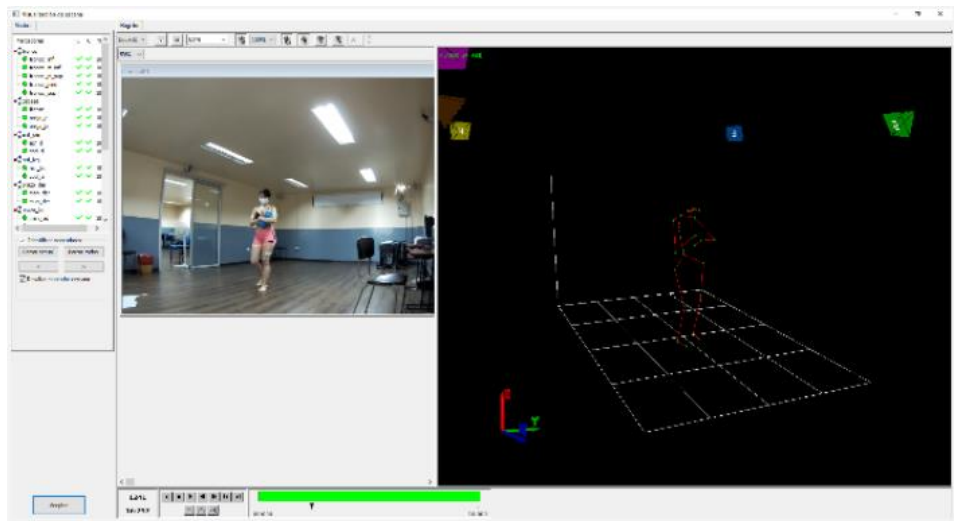


**Figura 1.10** Ciclo de la marcha humana. [10]

### 1.7 Captura de movimiento

La captura de movimiento usualmente se realiza mediante dispositivos como cámaras, pero pueden variar dependiendo la necesidad o el resultado que se

quiera obtener. Una de las técnicas más utilizadas en la Biomecánica es la Fotogrametría, técnica con alto grado de fiabilidad ya que permite obtener datos aproximados a la realidad. [11]



**Figura 1.11** Técnica de Fotogrametría. [11]

## 1.8 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición que se realiza de forma experimental, cuyo propósito es obtener información como la forma, dimensión y posición sobre objetos físicos, por medio del registro de imágenes digitales gracias al uso de cámaras y paquetes computacionales. [12]



**Figura 1.12.** Captura de movimiento mediante fotogrametría. [12]

## 1.9 Kinescan

Kinescan es el sistema que permite aplicar la técnica de Fotogrametría, el cual permite realizar análisis de movimiento a través de la captura y registro en tiempo real. Utiliza cámaras y marcadores reflectantes que permiten determinar sus posiciones, para su posterior análisis de movimiento en articulaciones del cuerpo humano, el cual comprende un amplio campo de estudio en Biomecánica, ciencia que se encarga del análisis del movimiento humano. [13]

## 1.10 Video análisis

El video análisis en el campo de la biomecánica permite estudiar el movimiento de un objeto físico, con el propósito de analizar diferentes parámetros a condiciones de interés. El análisis se realiza mediante la captura de imágenes o video a través de cámaras, con una precisión de 0.02mm. Los programas más comunes y más utilizados en el video análisis son Tracker y Kinovea. [14]

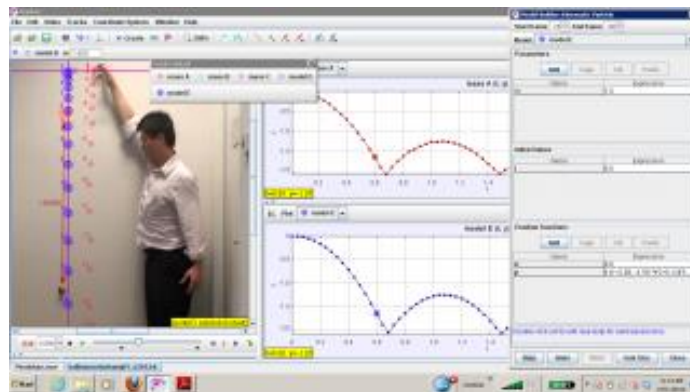


Figura 1.13 Video análisis a través del software Tracker. [15]

## 1.11 OpenSim.

OpenSim es un software gratuito, el cual permite crear, editar y analizar modelos musculoesqueléticos, con el fin de realizar simulaciones del movimiento de interés. Este software es utilizado en el campo de la Biomecánica, como el



diseño de dispositivos médicos, ortopedia, rehabilitación, investigación neurocientífica, análisis y diseño ergonómico, la ciencia del deporte, animación por computadora, investigación robótica, biología, y educación. [16]

El software proporciona una plataforma en la que la comunidad puede crear una biblioteca de simulaciones que se pueden intercambiar, probar, analizar y mejorar. El lenguaje del software está escrito en C++ y la interfaz gráfica de usuario (GUI) está escrita en Java. [16]

Una de las aplicaciones más utilizadas en este software, es realizar simulaciones y validaciones de movimiento a partir de datos experimentales, es decir utilizando la técnica de Fotogrametría se pueden obtener resultados con buena aproximación a la realidad. [17]

### **1.11.1 Funciones**

OpenSim incluye una amplia variedad de funciones, algunas de las características más útiles incluyen: [18]

- Imágenes y videos: Tomar fotografías de modelos musculoesqueléticos y hacer películas animadas.
- Trazado: Trazar los resultados de su análisis.
- Escalado: Escalado del tamaño de un modelo musculoesquelético.
- Cinemática inversa: Se puede calcular el rango de movimiento de las articulaciones mediante el seguimiento de las trayectoria de los marcadores.
- Dinámica inversa: Cálculo de momentos articulares en función de los ángulos y fuerzas.
- Dinámica de avance: Generación de simulaciones dinámicas de avance de movimiento.
- Análisis: Análisis de simulaciones dinámicas.

## 1.11.2 Repositorio de modelos y simulaciones

Se puede crear modelos propios de estructuras musculoesqueléticas y simulaciones dinámicas de movimientos en OpenSim, así como aprovechar los modelos informáticos y las simulaciones dinámicas que otros usuarios han desarrollado y compartido a través de la biblioteca de modelos musculoesqueléticos en [Documentation - OpenSim Documentation - Sitio global \(stanford.edu\)](http://Documentation - OpenSim Documentation - Sitio global (stanford.edu)). [19]

En la Figura 1.14, se muestra la interfaz de la página web, para acceder a los modelos y simulaciones, se selecciona la pestaña “Modelos, datos y utilidades”.

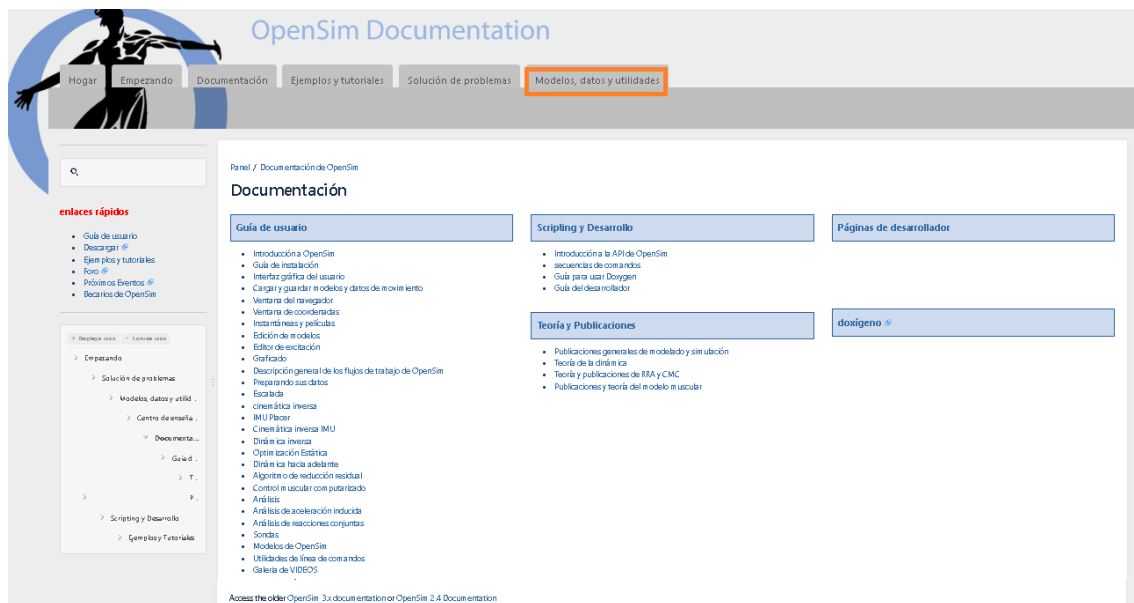


Figura 1.14 Repositorio de Opensim. [19]

Una vez seleccionado la pestaña “Modelos, datos y utilidades”, se abrirá la biblioteca de SimTK, donde se puede encontrar modelos musculoesqueléticos ya desarrollados del cuerpo entero o de diferentes extremidades, así como datos de simulación y videos de la categoría:

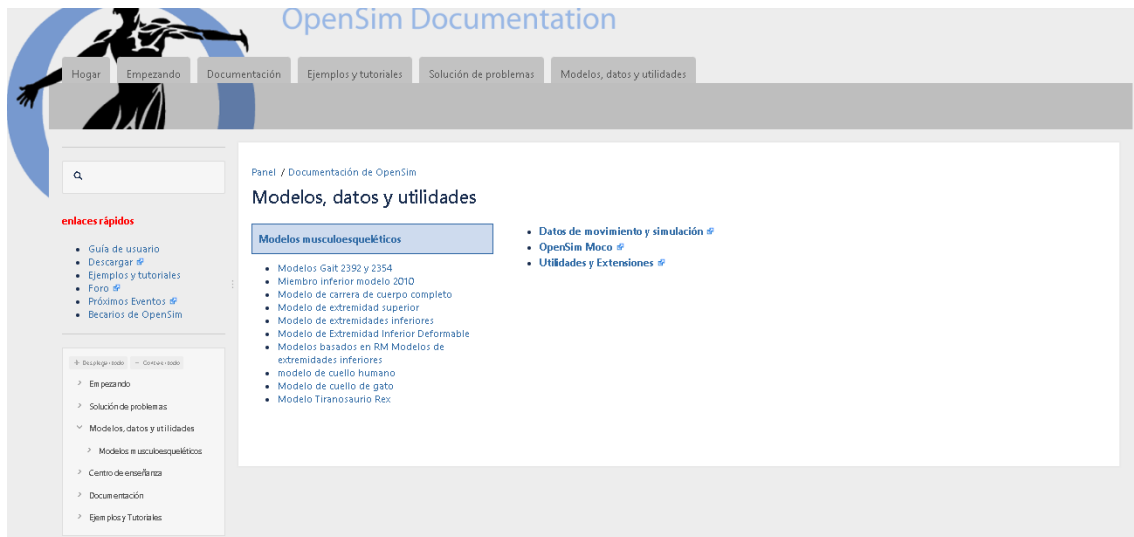


Figura 1.15 Repositorio de Opensim. [19]

Se selecciona la opción “Modelos musculoesqueléticos” y se abrirá todos los modelos disponibles en la biblioteca de Opensim, la Figura 1.16 muestra la información de cada modelo musculoesquelético en la página web de SimTK, autor (es), última actualización, una breve descripción y los archivos que se incluyen.

Panel / Documentación de OpenSim / Modelos, datos y utilidades

## Modelos musculoesqueléticos

Así como los gráficos interactivos han mejorado el análisis y el diseño de ingeniería, los modelos musculoesqueléticos basados en gráficos son herramientas eficaces para visualizar el movimiento humano, analizar la capacidad funcional de los músculos y diseñar procedimientos quirúrgicos mejorados. El equipo de OpenSim, junto con investigadores de la comunidad en general, ha creado modelos informáticos de muchas estructuras musculoesqueléticas diferentes. Obtenga más información sobre estos modelos a continuación:

- Modelos principales de OpenSim
- Modelos de ejemplo de OpenSim
- Modelos aportados por el usuario
- Modelos SIMM

**AUTORES DEL MODELO:** No dude en actualizar la matriz del modelo con información mejorada. Si tiene un modelo OpenSim que le gustaría agregar a la lista, contáctenos en [opensim@stanford.edu](mailto:opensim@stanford.edu).

### Modelos principales de OpenSim

*Modelos incluidos con la distribución de OpenSim y compatibles con el equipo de OpenSim.*

Modelo	Breve descripción	Autores	Usos previstos y limitaciones conocidas	Licencia	Última actualización	Materiales incluidos	Modelo precursores
<b>marcha2392_simbody</b> Obtenga el modelo: <a href="#">Incluido con OpenSim</a> # <i>Más información: Descripción del modelo</i>	Principalmente modelo de extremidades inferiores con dos piernas y un segmento de torso agrupado. Incluye 23 grados de libertad y 92 actuadores músculo-tendón.	Ajay Seth, Darryl Thelen, Frank C. Anderson, Scott L. Delp	Simular y analizar el movimiento humano dominado por los músculos de las extremidades inferiores. Los resultados pueden ser inexactos durante los movimientos con altos grados de flexión de la rodilla. El modelo se puede utilizar tanto para análisis cinemáticos como dinámicos.	Creative Commons CC BY 3.0	13 de julio	Datos de caminata, archivos de configuración de ejemplo	Modelo de pierna Delp (SIMM)
<b>marcha2354_simbody</b> Obtenga el modelo: <a href="#">Incluido con OpenSim</a> # <i>Más información: Descripción del modelo</i>	Principalmente modelo de extremidades inferiores con dos piernas y un segmento de torso agrupado.	Ajay Seth, Darryl Thelen, Frank C. Anderson, Scott L. Delp	Simular y analizar el movimiento humano dominado por los músculos de las extremidades inferiores. El modelo se puede utilizar tanto para análisis cinemáticos como dinámicos.	Creative Commons CC BY 3.0	13 de julio	Datos de caminata, archivos de configuración de ejemplo	marcha2392_simbody.excepto

Figura 1.16 Modelos musculoesqueléticos de Opensim. [19]

Como ejemplo y objetivo del presente trabajo, se escoge el modelo Gait2392\_simbody, en donde se puede descargar los archivos del modelo, además de encontrar información detallada como cinemática, dinámica y publicaciones asociadas.

Panel / ... / Modelos musculoesqueléticos

## Modelos Gait 2392 y 2354

[✓ Descargar la distribución de modelos de OpenSim](#)

### Descripción general y autores

Los modelos Gait2392 y Gait2354 son modelos informáticos tridimensionales de 23 grados de libertad del sistema musculoesquelético humano. Los modelos fueron creados por Darryl Thelen (Universidad de Wisconsin-Madison) y Ajay Seth, Frank C. Anderson y Scott L. Delp (Universidad de Stanford). Los modelos presentan definiciones de articulaciones de las extremidades inferiores adoptadas de Delp et al. (1990), articulación lumbar y antropometría adoptados de Anderson y Pandy (1999), y un modelo de rodilla plana adoptado de Yamaguchi y Zajac (1989).

El modelo Gait2392 presenta 92 actuadores musculotendón para representar 76 músculos en las extremidades inferiores y el torso. Para el modelo Gait2354, Anderson redujo la cantidad de músculos para mejorar la velocidad de simulación para demostraciones y fines educativos. Seth quitó la rótula para evitar restricciones cinemáticas; las inserciones de los cuádriceps se manejan con puntos móviles en el marco de la tibia.

La versión predeterminada sin escala de estos modelos representa un sujeto que mide aproximadamente 1,8 m de altura y tiene una masa de 75,16 kg.

Los modelos se pueden usar y modificar en OpenSim, una aplicación de simulación biomecánica de código abierto. Algunos de los usos de los modelos incluyen:

1. Cálculo de la fuerza isométrica máxima y el momento articular que un músculo puede desarrollar en cualquier posición del cuerpo
2. Estudiar cómo los cambios quirúrgicos en la geometría musculoesquelética (p. ej., la ruta desde el origen hasta la inserción) y los parámetros músculo-tendinosos (p. ej., la longitud óptima de las fibras musculares y la holgura del tendón) pueden afectar la capacidad de generación de momento de los diferentes músculos del cuerpo humano.
3. Generar simulaciones de impulso muscular de caminar y correr para analizar cómo los músculos contribuyen a los movimientos (p. ej., análisis de aceleración inducida) o cómo se cargan las articulaciones (consulte [Análisis de reacciones articulares](#)).

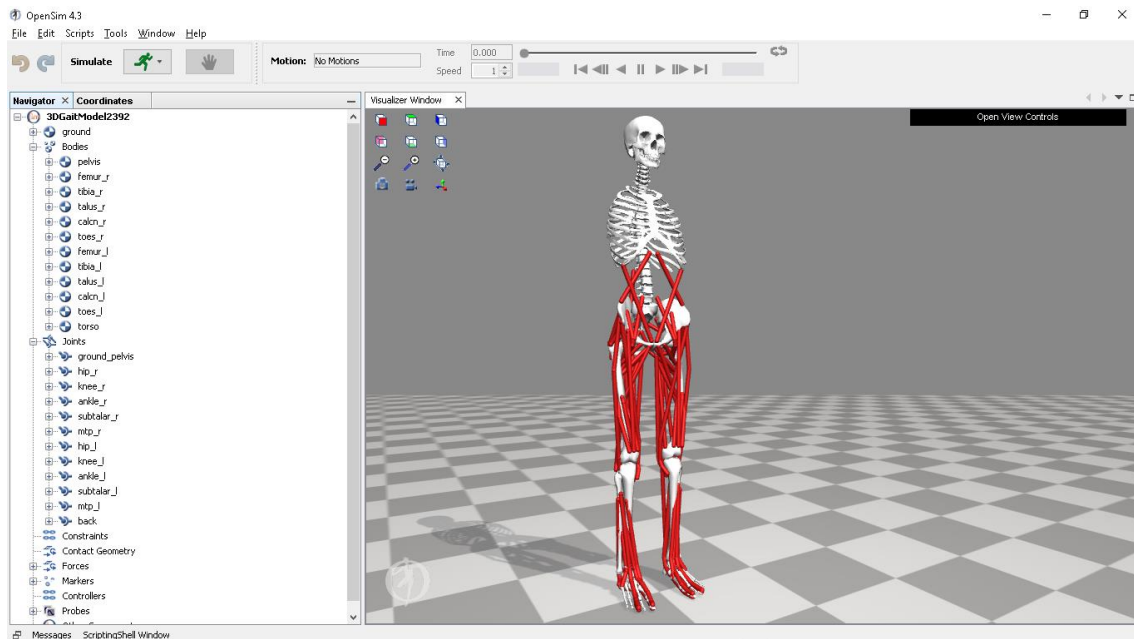
Consulte las secciones a continuación para obtener más información sobre los siguientes componentes de estos modelos:

- Descripción general y autores
  - Datos experimentales incluidos con los modelos
  - Acceso a los modelos
  - Cinemática
    - geometría ósea
    - Geometría conjunta
    - geometría muscular
  - Dinámica
    - Propiedades inerciales
    - Actuadores y otros elementos generadores de fuerza
  - Publicaciones asociadas

**Figura 1.17** Modelos musculoesqueléticos de Opensim. [19]

### 1.11.3 Interfaz gráfica de usuario de OpenSim

Se pueden cargar, ver y analizar modelos de muchas estructuras musculoesqueléticas diferentes, incluidas las extremidades inferiores, las extremidades superiores y el cuello. Los músculos se muestran como líneas rojas; los marcadores virtuales se muestran como esferas azules. [20]



**Figura 1.18** Interfaz de OpenSim. [Fuente: Propia]

#### 1.11.4 Secuencia de comandos

Las secuencias de comandos le permiten acceder a la funcionalidad de OpenSim a través de los siguientes lenguajes de programación: [20]

- El shell de secuencias de comandos en la GUI de OpenSim (es un intérprete de Python integrado en la aplicación).
- Matlab

En otras palabras, se puede acceder a la interfaz de programación de aplicaciones de OpenSim sin compilar su código en C++. [20]

Con las secuencias de comandos de OpenSim, puede:

- Ejecutar herramientas desde archivos de instalación o mediante programación.[20]
- Realizar el procesamiento por lotes de flujos de trabajo comunes (p. ej., cinemática inversa, control muscular computarizado, simulación

impulsada por EMG). [20]

- Escribir programas "principales" similares a los escritos por los desarrolladores de C++, mientras se aprovecha los muchos paquetes de Matlab/Python de código abierto. [20]
- Acceder a la API de OpenSim para crear y simular modelos. [20]

#### **1.11.5 Limitaciones**

En general, no se puede crear nuevos componentes (p. ej., un músculo personalizado, aunque hay algunas excepciones). No se puede crear complementos para usar a través de la GUI o la línea de comandos. [19]

En Matlab/Python, no hay acceso al trazador de OpenSim (use el trazador nativo de Matlab/Python) o al visualizador (use el visualizador de Simbody). Muchas clases de SimTK/Simbody (que pertenecen al espacio de nombres SimTK y los elementos internos de simbody) no están disponibles (p. ej., integradores). [19]

#### **1.11.6 El modelo OpenSim**

Un modelo de OpenSim caracteriza la dinámica de un conjunto de cuerpos rígidos o segmentos unidos por articulaciones. Un modelo consta de diferentes componentes. Por ejemplo, en un modelo utilizado para la simulación de la marcha humana, los cuerpos representan la geometría y las propiedades de inercia de los segmentos del cuerpo. Las articulaciones son la pelvis, cadera, rodilla y tobillo, mientras que se podría utilizar una restricción, por ejemplo, para acoplar el movimiento de la rótula con el ángulo de flexión de la rodilla del modelo. [19]

Las fuerzas en el modelo incluyen fuerzas internas de los músculos y ligamentos y fuerzas externas de la interacción con el suelo. Finalmente, el controlador del modelo determina la activación de los músculos (p. ej., control muscular computarizado). [19]

### **1.11.7 Importación de datos experimentales**

En muchos casos, se utiliza OpenSim para analizar datos experimentales que hayan sido recopilados en un laboratorio. Estos datos normalmente incluyen: [20]

- Trayectorias de marcador o ángulos de articulación de la captura de movimiento.
- Datos de fuerza, típicamente fuerzas y momentos de reacción del suelo y/o centros de presión.
- Electromiografía (EMG).

### **1.11.8 Escalado**

El escalado comprende la edición o cambio de las características antropométricas del modelo musculoesquelético disponible en el software con las características físicas reales del sujeto de prueba. [20]

Es importante realizar el proceso de escalado ya que permite resolver parámetros de dinámica y cinemática inversa. El escalado comprende características como masa e inercia, y las dimensiones de los miembros del cuerpo humano. [20]

### **1.11.9 Métodos inversos**

Los métodos inversos usan datos medidos a partir de momentos observados para estimar ángulos y coordenadas articulares, momentos articulares, pares articulares, fuerzas musculares, actividad muscular, dinámica musculo tendinosa y otros valores que son una función de los estados del modelo. [20]

Los estados del modelo generalmente incluyen sus coordenadas, velocidades coordinadas, activaciones musculares y longitudes de fibras musculares. En la siguiente figura, las flechas negras muestran la relación entre diferentes procesos biológicos. Las flechas rojas resaltan cómo el método inverso puede utilizar datos sobre los momentos observados para calcular las cantidades involucradas en la generación de ese movimiento. [20]

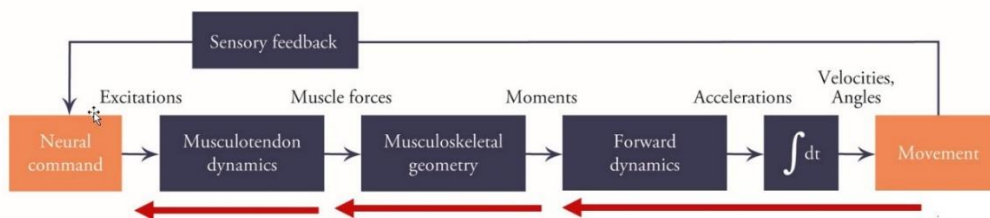


Figura 1.19 Método inverso. [20]

### 1.11.9.1 Cinemática inversa

La herramienta Inverse Kinematics (IK) en OpenSim encuentra valores para las coordenadas generalizadas (ángulos y posiciones de las articulaciones) del modelo experimental. [20]

La cinemática experimental a la que se dirige IK puede incluir posiciones de marcadores experimentales, así como valores de coordenadas experimentales generalizadas (ángulos de articulación). La herramienta IK se desarrolla conforme el tiempo avanza y encuentra las posiciones o coordenadas que mejor coincidan con los valores de coordenadas experimentales en función del tiempo. [20]

De forma matemática, la "mejor coincidencia" es calculada por la teoría de mínimos cuadrados ponderados, la cual minimiza los errores de las coordenadas y marcadores. [20]



Figura 1.20 Marcadores experimentales. [14]



Los marcadores experimentales se combinan con los marcadores del modelo a lo largo del movimiento variando las coordenadas generalizadas (p. ej., los ángulos de las articulaciones) a lo largo del tiempo. [20]

### 1.11.9.2 Dinámica inversa

OpenSim permite encontrar la dinámica inversa mediante datos experimentales, en especial las fuerzas que son medidas de forma experimental. La dinámica se encarga del análisis de movimiento y las causas de éste, es decir las fuerzas y los momentos que generan el movimiento. La herramienta Inverse Dynamics (ID) determina las fuerzas generalizadas (p. ej., fuerzas netas y torsiones) que provocan cierto movimiento, y analiza como intervienen los músculos que generan el movimiento. [20]

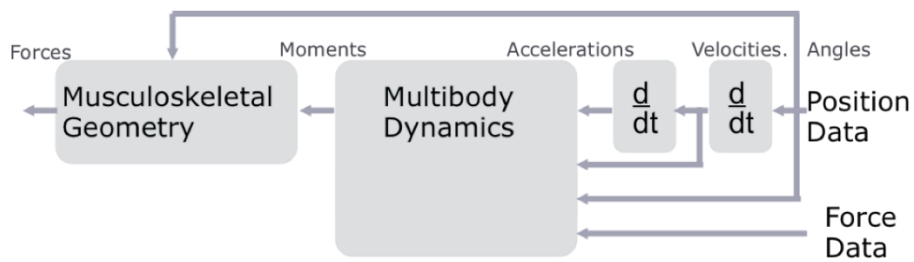


Figura 1.21 Dinámica Inversa. [20]

### 1.11.9.3 Simulaciones

El software OpenSim puede generar simulaciones de avance impulsadas por los músculos de la marcha y otros movimientos (consulte la figura a continuación). [20]

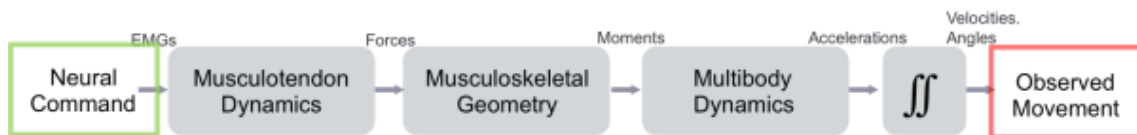


Figura 1.22 Simulación. [20]

#### **1.11.9.4 Análisis de Simulaciones**

Permite estimar, por ejemplo, la longitud de las fibras musculares o los tendones durante un movimiento, o las cargas en la articulación de la rodilla. La herramienta de análisis le permite analizar un modelo o simulación en función de una serie de entradas que pueden incluir historiales temporales de estados del modelo, controles y cargas externas aplicadas al modelo. Los siguientes análisis están disponibles en OpenSim: [18]

- Cinemática del cuerpo: parámetros como la posición, orientación, velocidad y aceleración de cuerpos específicos durante un tiempo determinado. [18]
- Cinemática de punto: informa la posición global, velocidad y aceleración de un punto definido localmente a un cuerpo durante una simulación. [18]
- Análisis muscular: características de todos los músculos. [18]
- Reacciones conjuntas: Estas son fuerzas que imponen el movimiento de la articulación. [18]
- Aceleración inducida: calcula las aceleraciones causadas o "inducidas" por las fuerzas individuales. [18]
- Reporte de fuerza: indica todas las fuerzas que actúan en el modelo. Para ligamentos y músculos, se informa la tensión a lo largo del trayecto; para actuadores ideales, se informa la fuerza escalar o el par. [18]

## **2. METODOLOGÍA**

Para realizar la adaptación del modelo musculo esquelético, se escoge el modelo de la librería del software Opensim, herramienta que permite la modificación del modelo seleccionado para adaptarlo a diferentes condiciones antropométricas de la persona, en este caso se selecciona el movimiento de caminata, mediante gráficas se obtiene los parámetros cinemáticos y se generan los archivos que permitan el análisis de movimiento de la articulación de la cadera en el software Opensim con validación mediante fotogrametría.

Los datos obtenidos de forma experimental se exportan a Matlab para determinar la posición, velocidad y aceleración angular del movimiento propuesto, las mismas que se obtienen por el método de Rodrigues [21]. Para realizar el análisis cinemático y validación se utiliza la técnica de fotogrametría y análisis de movimiento mediante el uso del software Tracker, que determina las posiciones de los marcadores en un tiempo determinado.

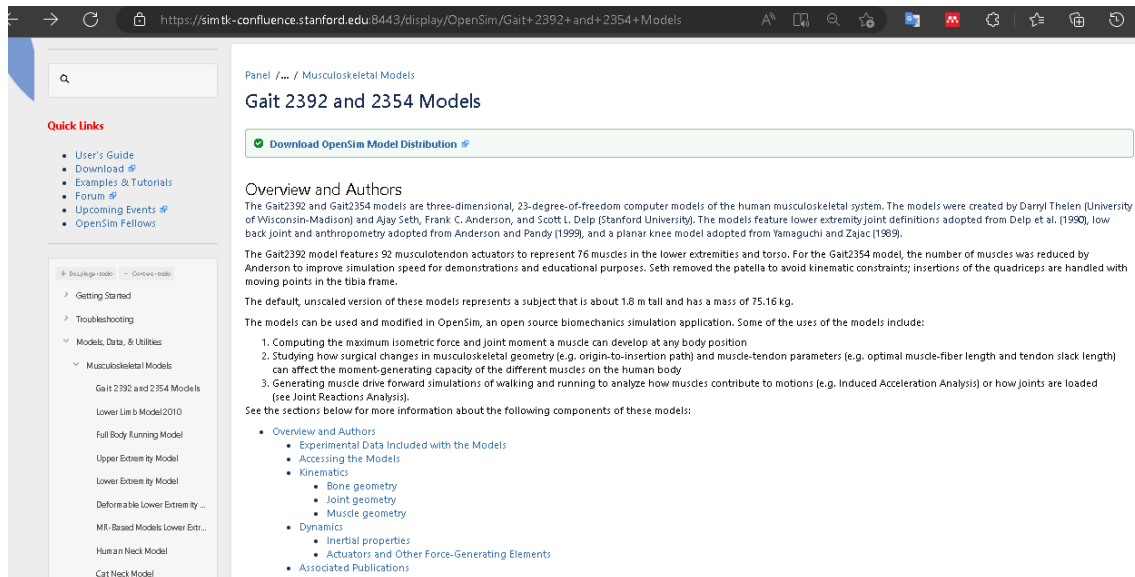
### **2.1 Modelo musculo esquelético**

Se utiliza el modelo "Gait2392\_Simbody" disponible en la biblioteca de Opensim, que permite la simulación del movimiento de caminata, fue desarrollado por Darryl Thelen (Universidad de Wisconsin), Ajay Seth, Frank C. Anderson, and Scott L. Delp (Universidad de Stanford). [19]

El modelo posee 23 grados de libertad, con 76 músculos en la extremidad inferior y el torso, además la estatura del mismo es de 1.80 metros y una masa de 75.16 kg sin escalar. Además de estos datos, se modifica la longitud de los segmentos en base a las características antropométricas de los sujetos de prueba. [19]

## 2.1.1 Acceso al modelo

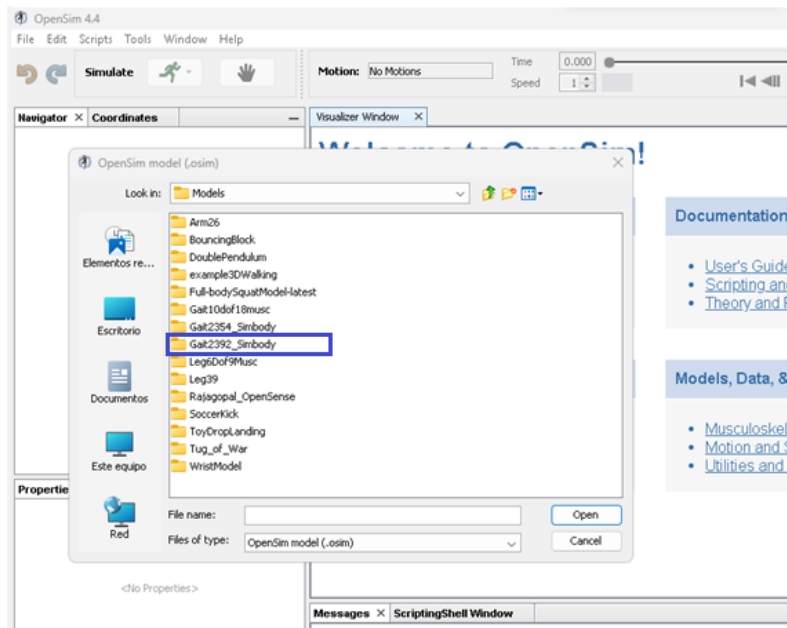
Para esto, se necesita descargar los archivos del modelo mediante el acceso a la página web de SimTk, proceso detallado en el apartado **1.11.2 Repositorio de modelos y simulaciones** del presente trabajo.



**Figura 2.1** Descarga del modelo. [Fuente: Propia]

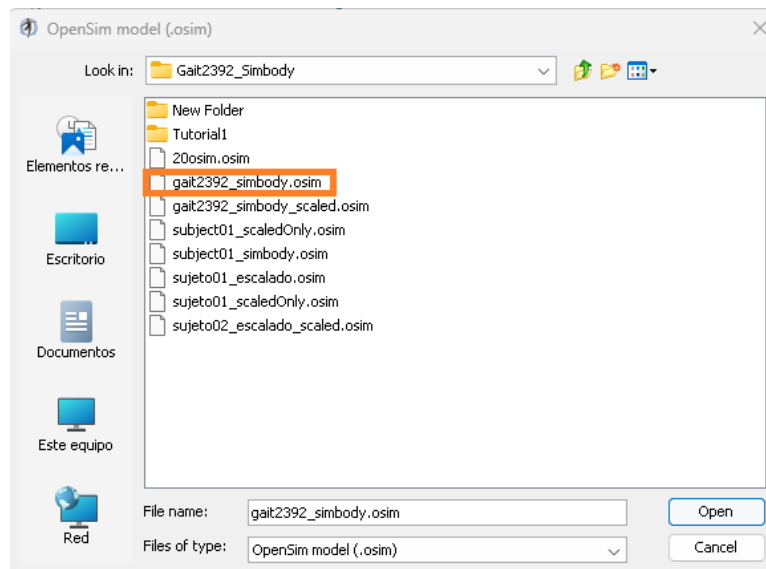
Una vez realizada la descarga, se guarda el archivo del modelo (.osim), de configuración (.xml) y resultados asociados (.mot, .sto), para este modelo se obtienen de forma gratuita con el software OpenSim para los investigadores interesados en reproducir el resultado de la simulación. [19]

Se puede acceder a estos archivos a través de la carpeta Models/Gait2392\_Simbody en el directorio de instalación de OpenSim y la carpeta example/Gait2392\_Simbody en el directorio de instalación de OpenSim. [19]



**Figura 2.2** Acceso al modelo. [Fuente: Propia]

Se escoge el archivo (.osim) para cargar el modelo musculo esquelético en el programa de Opensim, como se indica en la Figura 2.2



**Figura 2.3** Elección archivo (.osim). [Fuente: Propia]

### 2.1.2 Geometría del modelo musculo esquelético 2392

El modelo cuenta con 7 segmentos del cuerpo humano: torso, pelvis, fémur, tibia, peroné, astrágalo y pie. Y 5 articulaciones: cadera, rodilla, tobillo, y articulaciones del pie. En la (Figura 2.2) se muestra los segmentos del miembro inferior y las articulaciones con sus ejes de referencia. [19]

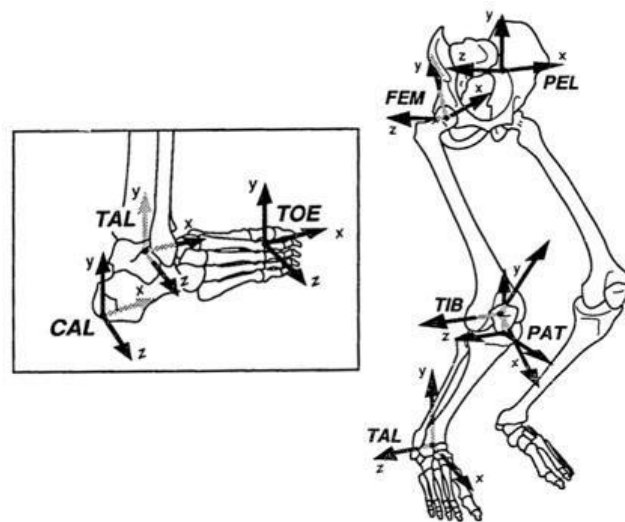


Figura 2.4 Articulaciones y ejes del modelo. [19]

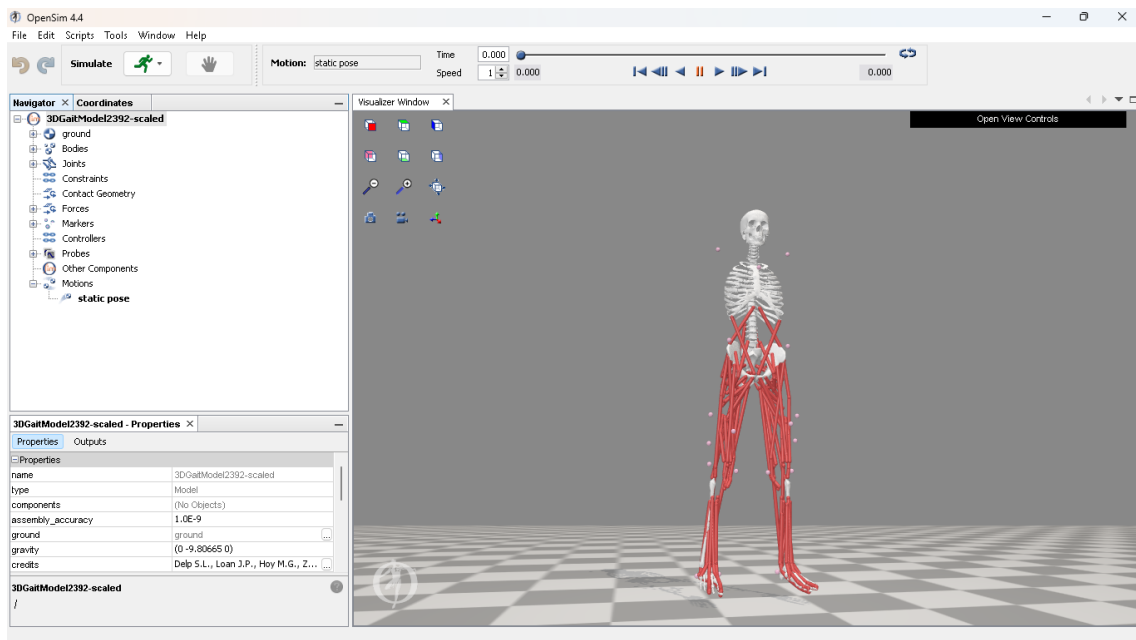
### 2.1.3 Modelo 2392 en Opensim

Los segmentos de músculo-tendón están representados por actuadores, en los cuales actúan fuerzas que generan movimiento, y se determinan en función de los puntos anatómicos de referencia a la estructura anatómica del sujeto. [19] Estos actuadores se identifican como segmentos de línea, como se muestra en la Figura 2.3:



**Figura 2.5** Actuadores Modelo 2392. [19]

La interfaz de Opensim con el modelo elegido, se muestra en la figura 2.3, el cual consta de 20 marcadores, cuyas posiciones son replicadas de forma experimental mediante la técnica de Fotogrametría.



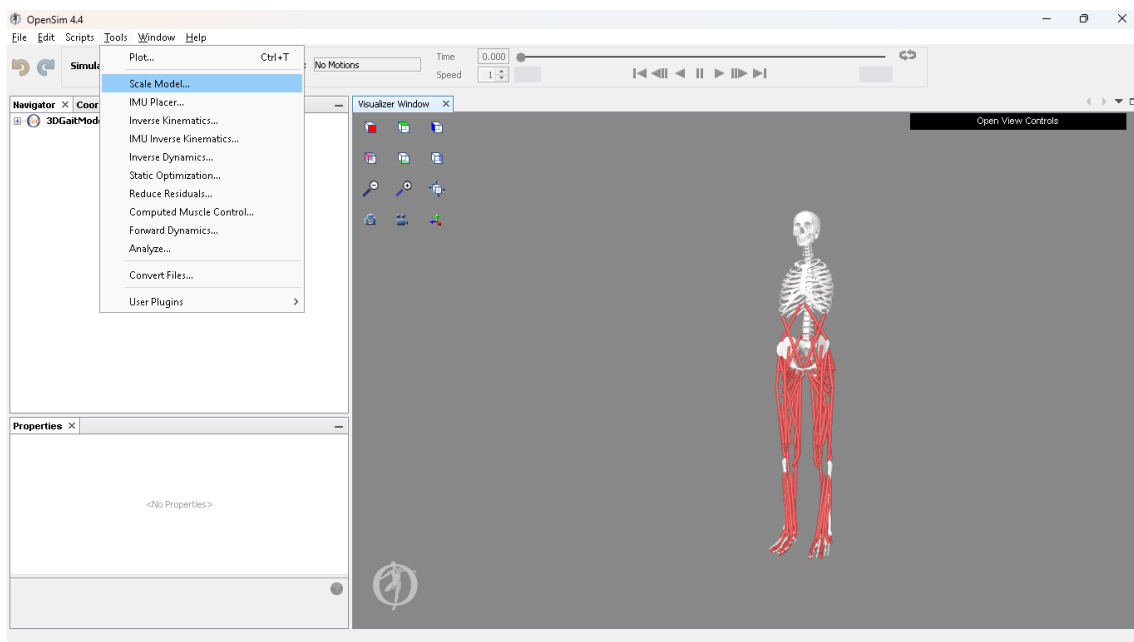
**Figura 2.6** Modelo 2392 en Opensim. [Fuente: Propia]

## 2.1.4 Escalado del Modelo 2392

El escalado y registro de las posiciones de los marcadores son las etapas principales para obtener resultados de cinemática y dinámica inversa (IK e ID). El escalado de un sujeto en específico se realiza mediante la modificación de las características antropométricas del modelo musculoesquelético de Opensim con el modelo del sujeto experimental, para esto se utiliza las posiciones de los marcadores genéricos del modelo en el sujeto, y así poder determinar su antropometría. [19]

Para escalar el modelo genérico y registrar los marcadores:

1. Seleccionar del menú- Herramientas y luego la opción Escala.



**Figura 2.7** Escalado del modelo. [Fuente: Propia]



## 2. Cargar el archivo de posiciones de los marcadores (.xml).

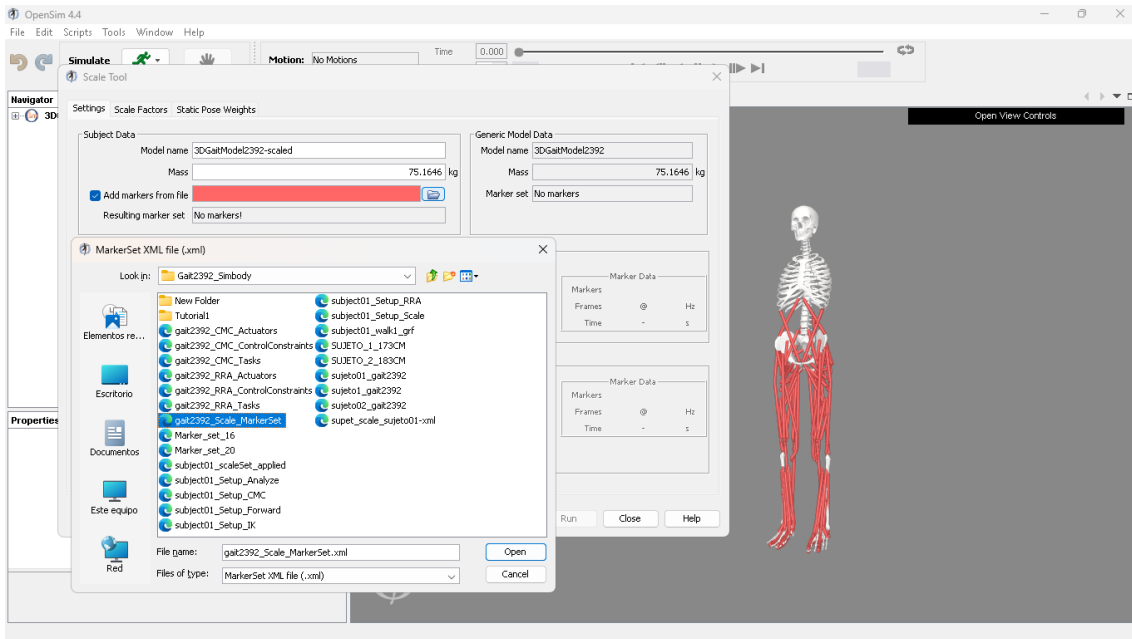


Figura 2.8 Escalado del modelo. [Fuente: Propia]

## 3. Cargar el archivo de referencia de posición estática (.trc) y correr la opción de escalado.

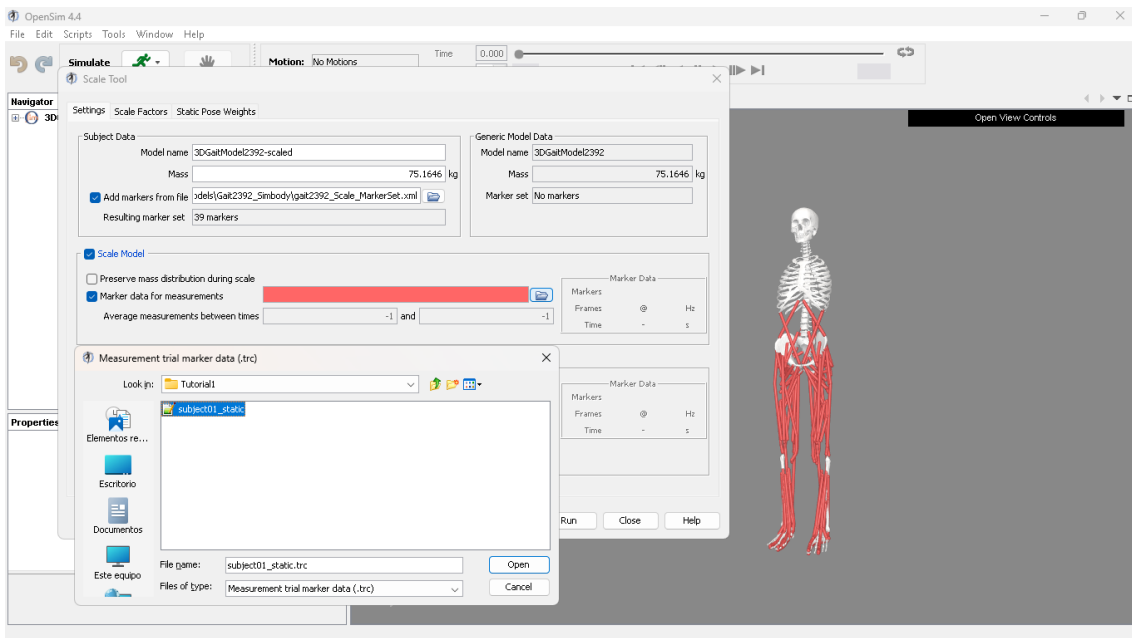


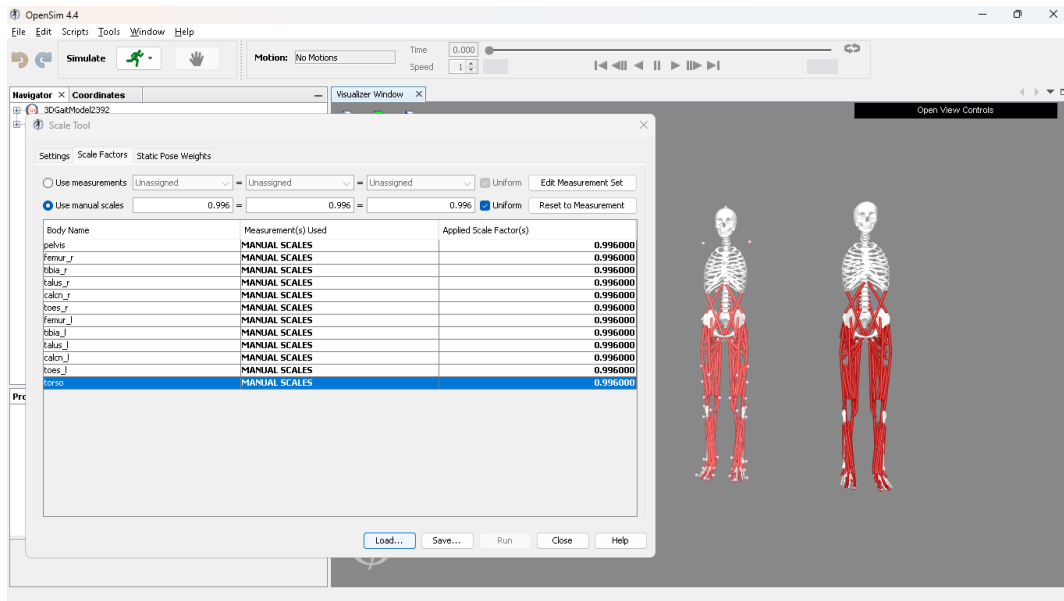
Figura 2.9 Escalado del modelo. [Fuente: Propia]

La opción de factores de escala se utiliza para editar tanto la longitud de los segmentos de las extremidades, como las propiedades de masa (tensor de masa e inercia). Para esto se utiliza los archivos los archivos experimentales de referencia estática de los dos sujetos de prueba, y así poder realizar el cálculo de las distancias entre los marcadores de referencia como se muestra en la Figura 2.10.

1	PathFileType	4	(X/Y/Z)	subject01_static.trc	
2					
3					
4	Frame#				
5	Time				
6	R.ASIS	X1	MODELO G.	MODELO 1	MODELO 2
7		Y1	604.8753861	602.4558846	605.4790518
8		Z1	1073.108033	1068.815601	1074.178995
9	L.ASIS	X2	157.7333951	157.1024216	157.890773
10		Y2	606.8504529	604.4230511	607.4560896
11		Z2	1060.920621	1056.676939	1061.97942
12	V.Sacral	X3	-104.2854635	-103.8683217	-104.3895404
13		Y3	407.8878985	406.2563469	408.2949707
14		Z3	1079.423482	1075.105788	1080.500747
15	R.Thigh.Upper	X4	36.258513	36.11347895	36.294699
16		Y4	542.4758166	540.3059133	543.0172074
17		Z4	756.7182175	753.6913447	757.4734223
18	R.Thigh.Front	X5	224.2446825	223.3477038	224.4684787
19		Y5	592.9441329	590.5723564	593.5358911
20		Z5	682.0133242	679.2852709	682.6939735
21	R.Thigh.Rear	X6	134.3969108	133.8593231	134.5310389
22		Y6	521.9501217	519.8623212	522.4710279
23		Z6	637.0354543	634.4873125	637.6712157
24	L.Thigh.Upper	X7	226.6024714	225.6960615	226.8286207
25		Y7	515.853683	513.7902683	516.368505
26		Z7	768.057031	764.9848029	768.823552
27	L.Thigh.Front	X8	-168.2292659	-167.5563488	-168.3971587
28		Y8	604.4041056	601.9864891	605.0073009
29		Z8	718.7578151	715.8827839	719.4751354
30	L.Thigh.Rear	X9	-111.865744	-111.418281	-111.977386
31		Y9	504.8528131	502.8334018	505.3566562
		Z9	658.8590258	656.2235897	659.5165671

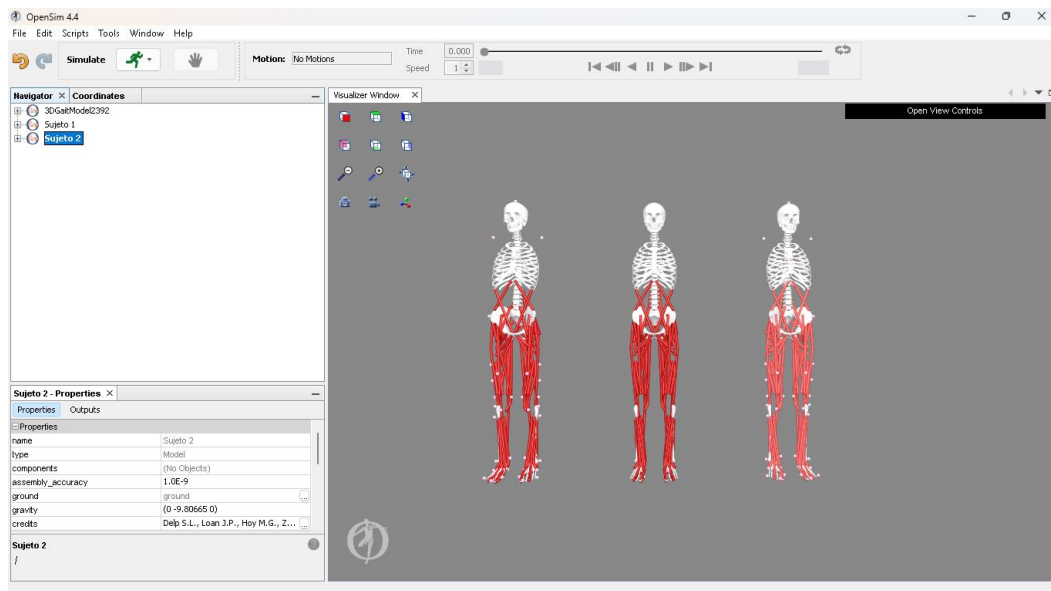
Figura 2.10 Escalado mediante distancia entre marcadores. [Fuente: Propia]

También se puede escalar el modelo de forma manual con un factor de escala en función de las características antropométricas del modelo genérico (1.80 m) y los modelos escalados (1.73 m y 1.83 m). En la Figura 2.11 se presenta el ejemplo para el sujeto de 1.73 m.



**Figura 2.11** Escalado mediante factores de escala. [Fuente: Propia]

Una vez ejecutado el escalado de cada sujeto, un nuevo modelo aparecerá en la interfaz de Opensim como se muestra en la Figura 2.12, estos nuevos modelos contienen las características físicas de los sujetos, y a los que se analizará diferentes parámetros cinemáticos.



**Figura 2.12** Modelos escalados; izquierda (sujeto 1), centro (modelo genérico), derecha (sujeto 2). [Fuente: Propia]

### 2.1.5 Cinemática inversa Modelo 2392

La cinemática se encarga del análisis de movimiento, pero no considera fuerzas que generan dicho movimiento, por el contrario, la cinemática inversa determina los ángulos que forman las articulaciones con los segmentos del cuerpo humano a partir de datos experimentales.

Con los datos obtenidos del modelo genérico y de forma experimental en un tiempo determinado, la herramienta que calcula la cinemática inversa registra los ángulos para cada modelo, el software utiliza la “mejor coincidencia” para ambos modelos mediante la resolución de mínimos cuadrados ponderados para reducir el porcentaje de error entre marcadores, y se expresa como: [21]

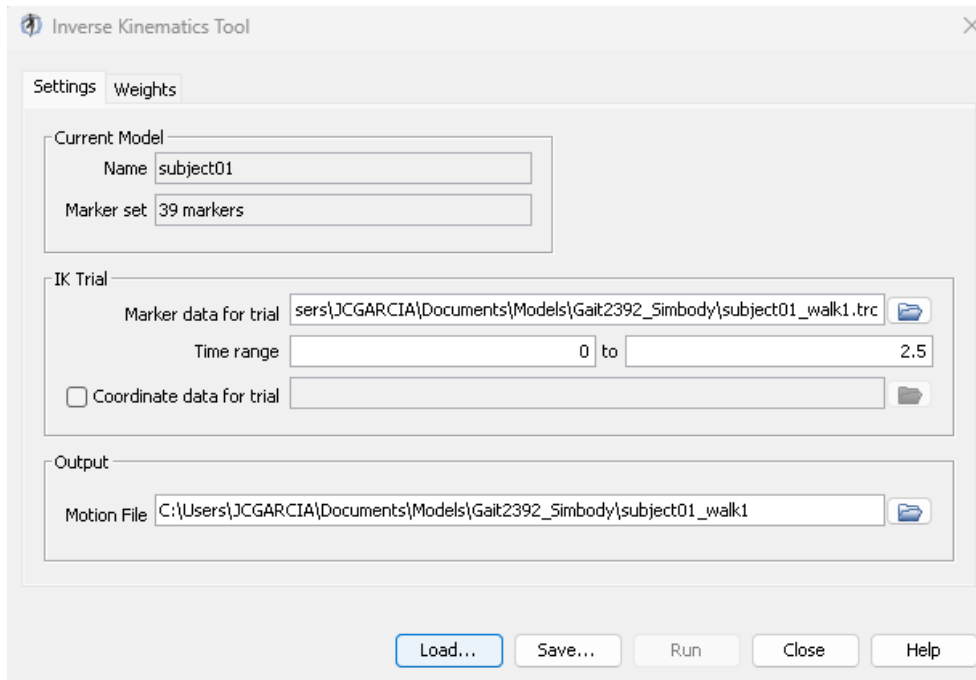
$$\min_{\mathbf{q}} \left[ \sum_{i \in \text{markers}} w_i \| \mathbf{x}_i^{\text{exp}} - \mathbf{x}_i(\mathbf{q}) \|^2 \right]$$

Donde:

$\mathbf{q}$ : matriz de coordenadas,  $\mathbf{x}_i^{\text{exp}}$ : posición marcador experimental,  $\mathbf{x}_i(\mathbf{q})$ : posición marcador modelo Opensim, y  $w_i$ : peso del marcador. [21]

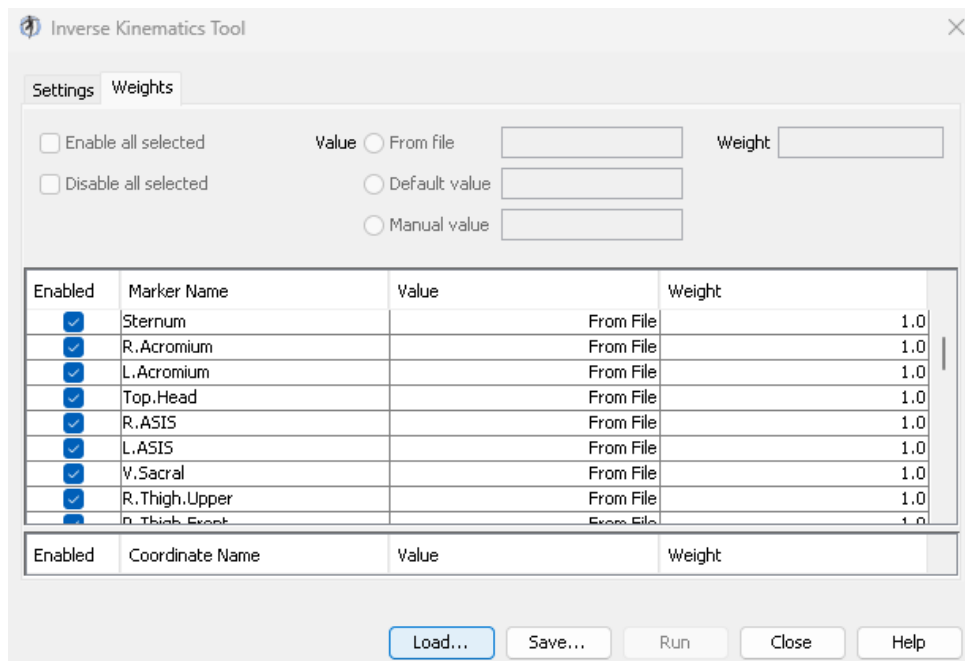
Para configurar el análisis de cinemática inversa:

1. Abrir la ventana de Herramientas y seleccionar la herramienta Cinemática inversa.
2. Cargar un archivo del movimiento a estudiar (.trc), que contenga las trayectorias de los marcadores.



**Figura 2.13** Cinemática Inversa en Opensim. [Fuente: Propia]

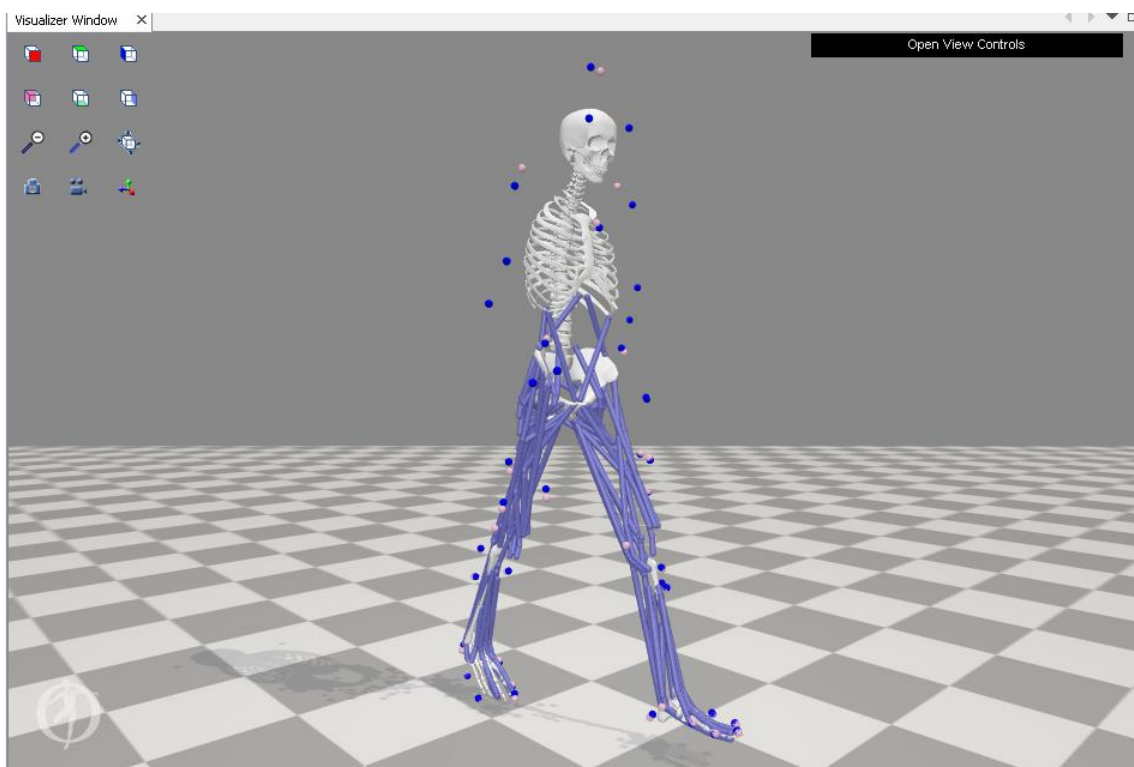
En la pestaña **Pesos**, se debe revisar qué marcadores se seleccionan para usar en el análisis de cinemática:



**Figura 2.14** Pesos de marcadores. [Fuente: Propia]

Para obtener los resultados de cinemática inversa:

- Hacer click en **Ejecutar**. El modelo comienza a moverse a medida que se resuelve el problema de cinemática inversa para cada marco de los datos experimentales.
- Para visualizar la solución de cinemática inversa, se reproduce el modelo usando el control deslizante de movimiento y los controles de video.
- La solución de cinemática inversa se guarda como un archivo (.mot)
- Para comparar datos de marcadores experimentales con resultados de cinemática inversa, en el panel elegir Movimientos y seleccionar con el botón derecho en IKResults (que es lo que acaba de generar la herramienta Cinemática inversa). A continuación, se selecciona **Asociar datos de movimiento...** en el menú desplegable. Elegir el archivo (.trc), y los marcadores de los modelos se diferencian por su color.



**Figura 2.15** Marcadores genéricos y experimentales. [Fuente: Propia]

## 2.2 Análisis de movimiento

Para realizar el estudio de movimiento, primero se realiza la captura del video a través de un teléfono celular para poder exportarlo al programa Tracker con el objetivo de obtener las trayectorias de los marcadores de interés y analizar las curvas obtenidas en función del tiempo.

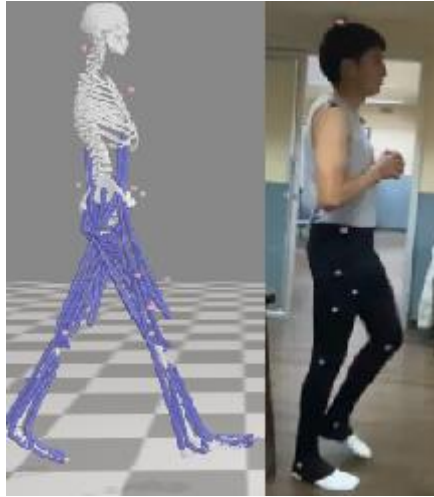
Video	
Duración	00:00:02
Ancho fotograma	640
Alto fotograma	368
Velocidad de datos	955kbps
Velocidad de bits total	1088kbps
Velocidad fotograma	30.00 fotogramas/segu...

**Figura 2.16** Propiedades del video. [Fuente: propia]

Una vez obtenido las trayectorias de los marcadores, se compara con la trayectoria de los marcadores obtenidos en Fotogrametría y el modelo musculo esquelético a través de la simulación del movimiento de caminata.

### 2.2.1 Captura de video

Para analizar el movimiento caminata se realiza la captura de video recreando dichos movimientos en el laboratorio de Bioingeniería, para facilitar el análisis se coloca marcadores de referencia en el cuerpo de la persona según las posiciones del modelo musculo esquelético, los mismos que serán utilizados para encontrar la trayectoria de cada marcador en un tiempo determinado, esto se realiza mediante el uso del software Tracker.



**Figura 2.17** Posiciones de marcadores. [Fuente: Propia]

**Tabla 2.1.** Identificación de los marcadores. [Fuente: Propia]

1. acromium_derecho	
2. acromium_izquierdo	
3. esternon	
4. muslo_der_inf	
5. muslo_der_medio	
6. muslo_der_sup	
7. muslo_izq_inf	
8. muslo_izq_medio	
9. muslo_izq_sup	
10. pelvis_derecho	
11. pelvis_izquierdo	
12. pelvis_medio	
13. rod_der_ext	
14. rod_der_int	
15. rod_izq_ext	
16. rod_izq_int	
17. tobillo_der_ext	
18. tobillo_der_int	
19. tobillo_izq_ext	
20. tobillo_izq_int	



## 2.2.2 Obtención de trayectorias

Una vez que se realiza la grabación del movimiento de la marcha, se carga el video al software Tracker, el cual se puede obtener de forma gratuita. Mediante la herramienta de ejes de coordenadas, se asigna a cada marcador un sistema de coordenadas para conocer la posición inicial de cada marcador reflectante y poder seguir marcando la trayectoria del mismo en un tiempo determinado.

Con la opción de rastreo se asigna como un objeto o masa a cada marcador, a medida que se reproduce el video se asigna las nuevas posiciones del marcador en base al ciclo de la marcha.

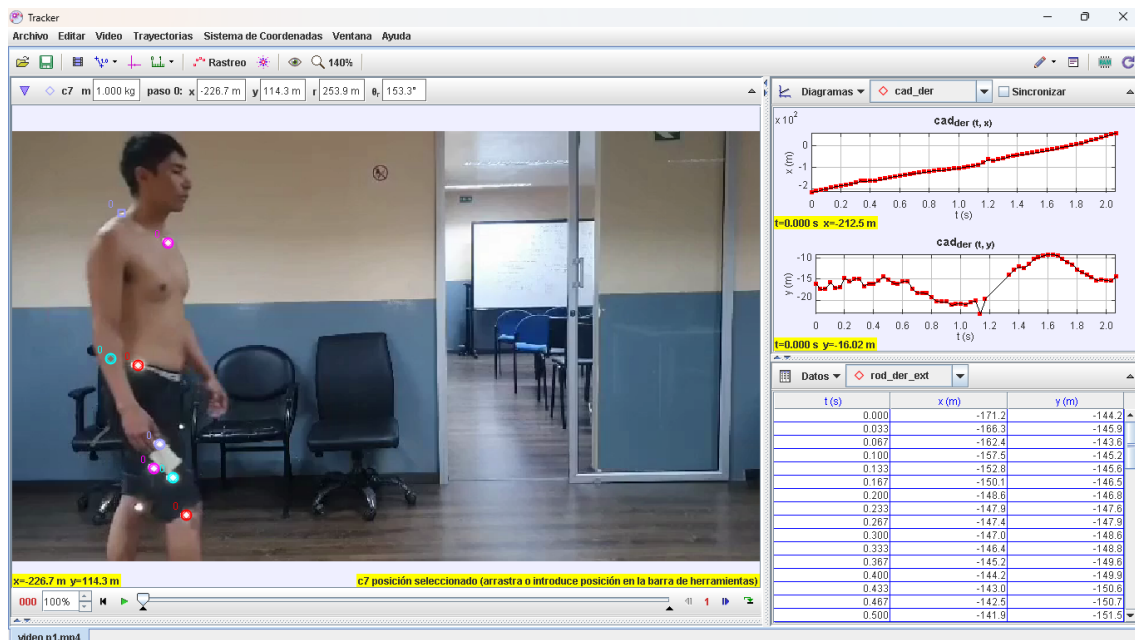
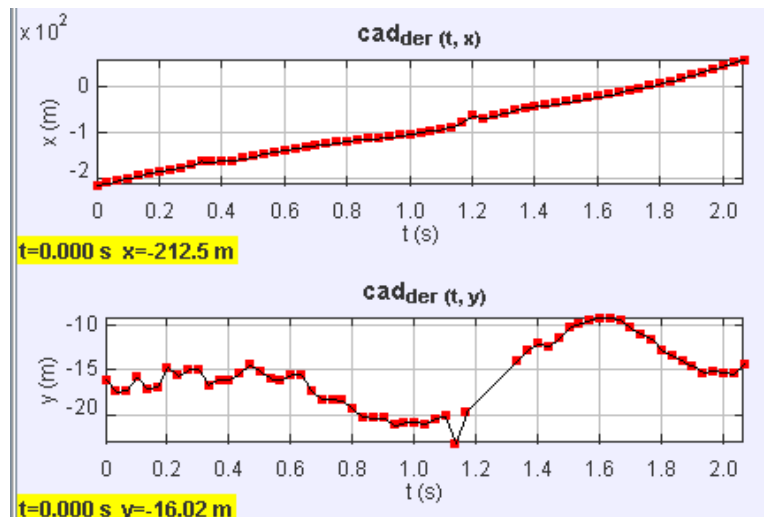
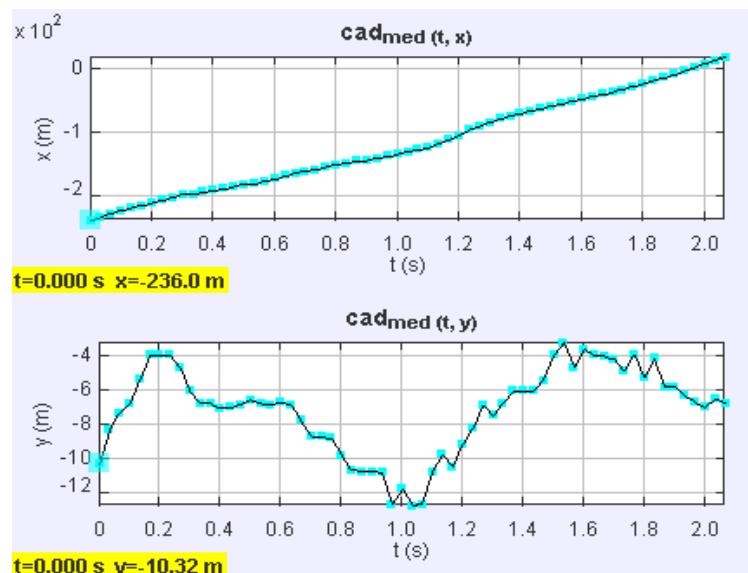


Figura 2.18 Interfaz del software Tracker. [Fuente: Propia]

Como el objetivo de análisis es la articulación de la cadera, se obtiene las trayectorias de los marcadores en forma de datos y gráficas:



**Figura 2.19** Gráficas de posición del marcador: cadera derecha. [Fuente: Propia]



**Figura 2.20** Gráficas de posición del marcador: cadera media. [Fuente: Propia]

### 2.3 Técnica de Fotogrametría

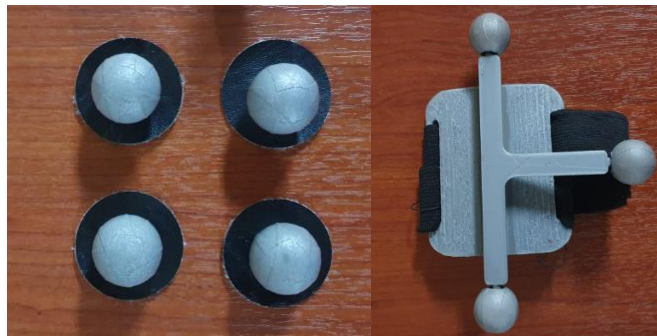
El sistema de fotogrametría utilizado se denomina Kinescan, el cual fue diseñado por el IBV (Instituto de Biomecánica de Valencia), adquirido e instalado en el Laboratorio de Bioingeniería de la EPN. Este sistema, está conformado por 10 cámaras que se ubican en el perímetro de la parte superior del laboratorio mencionado.



**Figura 2.21** Laboratorio de bioingeniería, EPN. [Fuente: Propia]

### **2.3.1 Marcadores de referencia**

Para registrar el movimiento se utiliza marcadores reflectantes en los puntos de referencia del modelo musculoesquelético de Opensim, estos marcadores permiten el registro de las posiciones en función del tiempo. [12]



**Figura 2.22** Marcadores. [22]

### 2.3.2 Protocolo de pruebas

Para registrar el movimiento mediante el sistema Kinescan, se debe asignar los nombres y posiciones de cada marcador reflectante, se utiliza 20 marcadores que están distribuidos e identificados así:

- 3 en Torso: acromium\_derecho, acromium\_dizquierdo, esternon
- 3 en Cadera: pelvis\_derecho, pelvis\_izquierdo, pelvis\_medio
- 6 en Muslo: muslo\_der\_inf, muslo\_der\_medio, muslo\_der\_sup, muslo\_izq\_inf, muslo\_izq\_medio, muslo\_izq\_sup.
- 4 en Rodilla: rodilla\_der\_ext, rodilla\_der\_int, rodilla\_izq\_ext, rodilla\_izq\_int
- 4 en tobillo: tobillo\_der\_ext, tobillo\_der\_int, tobillo\_izq\_ext, tobillo\_izq\_int

**Tabla 2.2** Colocación de marcadores reflectantes. [Fuente: Propia]

Sujeto de prueba: 1	Sujeto de prueba: 2
	
<p>Altura: 1.74 m</p>	<p>Altura: 1.83 m</p>
<p>Peso: 64 kg</p>	<p>Peso: 68 kg</p>

Para la toma de datos de Fotogrametría, primero se realiza la referencia del sujeto, para esto, la persona debe permanecer estático y erguido durante 5 segundos, después se realiza el movimiento de marcha durante 60 segundos, y por último se realiza la caminata.

Se realiza 4 muestras de movimiento para cada sujeto, con el propósito de comparar y determinar el archivo en el cual se realiza la mejor toma de datos experimentales. Después de realizar las pruebas, se identifica cada marcador en el software Kinescan para obtener las coordenadas de movimiento correctas.

## 2.4 Programación utilizada

Se comienza con la importación de los archivos generados mediante la técnica de Fotogrametría, archivo de referencia estática, y archivos de registro de posiciones de los marcadores para movimiento de marcha y caminata.

```
datos_D=dlmread('Movimiento_cam_7_8.txt',' ',1,0)*100; %Matriz de fotogrametría y cambio de unidades (m)
```

Se identifica el tamaño de la matriz, número de filas y columnas para el registro de movimiento, así como el tiempo utilizado para dicho movimiento:

```
n=max(size(datos_D)) %Encuentra el número de filas
fps=200; %Fotogramas por segundo
tiempo=(0:(n-1))'/fps; %Encuentra el vector de tiempo
```

Colocar el número de marcadores totales, y determinar el marcador de referencia a estudiar, que sirve como marcador de referencia, en este caso es el marcador número 10, el cual representa la posición de la cadera\_derecha:

```
MC=calcM(datos_D,[1:16]);
MCO=MC(1:2, :, :);
MCO=nanmean(MCO,1);
MC1=MC;
for i=1:n
    for j=1:16;
        MC1(i, :, j)=(MC(i, :, j)-MCO(1, :, 10));
    end
end
```

Para calcular las variables cinemáticas, se utiliza la rotación o giro de vectores de Rodrigues:

```
MCO1=MCO-MCO(1, :, 10); %método de desplazamientos finitos e infine..
[omega_cad ,svoc_cad ,RGv_cad ,sGv_cad ,M_cad, RG_cad]=finitosolid(MC1(:, :, [4 5 6 13]), MCO1(:, :, [4 5 6 13]));

for i=1:n
    XYZ(i, :)=conviertesrotacion(omega_cad(i, :), 'rodrigues', 'xyz');
end
```

Los parámetros que se obtienen son; posición angular, velocidad angular y aceleración angular:

```
F1=180*XYZ(:, range(XYZ)==max(range(XYZ)))/pi;
fdamat=suavizado_bspline(F1, tiempo, 200, 6);
fi=fdamat(:, :, 1);
Dfi=fdamat(:, :, 2);
D2fi=fdamat(:, :, 3);
```

### 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Escalado del modelo de Opensim

Una vez realizado el proceso del apartado 2.1.4 Escalado del modelo, se obtiene los modelos como se muestra en la Figura 3.1:

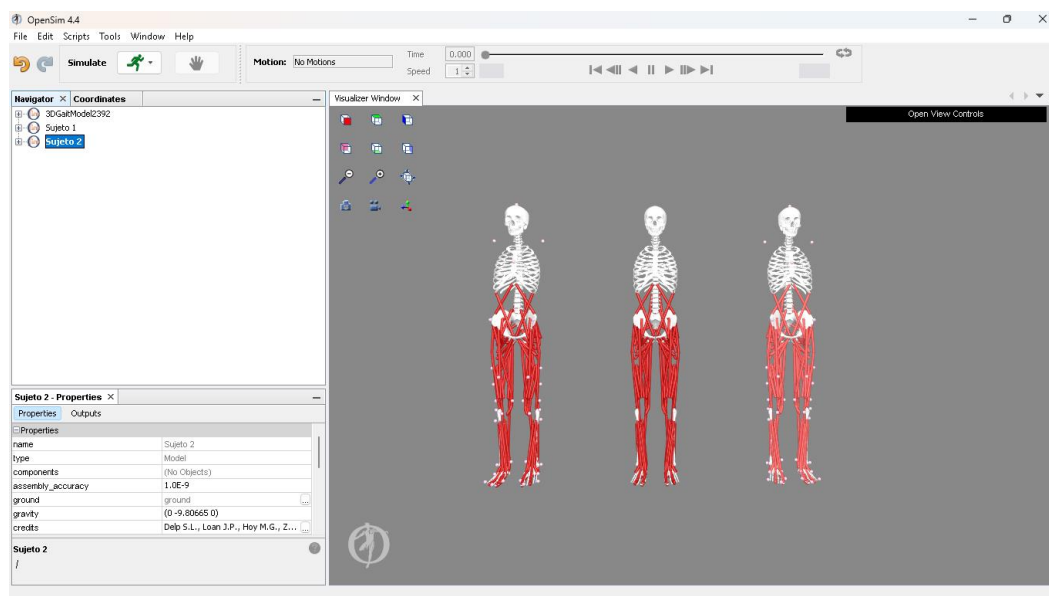


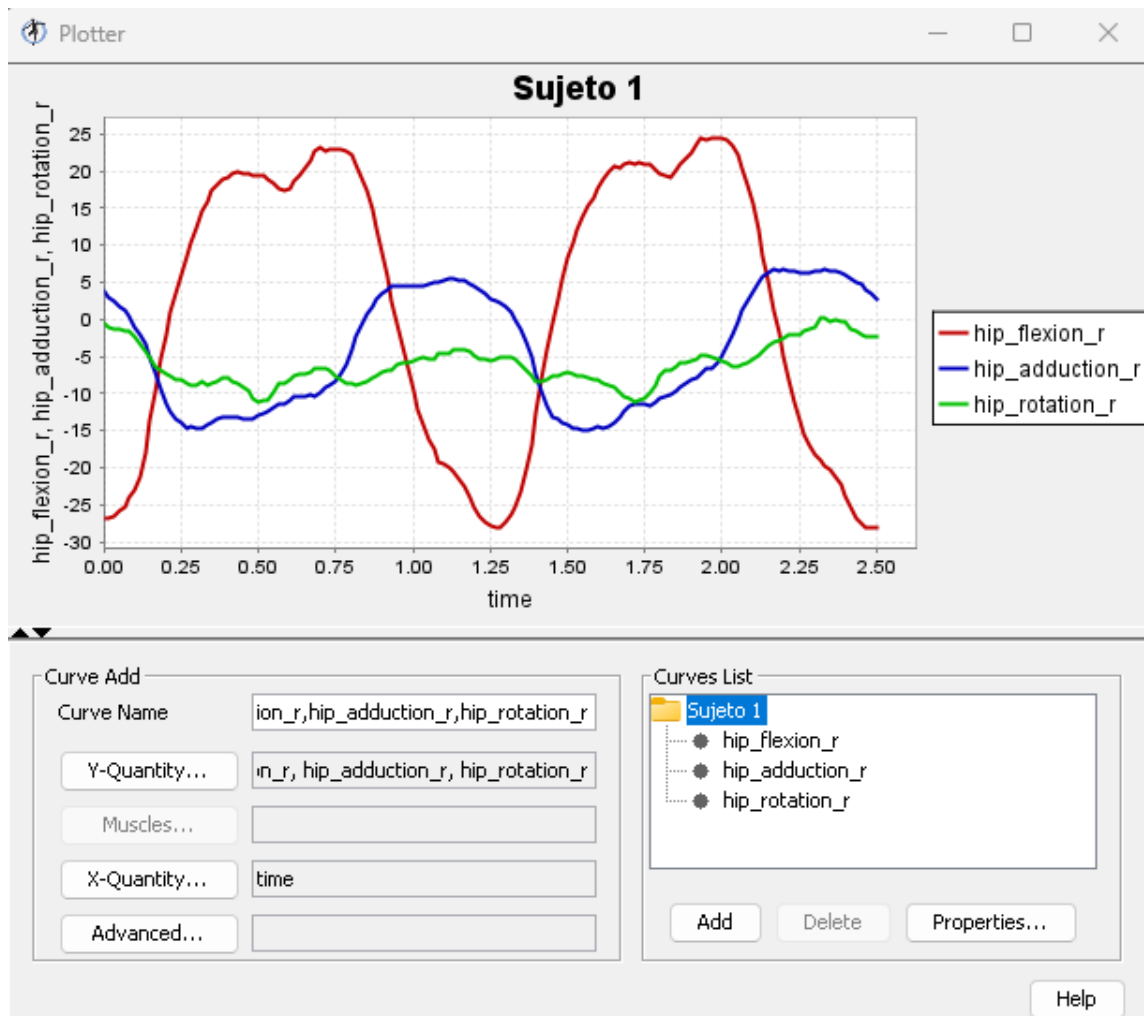
Figura 3.1 Modelos escalados; izquierda (sujeto 1), centro (modelo genérico), derecha (sujeto 2). [Fuente: Propia]

Se realiza la simulación de la caminata y obtenemos el archivo (.mot) de cada modelo, en la Figura 3.2, se presenta las curvas obtenidas para el modelo genérico (1.80 m y 75.16 kg) con un rango de movimiento de flexión de  $50.33^\circ$ , movimiento de aducción de  $20.65^\circ$  y movimiento de rotación de  $11.24^\circ$ .



**Figura 3.2** Resultados modelo genérico. [Fuente: Propia]

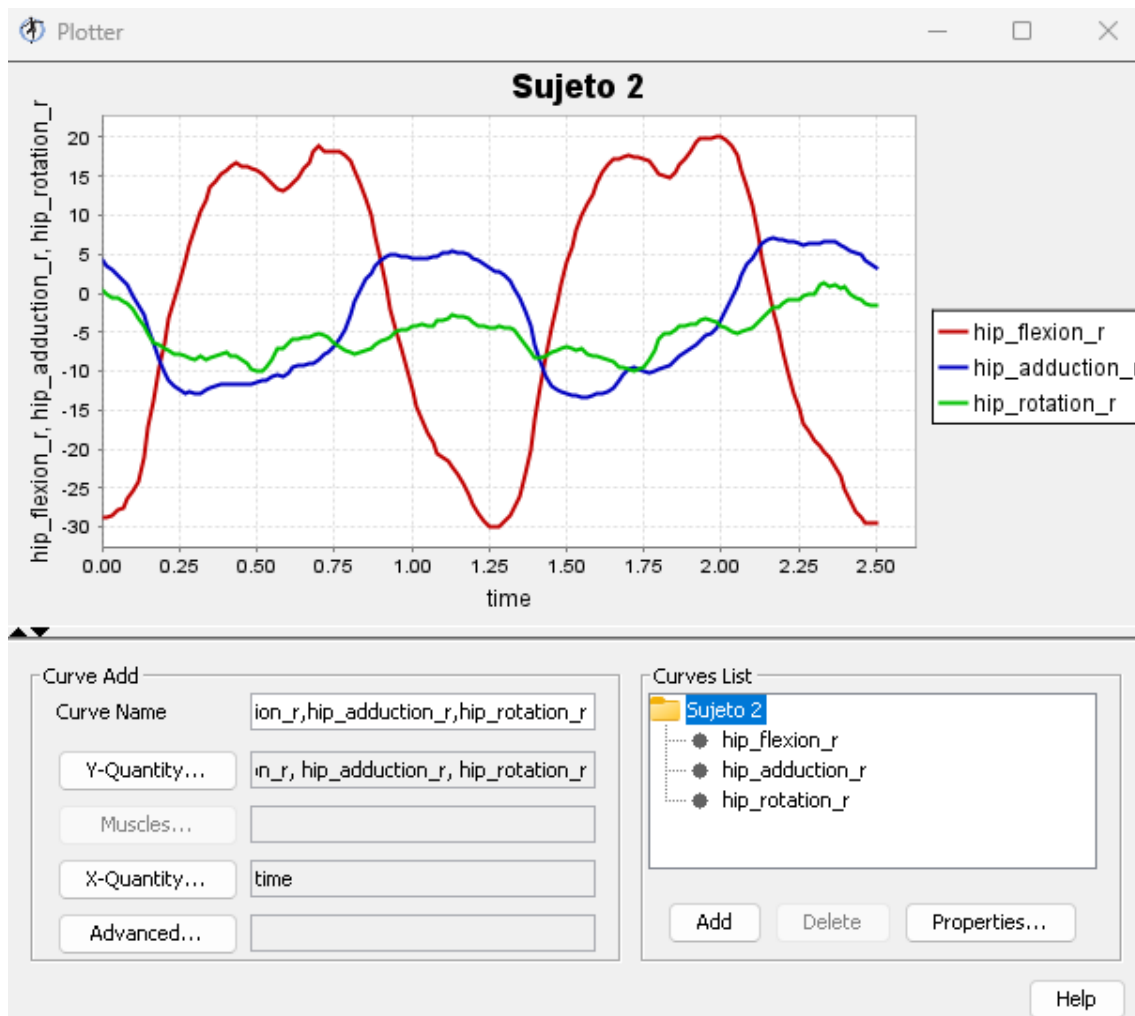
Para el modelo escalado del sujeto 1 (1.73 m y 64 kg) se realiza el mismo proceso, con los siguientes resultados: rango de movimiento de flexión de  $52.68^\circ$ , movimiento de aducción de  $21.79^\circ$  y movimiento de rotación de  $11.36^\circ$ . En la Figura 3.3, se presenta las curvas obtenidas para el modelo escalado del sujeto 1.



**Figura 3.3** Resultados modelo escalado sujeto 1. [Fuente: Propia]

Los resultados para el modelo escalado del sujeto 2 (1.83 m 68 kg) son: rango de movimiento de flexión de  $50.27^\circ$ , movimiento de aducción de  $20.62^\circ$  y movimiento de rotación de  $11.31^\circ$ . En la Figura 3.4, se presenta las curvas obtenidas para el modelo escalado del sujeto 2.





**Figura 3.4** Resultados modelo escalado sujeto 2. [Fuente: Propia]

En la Tabla 3.1 se muestra los resultados de los 3 modelos para los dos ciclos de caminata, los valores de rango de movimiento son muy cercanos, por lo que se interpreta que el escalado se realizó de manera correcta.

**Tabla 3.1** Resultados posición angular. [Fuente: Propia]

	Modelo Genérico		Modelo Sujeto 1		Modelo Sujeto 2	
	Valor máx.	Valor min.	Valor máx.	Valor min.	Valor máx.	Valor min.
Flexión	20.34	-29.99	24.53	-28.20	20.22	-30.05
Aducción	7.16	-13.49	6.73	-15.06	7.18	-13.44
Rotación	1.17	-10.02	0.09	-11.04	1.27	-10.04

## **3.2 Análisis cinemático**

Una vez obtenido los datos experimentales mediante fotogrametría, se realiza la validación mediante el uso del software Matlab y el cálculo de variables cinemáticas a través de gráficas que representan el movimiento realizado, y así comprobar la correcta ejecución de la técnica de fotogrametría.

Después de validar los datos experimentales, se procede a comparar las curvas de movimiento de flexión, aducción y rotación de la cadera del modelo genérico de Opensim y los modelos escalados, proceso presentado de forma individual en el apartado **3.1 Escalado del modelo de Opensim**.

Las variables cinemáticas a obtener son: posición, velocidad y aceleración angular de la cadera. En cuanto a las variables de movimiento son: flexión, aducción y rotación de la cadera, todo esto aplicado al modelo genérico de Opensim, modelos escalados, datos de fotogrametría y video análisis.

### **3.2.1 Posición Angular**

Para determinar la posición angular del miembro inferior con la cadera como punto de referencia, se escoge los marcadores del plano sagital, es decir los marcadores de la parte derecha del cuerpo humano: hombro, cadera, muslo, rodilla y tobillo. De las 3 pruebas realizadas, se escoge los mejores resultados para su validación mediante el software Matlab.

Se presenta la posición angular en la Figura 3.5 para el sujeto 1 (azul), modelo genérico de Opensim (rosado) y los resultados de video análisis para el sujeto 1 (amarillo), donde las curvas presentan la misma tendencia para el modelo genérico y el modelo de fotogrametría del sujeto 1.

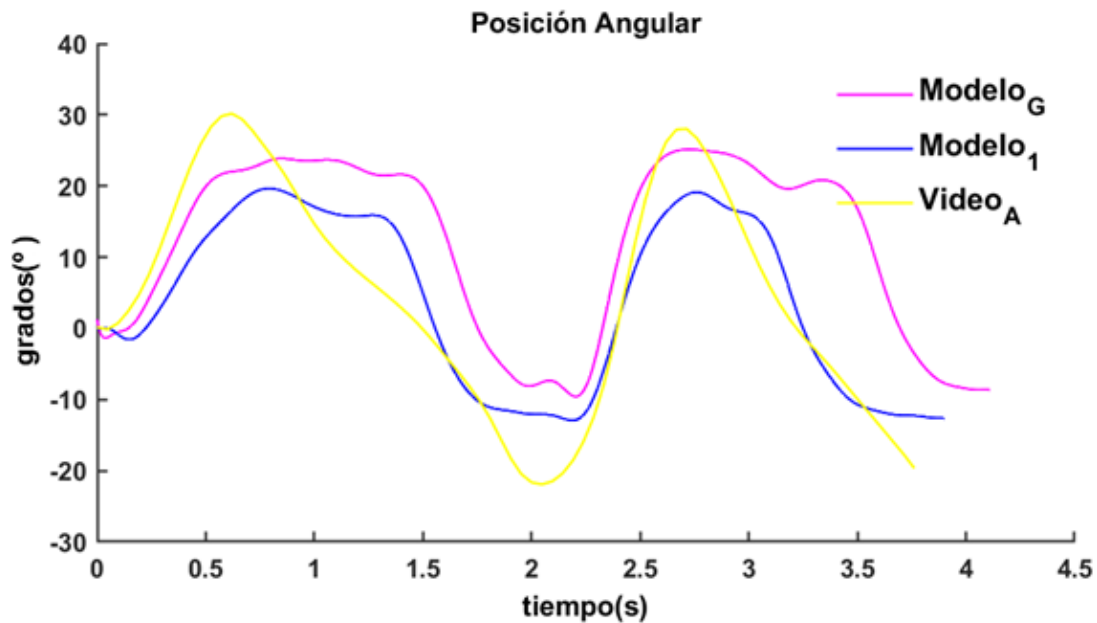


Figura 3.5 Posición angular. [Fuente: Propia]

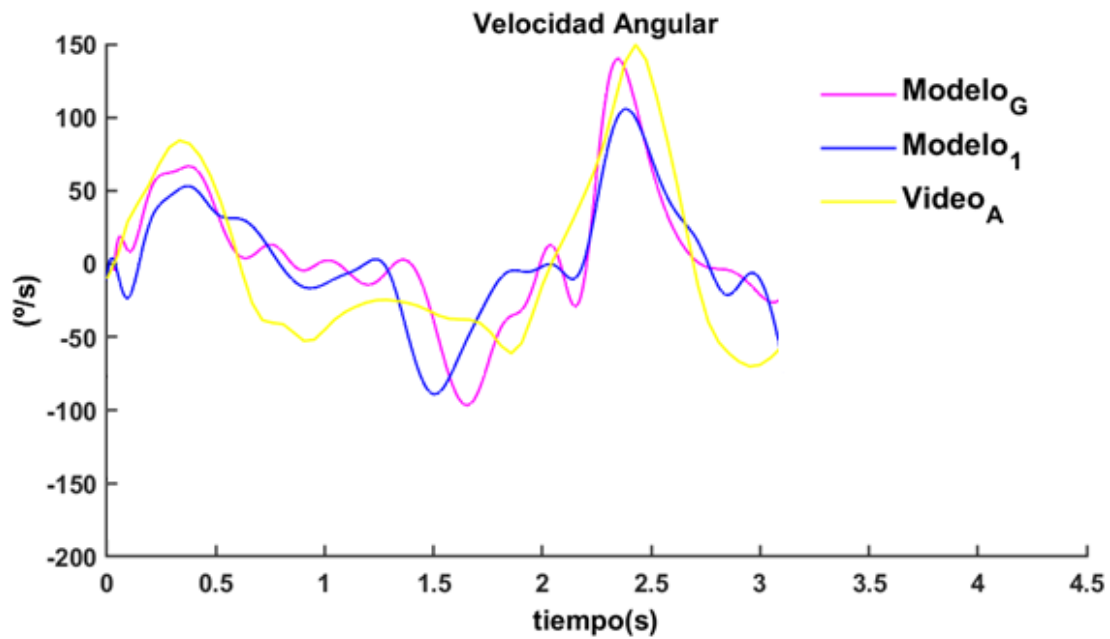
Los valores de posición angular máxima y mínima para los datos de fotogrametría, modelo de Opensim y Video análisis se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados posición angular. [Fuente: Propia]

Técnica	Valor Máximo	Valor Mínimo
Modelo Genérico	26.78°	-11.41°
Fotogrametría	22.46°	-13.85°
Video análisis	31.02°	-22.34°

### 3.2.2 Velocidad Angular

Los resultados de velocidad angular se presentan en la Figura 3.6, para 2 ciclos de la caminata, la tendencia de las curvas para el modelo de fotogrametría (azul) y el modelo genérico de Opensim (rosado) es muy aproximada, por lo cual es aceptable, igualmente la curva de video análisis describe un movimiento aproximado a los anteriores modelos. El movimiento que describe es armónico, es decir que, para los siguientes ciclos de marcha, esta tendencia se repetirá.



**Figura 3.6** Velocidad Angular. [Fuente: Propia]

Para los dos ciclos de la caminata se tiene que la velocidad angular máxima es de 138.95 ( $^{\circ}/s$ ) para fotogrametría, 147.72 ( $^{\circ}/s$ ) para el modelo genérico de Opensim, y 151.22 ( $^{\circ}/s$ ) para video análisis. La Tabla 3.3 muestra los resultados para cada técnica:

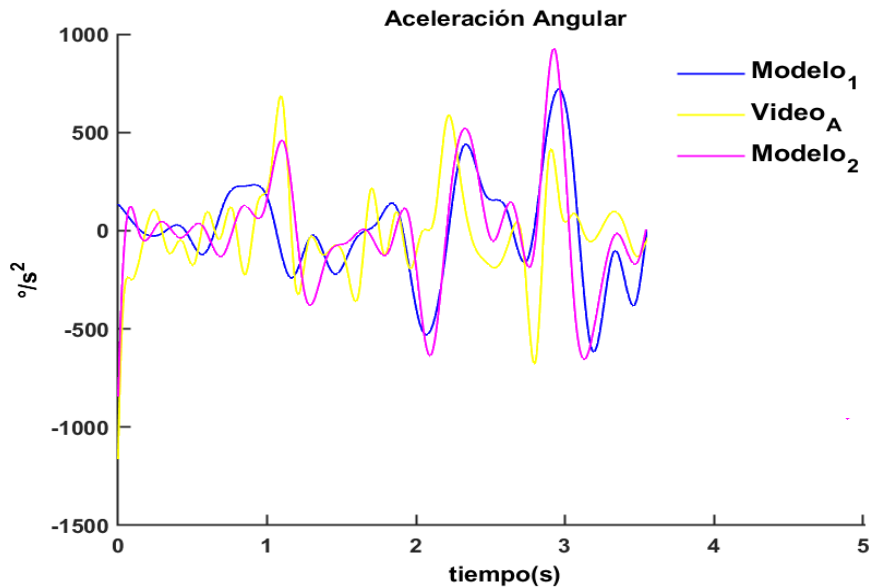
**Tabla 3.3** Resultados velocidad angular. [Fuente: Propia]

Técnica	Valor Máximo ( $^{\circ}/s$ )	Valor Mínimo ( $^{\circ}/s$ )
<b>Modelo Genérico</b>	147.72	-102.18
<b>Fotogrametría</b>	138.95	-89.45
<b>Video análisis</b>	151.22	-81.20

### 3.2.3 Aceleración Angular

Los resultados de aceleración angular se muestran en la Figura 3.7, para el movimiento de caminata durante 2 ciclos, la tendencia de las curvas es similares, sin embargo, las curvas obtenidas de los datos de Fotogrametría y del modelo genérico de Opensim se asemejan mucho más, con resultados de una

aceleración máxima para fotogrametría de  $542.58 \text{ (}^\circ/\text{s}^2\text{)}$ , para el modelo genérico de  $532.01 \text{ (}^\circ/\text{s}^2\text{)}$ , y para video análisis de  $226.35 \text{ (}^\circ/\text{s}^2\text{)}$ .



**Figura 3.7** Aceleración angular. [Fuente: Propia]

Los resultados de aceleración angular máxima y mínima para los datos de fotogrametría, modelo de Opensim y Video análisis se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Resultados aceleración angular. [Fuente: Propia]

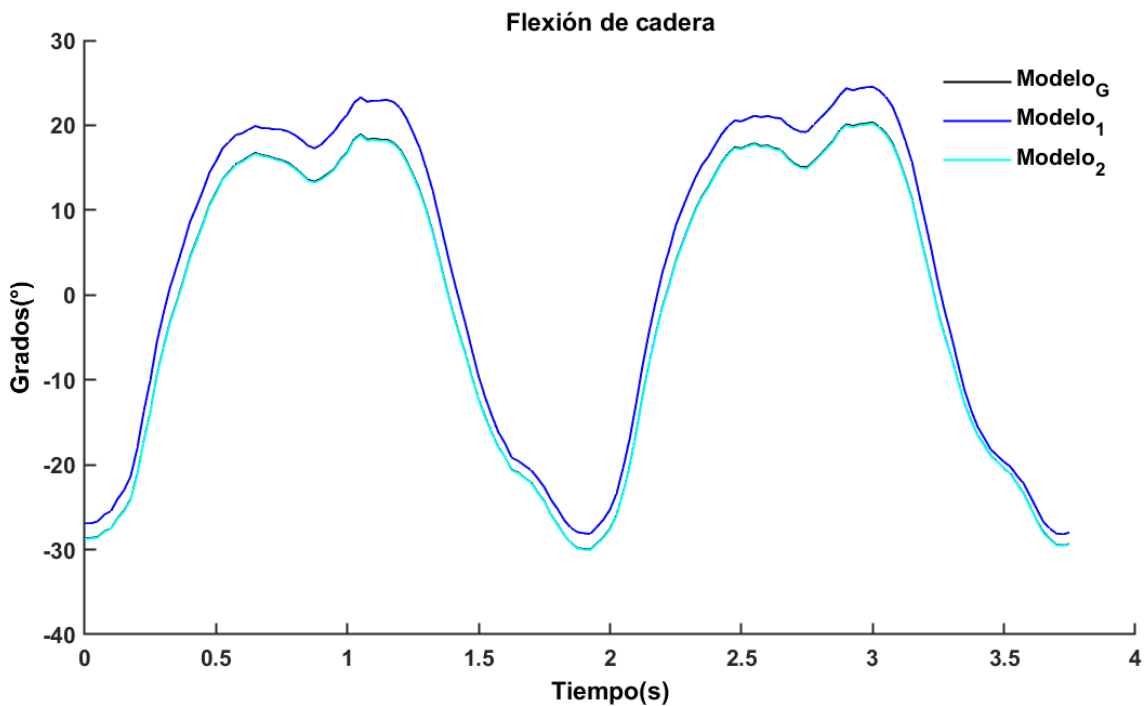
Técnica	Valor Máximo ( $^\circ/\text{s}^2$ )	Valor Mínimo ( $^\circ/\text{s}^2$ )
Modelo Genérico	986.24	-632.11°
Fotogrametría	842.35°	-621.78°
Video análisis	856.66°	-636.91°

### 3.2.4 Movimiento de Flexión de la Cadera

La edición del modelo musculo esquelético de Opensim (Gait2392\_Simbody) permite obtener otros modelos escalados, es decir, con las características antropométricas propias de los sujetos de estudio. Con esto, se analiza la cinemática inversa de los dos sujetos a través del programa Opensim en la opción: “Herramientas, y Cinemática Inversa”, se carga el archivo de trayectorias

de los marcadores, y se genera un archivo de movimiento (.mot) para cada individuo, dentro de este archivo se analiza las siguientes variables: movimiento de flexión, aducción y rotación de la cadera.

La Figura 3.8, muestra los resultados del movimiento de flexión de la cadera para el Modelo genérico (negro), Modelo escalado 1 (azul) y Modelo escalado 2 (celeste). La flexión ocurre cuando el muslo parte de una posición de reposo hasta una posición que tenga contacto con el tronco o hacia éste, esta acción se ejecuta en el plano sagital, y los valores máximos que alcanza para el modelo escalado del sujeto 1 es de  $24.53^\circ$ , para el modelo escalado del sujeto 2 es de  $20.22^\circ$  y para el modelo genérico de  $20.34^\circ$ .

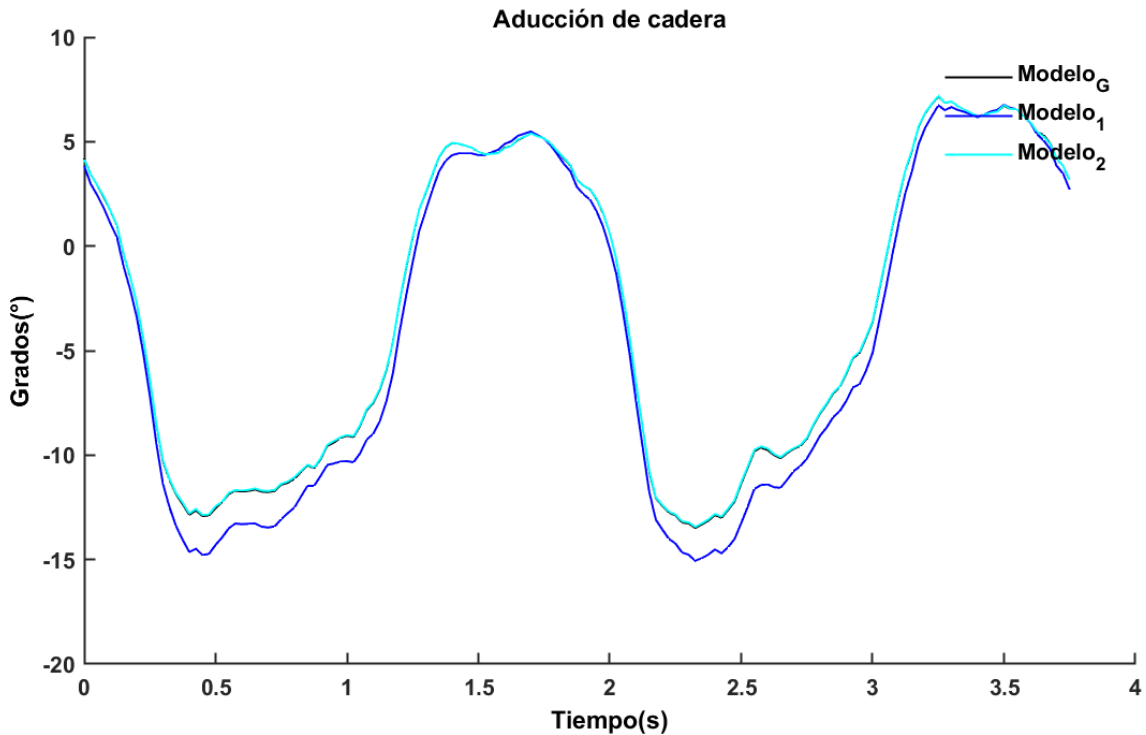


**Figura 3.8** Movimiento de Flexión de la cadera. [Fuente: Propia]

Se puede observar que las curvas del modelo genérico y el modelo escalado del sujeto 2 están casi superpuestas, con una diferencia de valores de  $0.12^\circ$ , esto debido a que el modelo genérico tiene una altura de 1.80m y el sujeto 2 de 1.83m, lo cual son 3 cm de diferencia y los resultados no varían mucho, caso contrario el modelo 1 tiene una altura de 1.73m por lo que la diferencia de los valores obtenidos son más visibles.

### 3.2.5 Movimiento de Aducción de la Cadera

La Figura 3.9, muestra el rango de movimiento de aducción de la cadera, movimiento en donde la pierna se dirige hacia el interior en el plano coronal o frontal, para el modelo 1 se tiene que el rango de movimiento se ejecuta entre los  $-15.06^\circ$  y  $6.77^\circ$ , para el modelo 2 y el modelo genérico entre los  $-14^\circ$  y  $7^\circ$ . Estos valores se encuentran en el rango normal de movimiento para una persona cuando ejecuta la acción de caminar.



**Figura 3.9** Movimiento de Aducción de la cadera. [Fuente: Propia]

De la misma manera que en la gráfica de movimiento de flexión de la cadera, las curvas del modelo genérico y el modelo del sujeto 2 están casi superpuestas, con una diferencia de valores de  $0.02^\circ$ , esto debido a que no existe mucha diferencia de estatura entre el modelo genérico y el sujeto 2, caso contrario con el modelo del sujeto 1, donde su rango de movimiento es más amplio.

### 3.2.6 Movimiento de Rotación de la Cadera

El movimiento de rotación ocurre cuando la punta del pie se dirige hacia dentro, en el plano coronal o frontal, el rango de movimiento es mínimo ya que la caminata se produce en el plano sagital, sin embargo, para detectar anomalías o trastornos en la caminata de la persona, se utiliza esta variable para su análisis. Para el modelo 1, el rango de movimiento se da entre los  $-11.04^{\circ}$  y  $0.09^{\circ}$ , para el modelo 2 y el modelo genérico entre los  $-10.04^{\circ}$  y  $1.27^{\circ}$ .

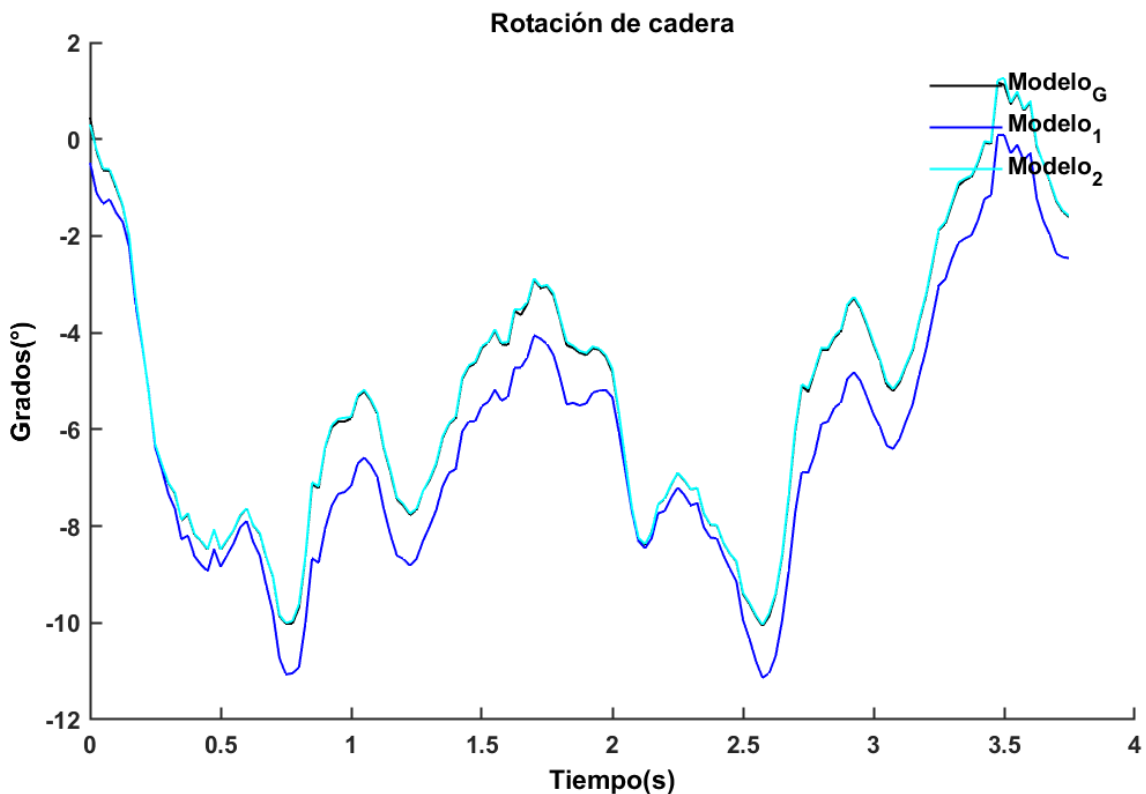


Figura 3.10 Movimiento de Rotación de la cadera. [Fuente: Propia]

La diferencia entre el modelo genérico y el modelo 2 para los valores mínimos es de  $0.02^{\circ}$  y los valores máximos es de  $0.10^{\circ}$ , caso contrario para el modelo 1 donde la diferencia es mayor, para valores mínimos de  $1.08^{\circ}$  y los valores máximos con  $1.02^{\circ}$ .

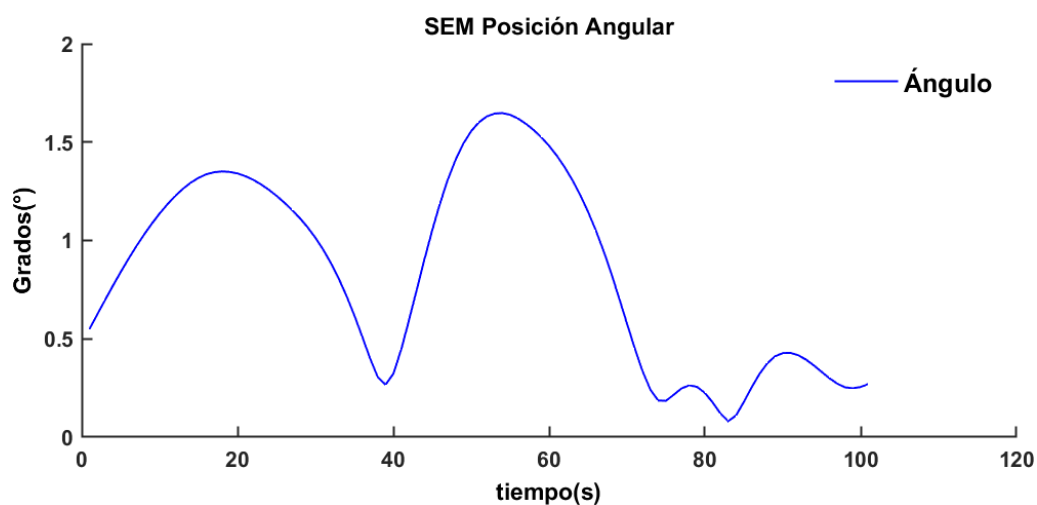


### 3.3 Validación

Para realizar la validación se utilizó el método SEM Y CMC aplicado a la técnica de fotogrametría para los 2 sujetos de prueba, los resultados se presentan de forma gráfica con la media de tres registros de datos, cuyas variables cinemáticas; posición angular, velocidad angular y aceleración angular.

#### 3.3.1 Error Estándar de Promedio (SEM) y Coeficiente de correlación múltiple (CMC)

Los resultados del método SEM se muestra en la Figura 3.11, para la posición angular. Los valores obtenidos mediante el método SEM indican cuánto se apartan de la media, como resultado se tiene entre 0.2 Y 1.65 grados de error, lo que se interpreta como un valor que se encuentra en del rango aceptable de validación.



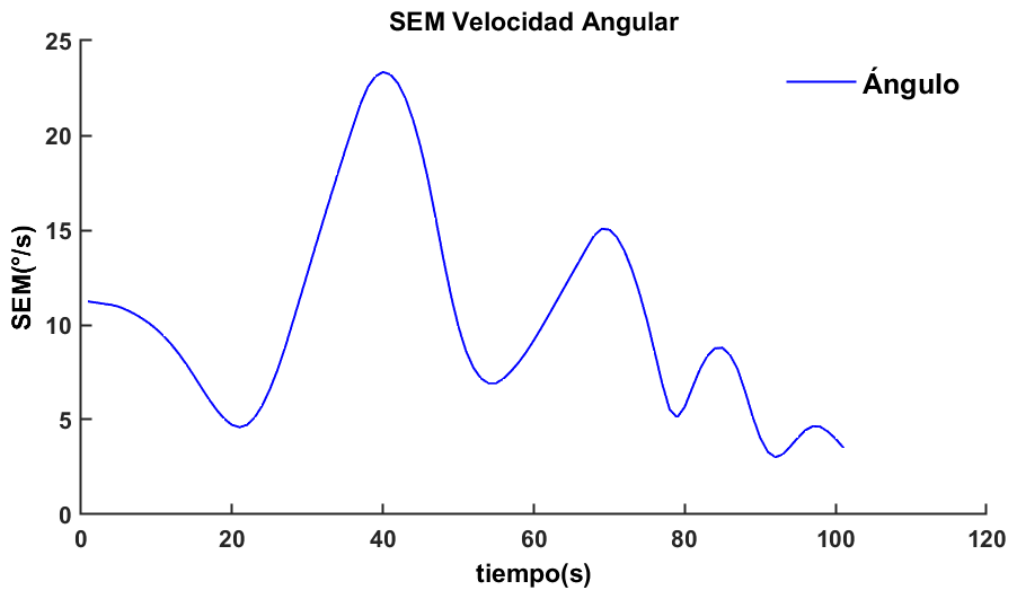
**Figura 3.11** Método SEM para posición angular. [Fuente: Propia]

En la Tabla 3.5 se indica los resultados obtenidos de ambas técnicas para los 2 sujetos de prueba, la media para el Sujeto 1 se obtiene 0.73° para SEM y 0.83 para CMC, para el Sujeto 2 resulta 0.84° para SEM y 0.89 CMC.

**Tabla 3.5** Resultados validación posición angular. [Fuente: Propia]

N	SUJETO 1		SUJETO 2	
	SEM	CMC	SEM	CMC
1	0.84	0.84	0.78	0.87
2	0.61	0.83	0.90	0.91
<b>Media</b>	0.73	0.83	0.84	0.89

Los resultados de velocidad angular se muestran en la Figura 3.12, para la técnica de fotogrametría, se obtiene entre 4.52 Y 20.34 grados de error, por lo que se interpreta como valores aceptables que se encuentran en el rango.



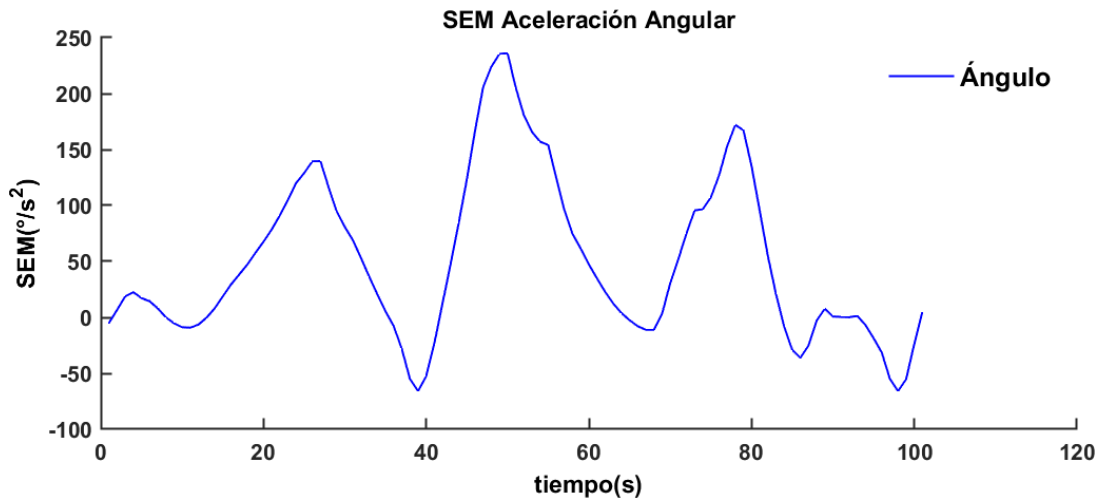
**Figura 3.12** Método SEM para velocidad angular. [Fuente: Propia]

La Tabla 3.6, indica los resultados de velocidad angular obtenidos para los dos sujetos de prueba, la media para el Sujeto 1 es de 9.14° para SEM y 0.84 para CMC, para el Sujeto 2 es de 10.34° para SEM y 0.89 CMC.

**Tabla 3.6** Resultados validación velocidad angular. [Fuente: Propia]

N	SUJETO 1		SUJETO 2	
	SEM	CMC	SEM	CMC
1	10.31	0.75	12.59	0.86
2	7.97	0.92	8.08	0.91
<b>Media</b>	9.14	0.84	10.34	0.89

Mediante la Figura 3.13, se presenta los valores de aceleración angular por el método SEM, para los dos sujetos con rangos aceptables para ambos casos, por lo que se considera como valores que se encuentran en un rango aceptable.



**Figura 3.13** Método SEM para aceleración angular. [Fuente: Propia]

La Tabla 3.7, se indica los datos de aceleración angular para los dos sujetos, la media para el método SEM del sujeto 1 es de 123.45 ( $^{\circ}/s^2$ ) y 0.82 para CMC. La media para para el sujeto 2 es de 123.77 ( $^{\circ}/s^2$ ) y 0.84 para CMC.

**Tabla 3.7** Resultados validación aceleración angular. [Fuente: Propia]

N°	SUJETO 1		CMC	
	SEM	CMC	SEM	CMC
1	128.63	0.79	144.27	0.81
2	118.26	0.84	103.27	0.86
Media	123.45	0.82	123.77	0.84

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se determina el modelo matemático que represente el movimiento de caminata y permita el cálculo de las variables cinemáticas como posición, velocidad y aceleración angular a partir de datos obtenidos de fotogrametría.
- Las variables cinemáticas se representan mediante gráficas, dando como resultado curvas con trayectorias y ángulos muy cercanos a la realidad del movimiento normal de caminata para dos personas con diferentes características antropométricas.
- Se realiza tres veces la toma de datos de forma experimental tanto para fotogrametría y video análisis, ya que influyeron factores como iluminación del laboratorio, movimientos mal realizados, movimientos acumulados que generan resultados incoherentes, e incorrecta elección del punto de referencia.
- Se logra editar modelos músculo esqueléticos a diferentes características antropométricas y datos de fotogrametría, mediante un modelo verificado y disponible en las bibliotecas de Opensim.
- El factor de escala se utilizó con valores uniformes para cada segmento

del cuerpo ya que las distancias entre marcadores no es un método exacto y como consecuencia trae resultados muy alejados.

- Se pudo determinar el rango de movimiento de flexión, aducción, y rotación de la cadera, mediante la obtención de archivos de movimiento (.mot) a partir de datos de fotogrametría (.trc), obteniendo resultados que permitan realizar futuros estudios en el ámbito de la biomecánica a partir de datos experimentales.
- El archivo de movimiento (.mot) se generó a través del escalado de modelo de Opensim, para obtener este archivo de forma experimental se necesita la recolección de valores de fuerzas para realizar el movimiento.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Es recomendable realizar exámenes de tomografía para obtener las características antropométricas con mayor exactitud y así determinar el factor de escala adecuado para cada segmento del cuerpo humano.
- Se recomienda utilizar el mismo número y posición de los marcadores del modelo de Opensim en la ejecución de la técnica de fotogrametría.
- Utilizar un dispositivo celular o cámara con buena resolución de video, además de realizarlo en una habitación sin luz, para que los marcadores reflectantes se vean con mayor claridad y los resultados de video análisis sean correctos.
- Se recomienda que esta investigación se realice con una muestra mayor, es decir realizar la técnica de fotogrametría con más personas, teniendo en cuenta, la edad, sexo y características antropométricas propias de cada sujeto.
- Utilizar un protocolo o pasos a seguir para ejecutar la técnica de

Fotogrametría de forma exitosa.

- Se recomienda utilizar el mismo tiempo y periodos del modelo de Opensim para cada movimiento realizado.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. van Houcke, V. Khanduja, C. Pattyn, and E. Audenaert, “The history of biomechanics in total hip arthroplasty,” *Indian J Orthop*, vol. 51, no. 4, pp. 359–367, Jul. 2017, doi: 10.4103/ORTHO.IJORTHO\_280\_17.
- [2] “CAPÍTULO TRES: BIOMECÁNICA DE LA MARCHA HUMANA.”
- [3] E. Sanchis-Sales *et al.*, *Biomecánica Bases del Movimiento Humano*, vol. 27, no. 1. 2020.
- [4] Z. Ding, D. Nolte, C. K. Tsang, D. J. Cleather, A. E. Kedgley, and A. M. J. Bull, “In vivo knee contact force prediction using patient-specific musculoskeletal geometry in a segment-based computational model,” *J Biomech Eng*, vol. 138, no. 2, 2016, doi: 10.1115/1.4032412.
- [5] “CAPÍTULO DOS: ANATOMÍA DE LA PIERNA HUMANA”.
- [6] D. Romero Gómez and J. Ojeda Granja, “Modelo biomecánico del pie usando Opensim: cinemática.”
- [7] “Biomechanics of the Hip - Physiopedia.” [https://www.physio-pedia.com/Biomechanics\\_of\\_the\\_Hip#cite\\_note-2](https://www.physio-pedia.com/Biomechanics_of_the_Hip#cite_note-2) (accessed Nov. 19, 2022).
- [8] R. Zaman, Y. Xiang, R. Rakshit, and J. Yang, “Muscle force prediction in OpenSim using skeleton motion optimization results as input data,” in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2019, vol. 1. doi: 10.1115/DETC2019-97520.
- [9] J. T. Weinhandl and H. J. Bennett, “Musculoskeletal model choice influences hip joint load estimations during gait,” *J Biomech*, vol. 91, pp. 124–132, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JBIOMECH.2019.05.015.
- [10] P. Balthazard, D. Currat, and F. Degache, “Fundamentos de biomecánica,” *EMC - Kinesiterapia - Medicina Física*, vol. 36, no. 4, pp. 1–8, Nov. 2015, doi: 10.1016/S1293-2965(15)74142-3.
- [11] “Escuela Politécnica Nacional | Laboratorio de Bio Ingeniería.” <https://www.epn.edu.ec/laboratorio-de-bio-ingenieria/> (accessed Feb. 27, 2023).
- [12] E. de Superior Ingeniería Y Arquitectura Unidad Zacatenco and D. F. Septiembre, “INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ‘PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA FOTOGRAMETRÍA ACTUAL’ QUE PARA OBTENER EL

TITULO DE: INGENIERO CIVIL PRESENTA: CIRO ISRAEL BRAULIO VITE,” 2005.

- [13] “fotogrametría.” <https:// analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/kinescan-ibv/itemlist/tag/fotogrametr%C3%ADa.html> (accessed Feb. 20, 2023).
- [14] “Ayuda la fotogrametría a mejorar marcas en deportistas - Gaceta UNAM.” <https://www.gaceta.unam.mx/ayuda-la-fotogrametria-a-mejorar-marcas-en-deportistas/> (accessed Feb. 20, 2023).
- [15] “ ¿Qué es la captura de movimiento o motion capture? | Another Indie Studio.” <https://anotherindiestudio.com/diccionario-o-vocabulario/que-es-la-captura-de-movimiento-o-motion-capture/> (accessed Dec. 02, 2022).
- [16] C. Pizzolato, M. Reggiani, L. Modenese, and D. G. Lloyd, “Real-time inverse kinematics and inverse dynamics for lower limb applications using OpenSim,” *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, vol. 20, no. 4, 2017, doi: 10.1080/10255842.2016.1240789.
- [17] M. S. Daoud, Y. Ghadi, and H. Almimi, “Optimization of the application software in biomechanics and their contribution to the biological field,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.25103/jestr.121.21.
- [18] Standford, “OPENSIM”, Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: <https://opensim.stanford.edu/>
- [19] SIM-TK, “Gait 2392 and 2354 Models.” <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Gait+2392+and+2354+Models> (accessed Dec. 15, 2022).
- [20] SIM-TK, “ Scaling, Inverse Kinematics, and Inverse Dynamics,” *Tutorial*. <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Tutorial+3++Scaling%2C+Inverse+Kinematics%2C+and+Inverse+Dynamics> (accessed Dec. 14, 2022).
- [21] E. W. Weisstein and E. W. Weisstein, “Rodrigues’ Rotation Formula,” *MathWorld*, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/RodriguesRotationFormula.html>
- [22] “Modelos Gait 2392 y 2354 - Documentación de OpenSim - Sitio global.” <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Gait+2392+and+2354+Models> (accessed Aug. 07, 2022).

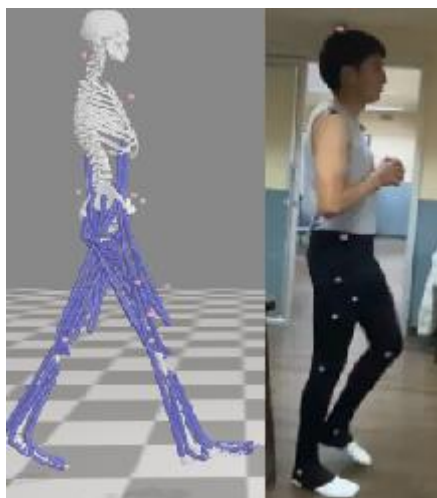


# **ANEXOS**

## **ANEXO I.**

### **TÉCNICA DE FOTOGRAMETRÍA PARA MOVIMIENTO DE CAMINATA**

## LOCALIZACIÓN



<b>Torso</b>	3 marcadores	
<b>Cadera</b>	3 marcadores	
<b>Muslos</b>	6 marcadores	
<b>Rodillas</b>	4 marcadores	
<b>Tobillos</b>	4 marcadores	
<b>Marcadores Anatómicos</b>		
Los 3 marcadores de la cadera, que se utilizan como referencia respecto a los demás.		
<b>Movimientos</b>		
Estático: el sujeto debe permanecer erguido durante 5 segundos.	Marcha de referencia estática: el sujeto debe realizar movimiento de marcha durante 1 minuto.	Caminata: el sujeto debe realizar el movimiento de caminata en una sola dirección para 2 ciclo de marcha.
<b>Dispositivos de grabación</b>		
Sistema de fotogrametría del Laboratorio de Bio Ingeniería de la EPN.	Dispositivo celular de 60 fps a 1080p.	
<b>Indumentaria</b>		
El sujeto a realizar la técnica debe estar con vestimenta anti reflectante o negra y apretada al cuerpo.		
<b>Condiciones ambientales</b>		
Evitar objetos reflectantes en la habitación, de ser necesario apagar la luz y utilizar el flash de las cámaras.		

**ANEXO II.**  
**PROGRAMACIÓN UTILIZADA**

## Análisis Cinemático

```
M1=dlmread('movimiento_2_marcha_cam_7_8.trc','',6,0); %Matriz de
fotogrametría y cambio de unidades (m)
n=max(size(M1)); %Encuentra el número de filas

nciclos=3;
% número de ciclos
nfunc=20*nciclos;
fps=200; %Fotogramas por segundo
tiempo=(0:(n-1))'/fps; %Encuentra el vector de tiempo
MC=calcM(M1,[1:20]);
MC0=MC(1:2, :, :);
MC0=nanmean(MC0,1);
MC1=MC;
for i=1:n
    for j=1:20;
        MC1(i, :, j)=(MC(i, :, j)-MC0(1, :, 10));
    end
end
MC01=MC0-MC0(1, :, 10); %método de desplazamientos finitos e infine..
[omega_cad ,svoc_cad ,RGv_cad ,sGv_cad
 ,M_cad,RG_cad]=finitosolid(MC1(:, :, [4 5 6 13 17]),MC01(:, :, [4 5 6 13
17])); %VECTOR DE RODRIGUEZ

for i=1:n
    XYZ(i, :)=convierterotacion(omega_cad(i, :),'rodrigues','xyz');
end
F1=180*XYZ(:, range(XYZ)==max(range(XYZ)))/pi;
fdamat=suavizado_bspline(F1, tiempo, nfunc, 6);
fi=fdamat(:, :, 1);
Dfi=fdamat(:, :, 2);
D2fi=fdamat(:, :, 3);
```

## Validación

```
% Ahora separamos los ciclos %%%%%%%%%%%

%%%%CORTAR CICLOS%%% DONDE PONDE ELEV, SE REFIERE A VELOCIDAD
POSITIVA;
%%%%DESC ES LA NEGATIVA
% FLEXO EXTENSIÓN: ELEV = EXTENSIÓN; DESC = FLEXIÓN
% FLEXION LATERAL : ELEV = A LA DERECHA; DESC = A LA IZQUIERDA
% TORSIÓN : ELEV= GIRO A LA IZQUIERDA ; DESC = GIRO A LA DERECHA
% Ahora cortamos los ciclos usando la elevación como variable
principal q
%%Defin0 el tamaño de la cosa y el tiempo
%t=(0:(n-1))'/fps;
```

```

qs=fi;
qs=qs-nanmean(qs)
v=Dfi;
% ahora hacemos un vector de índices
i=1:n;
%Sacamos los puntos en los que la velocidad es positiva. No pongo cero
para
%cortar exponenciales
j=i(ne(0,diff(v>prctile(abs(v),5)))); % esto sa los índices donde la
velocidad tiene maximo o minimo
% como aquí empezamos en cero, es posible que al principio o final
haya
% puntos de velocidad cero con poco desplazamiento. Eliminamos
aquellos
% cuyo fi sea inferior a un umbral, por ejemplo un tercio del p95
kk=abs(qs(j))>(prctile(abs(qs(j)),95)/10);
j=j(kk);
m=max(size(j));
k=1:m; % para tene un vector con los indices de j y así poder sacar
uego cosas
% umbral de salto entre dos máximos o mínimos
u=diff(prctile(qs,[25 75]))/2;

ii=sign(qs(j)')<0; %logical([(diff(qs(j)')>u) 0]);
ii=[ii(1) diff(ii)];
iel=j(logical(ii==1)); %indices donde terminan los ciclos de subida
fel=j(logical(ii==-1)); %inidices donde empiezan los ciclos de subida
ii=sign(qs(j)')>0; %
ii=[ii(1) diff(ii)]; %logical([(diff(qs(j)')<-u) 0]);
ide=j(logical(ii==1)); %indices donde terminan los ciclos de descenso
fde=j(logical(ii==-1)); %inidices donde empiezan los ciclos de bajada

niel=numel(iel);nide=numel(ide);nfel=numel(fel);nfde=numel(fde);
nciclos=min([niel nide nfel nfde]);
nielm=fix(numel(iel)/2);nidem=fix(numel(ide)/2);nfelm=fix(numel(fel)/2
);nfdem=fix(numel(fde)/2);

if qs(iel(1))<0
    if numel(iel)>=numel(fde)
        indicesLR=iel;
    else
        indicesLR=fde;
    end

    if numel(fel)>=numel(ide)
        indicesRL=fel;
    else
        indicesRL=ide;
    end
else
    if numel(fel)>=numel(ide)
        indicesLR=fel;
    else
        indicesLR=ide;
    end
end

```

```

end

if numel(iel)>=numel(fde)
    indicesRL=iel;
else
    indicesRL=fde;
end
end

%%%%% sacar datos en hipermatrices, una para los cilos de elevación y
otra para la bajada, cada una con n filas
% 3 columnas y 7 planos %%%%%

% primera con omegab, saldra una hipermatriz con 101 filas (0-100%),
tres columnas (angulo fi,
% 3 componentes de omegab, tres componentes de
%del ángulo, de x y de y y 5 planos, uno por repetición
%Defino una cadena de variables a la cinematica del eje helicoidal
instantaneo
vars={'fi','Dfi','D2fi'};
Tel=zeros(numel(indicesLR)-1,1);
Pc=101;
fi_LR=zeros(Pc,3,numel(indicesLR)-1);
Dfi_LR=zeros(Pc,3,numel(indicesLR)-1);
D2fi_LR=zeros(Pc,3,numel(indicesLR)-1);
%Se interpola las variables segmentadas por ciclos en escalas de
tiempos
%iguales para los movimientos en el orden de elevación y descenso o
derecha
%a izquierda
for r=1:numel(indicesLR)-1
    tt=tiempo(indicesLR(r):indicesLR(r+1))-tiempo(indicesLR(r));
    TLR(r)=max(tt)-eps;%el eps se pone para que nunca salga por encima
del valor máximo, si no da errores en la última medida
    tn=TLR(r)*(0:(Pc-1))/(Pc-1);
    tLR(:,:,r)=tn;
    nf=floor(max(size(tt))/3);
    %angulo de elevacion
    kk=[fi Dfi D2fi];
    kk=kk(indicesLR(r):indicesLR(r+1),:);
    fdamat = suavizado_bspline(kk, tt, nf, 4,tn);
    if fdamat(end,1,1)==0
        fdamat(end,:,1)=fdamat(end-1,:,1);
        fdamat(end,:,2)=fdamat(end-1,:,2);
        fdamat(end,:,3)=fdamat(end-1,:,3);
    else
        end
        fi_LR(:,:,r) =fdamat(:,:,1);
        Dfi_LR(:,:,r) =fdamat(:,:,2);
        D2fi_LR(:,:,r)=fdamat(:,:,3);
    end
end

Tel=zeros(nciclos,1);

```

```

Pc=101;
fielev=zeros(Pc,3,nciclos);
Dfielev=zeros(Pc,3,nciclos);
D2fielev=zeros(Pc,3,nciclos);
nvar=numel(vars);
%Se interpola las variables segmentadas por cuarto de ciclos en
escalas de tiempos iguales
for r=1:nciclos
    tt=tiempo(iel(r):fel(r))-tiempo(iel(r));
    Tel(r)=max(tt)-eps;%el eps se pone para que nunca salga por encima
del valor máximo, si no da errores en la última medida
    tn=Tel(r)*(0:(Pc-1))/(Pc-1);
    telev(:,:,r)=tn;
    nf=floor(max(size(tt))/3);
    %angulo de elevacion
    kk=[fi Dfi D2fi];
    kk=kk(iel(r):fel(r),:);
    fdamat = suavizado_bspline(kk, tt, nf, 4,tn);
    if fdamat(end,1,1)==0
        fdamat(end,:,1)=fdamat(end-1,:,1);
        fdamat(end,:,2)=fdamat(end-1,:,2);
        fdamat(end,:,3)=fdamat(end-1,:,3);
    else
    end
    fielev(:,:,r) =fdamat(:,:,1);
    Dfielev(:,:,r) =fdamat(:,:,2);
    D2fielev(:,:,r)=fdamat(:,:,3);
end

for i=1:2
    hold on
    plot(fielev(:,2,i))
end

corte=0;
ciclos.telev=telev(:,:,:);
ciclosLR.t=tLR(:,:,:);
    for i = 1:nvar
        eval(['ciclos.',vars{i}, 'elev =
',vars{i}, 'elev(1+corte:Pc, :, :)']);
        eval(['ciclosLR.',vars{i}, ' = ',vars{i}, '_LR(1:Pc-
corte, :, :)']);
    end

media.telev=nanmean(ciclos.telev,3);
mediaLR.t=nanmean(ciclosLR.t,3);
    for i = 1:nvar
        eval(['media.',vars{i}, 'elev =
mean(ciclos.',vars{i}, 'elev,3)']);
        eval(['mediaLR.',vars{i}, ' = mean(ciclosLR.',vars{i}, ',3)']);
    end

plot(mediaLR.fi(:,1))
hold on

```

```

plot(mediaLR.fi(:,2))
for i=1:2
    hold on
    plot(ciclos.fielev(:,2,i))
end

plot(media.fielev(:,2),'o')

Xd=ciclos.fielev;
Xc=permute(Xd,[3 1 2]);
cse=2;
typ='single';
[Max Min Rango Media Mediana SEM DesvStan Varianza Sig_F F_test Sig_Q
Q_test Percentil IQR fxi xi Icc CMC CMCm cmc
Pearson]=ICorre_sesiones(cse,typ,Xc)

plot(SEM)

```

## Movimiento de Flexión, Aducción y Rotación de cadera

```

Datos=dlmread('Movimiento_sujetol.txt',' ',11,0); %Registro de
movimiento
n1=max(size(Datos)); %Encuentra el número de filas
nciclos1=2;
% número de ciclos
nfunc=20*nciclos1;
fps1=40; %Fotogramas por segundo
tiempo1=(0:(n1-1))/fps1; %Encuentra el vector de tiempo
plot(tiempo1,Datos(:,11))

hip_flexion_r=Datos(:,11)-nanmean(Datos(:,11));
plot(tiempo1,hip_flexion_r)
nanmean(hip_flexion_r)
centrado1=hip_flexion_r-nanmean(hip_flexion_r);
%%
Datos2=dlmread('Movimiento_generico.txt',' ',11,0); %Registro de
movimiento
n2=max(size(Datos2)); %Encuentra el número de filas
nciclos2=2;
% número de ciclos
nfunc=20*nciclos2;
fps2=40; %Fotogramas por segundo
tiempo2=(0:(n2-1))/fps2; %Encuentra el vector de tiempo
plot(tiempo2,Datos2(:,10))

hip_flexion_r2=Datos2(:,11)-nanmean(Datos2(:,11));
plot(tiempo2,hip_flexion_r2)
nanmean(hip_flexion_r2)
centrado2=hip_flexion_r2-nanmean(hip_flexion_r2);
%%

```



```

Datos3=dlmread('Movimiento_sujeto2.txt',' ',11,0); %Registro de
movimiento
n3=max(size(Datos3)); %Encuentra el número de filas
nciclos3=2;
% número de ciclos
nfunc=20*nciclos3;
fps3=40; %Fotogramas por segundo
tiempo3=(0:(n3-1))/fps3; %Encuentra el vector de tiempo
plot(tiempo3,Datos3(:,11))

hip_flexion_r3=Datos3(:,11)-nanmean(Datos3(:,11));
plot(tiempo3,hip_flexion_r3)

nanmean(hip_flexion_r3)
centrado3=hip_flexion_r3-nanmean(hip_flexion_r3);

figure (1)
plot(tiempo1,centrado1,'b','LineWidth',1); hold on;
plot(tiempo2,centrado2,'k','LineWidth',1);
plot(tiempo3,centrado3,'c','LineWidth',1);
xlabel('Tiempo(s)','Color','k');
ylabel('Grados(°)','Color','k');
legend('Modelo_1','Modelo_G','Modelo_2','fontsize',10,'FontWeight','bold');
legend box off;
title('Rotación de cadera');
set(gca,'linew',1,'fontsize',10,'FontWeight','bold');
box off;
hold off

```

## Gráficas cinemáticas

```

M3=dlmread('VIDEOMARCHA1.trc',' ',6,0); %Matriz de fotogrametría y
cambio de unidades (m)
n3=max(size(M3)); %Encuentra el número de filas

nciclos3=2;
% número de ciclos
nfunc=100*nciclos3;
fps3=25; %Fotogramas por segundo
tiempo3=(0:(n3-1))/fps3; %Encuentra el vector de tiempo
MC3=calcM(M3,[1:7]);
MC03=MC3(1:2, :, :);
MC03=nanmean(MC03,1);
MC33=MC3;
for i=1:n3
    for j=1:7;
        MC33(i, :, j)=(MC3(i, :, j)-MC3(1, :, 2));
    end
end
MC033=MC03-MC03(1, :, 2); %método de desplazamientos finitos e
infinite..

```

```

[omega_cad ,svoc_cad ,RGv_cad ,sGv_cad
,M_cad,RG_cad]=finitosolid(MC33(:,:, [3 4 5 6 7]),MC033(:,:, [3 4 5 6
7])); %VECTOR DE RODRIGUEZ

for i=1:n3
    XYZ(i,:)=convierterotacion(omega_cad(i,:), 'rodrigues', 'xyz');
end
F3=180*XYZ(:, range(XYZ)==max(range(XYZ)))/pi;
fdamat=suavizado_bspline(F3, tiempo3, nfunc, 6);
fi3=fdamat(:,:,1);
Dfi2=fdamat(:,:,2);
D2fi2=fdamat(:,:,3);

M2=dlmread('movimiento_2_marcha_cam_7_8.trc',' ',6,0)*1000; %Matriz de
fotogrametría y cambio de unidades (m)
n2=max(size(M2)); %Encuentra el número de filas

nciclos2=2;
% número de ciclos
nfunc=20*nciclos2;
fps2=200; %Fotogramas por segundo
tiempo2=(0:(n2-1)')/fps2; %Encuentra el vector de tiempo
MC2=calcM(M2, [1:20]);
MC02=MC2(1:2, :, :);
MC02=nanmean(MC02,1);
MC22=MC2;
for i=1:n2
    for j=1:20;
        MC22(i, :, j)=(MC2(i, :, j)-MC2(1, :, 10));
    end
end
MC022=MC02-MC02(1, :, 10); %método de desplazamientos finitos e
infine..
[omega_cad ,svoc_cad ,RGv_cad ,sGv_cad
,M_cad,RG_cad]=finitosolid(MC22(:,:, [4 5 6 13 17]),MC022(:,:, [4 5 6 13
17])); %VECTOR DE RODRIGUEZ

for i=1:n2
    XYZ(i,:)=convierterotacion(omega_cad(i,:), 'rodrigues', 'xyz');
end
F2=180*XYZ(:, range(XYZ)==max(range(XYZ)))/pi;
fdamat=suavizado_bspline(F2, tiempo2, nfunc, 6);
fi2=fdamat(:,:,1);
Dfi2=fdamat(:,:,2);
D2fi2=fdamat(:,:,3);

M1=dlmread('Modelo_generico.trc',' ',6,0)*1000; %Matriz de
fotogrametría y cambio de unidades (m)
n1=max(size(M1)); %Encuentra el número de filas

nciclos1=2;
% número de ciclos
nfunc=20*nciclos1;
fps1=250; %Fotogramas por segundo

```

```

tiempo1=(0:(n1-1))'/fps1; %Encuentra el vector de tiempo
MC1=calcM(M1,[1:20]);
MC0=MC1(1:2, :, :);
MC0=nanmean(MC0,1);
MC11=MC1;
for i=1:n1
    for j=1:20;
        MC11(i, :, j)=(MC1(i, :, j)-MC0(1, :, 10));
    end
end
MC011=MC0-MC0(1, :, 10); %método de desplazamientos finitos e infine..
[omega_cad ,svoc_cad ,RGv_cad ,sGv_cad
,M_cad,RG_cad]=finitosolid(MC11(:, :, [4 5 6 13 17]),MC011(:, :, [4 5 6 13
17])); %VECTOR DE RODRIGUEZ

for i=1:n1
    XYZ(i, :)=convierterotacion(omega_cad(i, :),'rodrigues','xyz');
end
F1=180*XYZ(:, range(XYZ)==max(range(XYZ)))/pi;
fdamat=suavizado_bspline(F1, tiempo1, nfunc, 6);
fil=fdamat(:, :, 1);
Dfil=fdamat(:, :, 2);
D2fil=fdamat(:, :, 3);

figure (1)
plot(tiempo1, fil, 'm', 'LineWidth', 1); hold on;
plot(tiempo2, fi2, 'b', 'LineWidth', 1);
plot(tiempo3, fi3, 'y', 'LineWidth', 1);
xlabel('tiempo (s)', 'Color', 'k');
ylabel('m/s', 'Color', 'k');
legend('Modelo_G', 'Modelo_1', 'Modelo_2', 'fontsize', 12, 'FontWeight', 'bold');
legend box off;
title('Posición Angular');
set(gca, 'linew', 1, 'fontsize', 10, 'FontWeight', 'bold');
box off;
hold off

```