DISEÑO DE UN MECANISMO ROBÓTICO BÍPEDO ANTROPOMÓRFICO VALIDADO POR SEÑALES BIOMECÁNICAS

IAN ALEJANDRO CASTAÑEDA GAEVSKA

ÁLVARO IVÁN SIERRA CARREÑO

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

ORIENTADOR:

JUAN EMILIO SANABRIA SANABRIA

INGENIERO MECATRONICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2025

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____ _____

Firma del director Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá D.C. febrero de 2025

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario general

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Directora del Programa

Dra. María Angélica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico especialmente a Nathalia, la única persona que siempre confió en mi criterio, me motivó y me ayudó en todo el camino. Agradezco también a mi papá César, a mi mamá Halina y a mi hermana Laisvie que siempre me ayudaron a tener los pies en la tierra y el cerebro en la estratosfera.

Ian Alejandro Castañeda Gaevska

Este trabajo se lo dedico especialmente a todas las personas que siempre creyeron en mí, en que había escogido mi mayor gusto, sin esperar que la terminara siempre estuvieron apoyándome durante este proceso, a mi madre y mi padre que siempre me acompañaron en estos años de esfuerzos puliéndome, demostrando el amor que se debe tener desde casa, a mis amigos más cercanos que siempre estuvieron para darme un apoyo incondicional cuando no tenía luz en los días más oscuros, también a mí que siempre soñé con poder llegar a este momento pese a todas las adversidades estoy aquí cerrando un paso más en mi vida.

Álvaro Iván Sierra Carreño.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
1. ESTADO DEL ARTE	16
2. JUSTIFICACIÓN	19
2.1 Planteamiento del problema	19
2.2 Pregunta de investigación	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 Objetivo general	21
3.2 Objetivos específicos	21
4. MARCO TEÓRICO	22
4.1 Robot	22
4.2 Robótica moderna	22
4.3 Robots antropomórficos	22
4.4 Aplicaciones en medicina	23
4.5 Aplicaciones en científicas	23
4.6 Aplicaciones en servicio	23
4.7 Cinemática	23
4.8 Cinemática de robot	24
4.8.1 Cinemática directa	24
4.8.2 Modelo denavit-hartenberg	24
4.8.3 Cinemática inversa	24
4.8.4 Modelo cinemático	25
4.8.5 Grados de libertad	25

4.9 Movimientos antropomórficos 26

4.10 Biomecánica 27

4.11 Marcha humana 27

4.11.1 Plano sagital 27

4.12 Simulación de trayectoria 27

4.13 Servo motores 28

4.13.1 Sensores 28

4.14 Síntesis dimensional 28

4.15 Análisis por elementos finitos 28

4.16 Cálculo de la masa promedio de una persona por estatura 29

4.17 Distribución porcentual del peso corporal por segmento 29

4.18 Esfuerzos y deformaciones unitarias 30

4.19 Materiales de uso prostético 30

4.19.1 Tereftalato de polietileno glicol 30

4.19.2 Aluminio 3003 30

4.19.3 Titanio aditivo y fresado (ti6al4v-eli) 31

5. METODOLOGÍA 32

5.1 Análisis de teoría y antecedentes 32

5.2 Construcción del modelo y síntesis dimensional 34

5.3 Análisis de materiales y elementos finitos del modelo cad 35

5.3.1 Cálculo de la carga por sección corporal 35

5.3.2 Generación del enmallado de simulación 36

5.3.3 Simulaciones y resultados gráficos 37

5.3.4 Cuadro comparativo para los materiales de construcción del elemento bípedo 41

5.4 Implementación del modelo cad em simscape 41

5.4.1 Cambio de bloque de solido 42

5.4.2 Instalación del complemento de Matlab para inventor 45

5.4.3 Configuración bloques de Matlab Simulink Multibody 49

5.4.4 Configuración transformada rígida para cada solido 52

5.4.5 Configuración transformada rígida para el PIE 53

5.4.6 Configuración de las transformadas rígidas para la solido de la pierna 55

5.4.7 Configuración solido muslo 57

5.4.8 Configuración solida de la Cadera 59

5.5 Análisis de graficas de simscape y comparación com el modelo anterior de software 61

5.6 Cálculo del esfuerzo crítico de cizalladura en los pasadores 72

5.6.1 Pasadores en la coyuntura del tobillo 72

5.6.2 Pasador para la coyuntura de la rodilla 73

5.6.3 Pasador para la coyuntura de la cadera 74

6. CONCLUSIONES 75

REFERENCIAS 77

ANEXOS 79

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 *Grados de libertad de la pierna y la cadera* 26

Figura 2 *Vista isométrica el sólido correspondiente a la cadera* 33

Figura 3 *Vista isométrica para el sólido correspondiente al muslo* 33

Figura 4 *Vista isométrica para el diseño de la pierna* 34

Figura 5 *Vista isométrica para sólido correspondiente al pie* 34

Figura 6 *Ensamble propuesto cargador en el ambiente de ANSYS* 35

Figura 7 *Cargas distribuidas porcentuales para simulación de carga* 36

Figura 8 *Enmallado para simulación de carga y deformaciones* 37

Figura 9 *Visualización isométrica para los esfuerzos equivalentes de Von Mises* 38

Figura 10 *Visualización de las coyunturas de la cadera para los esfuerzos de Von Mises* 38

Figura 11 *Detalle para la coyuntura de la cadera para los esfuerzos de Von Mises* 39

Figura 12 *Coyuntura de tobillos para los esfuerzos equivalentes de Von Mises* 40

Figura 13 *Detalle coyuntura de tobillo para los esfuerzos equivalentes de Von Mises.* 40

Figura 14 *Ubicación y representación del solido correspondiente a la cadera en ambiente SIMSCAPE* 42

Figura 15 *Ubicación de los sólidos del muslo, pierna y pie en ambiente SIMSCAPE* 43

Figura 16 *Librería Browser de Simscape variables de masa file solid* 44

Figura 17 *Ambiente de bloques de Matlab Simulink Multibody* 45

Figura 18 *Verificación de la versión de MATLAB* 46

Figura 19 *Ejecución de Matlab como administrador* 46

Figura 20 *Activación del complemento en Inventor para el cargue de los sólidos* 47

Figura 21 *Ambiente de bloques simscape multibody ensamble importado desde inventor* 48

Figura 22 *Simulación del ensamble Robot Biped* 49

Figura 23 *Configuración bloque File Solid Inertia* 50

Figura 24 *Configuración Frame en File Solid* 51

Figura 25 *Conjunto de bloques de transformadas rígidas* 52

Figura 26 *Transformaciones rígidas para la unión del pie y la pierna* 53

Figura 27 *Configuración de la transformada rígida para la pierna bloque PE-PERNA* 54

Figura 28 *Configuración de transformada rígida ROTACION S3 S4* 54
Figura 29 *Configuración de las transformadas rígidas para la pierna* 55
Figura 30 *Configuración de la transformada rígida para el bloque PERNA_PE* 56
Figura 31 *Configuración de la transformada rígida para el bloque MUSLO PIERNA* 56
Figura 32 *Configuración de las transformadas rígidas del MUSLO* 57
Figura 33 *Configuración de la transformada rígida MUSLO RODILLA* 58
Figura 34 *Configuración de la transformada rígida MUSLO CADERA* 58
Figura 35 *Configuración de la transformada rígida ROTACION S0 S1* 59
Figura 36 *Configuracion transformadas rígidas de la CADERA* 59
Figura 37 *Configuración de la transformada rígida HAT DIR S0 S1* 60
Figura 38 *Configuración de la transformada rígida HAT ESQ S0 S1* 60
Figura 39 *Configuración de la transformada rígida HAT ALT INI* 61
Figura 40 *Torque de rodilla tobillo y pie ciclo de marcha* 62
Figura 41 *Torques de cadera y rodilla para la pierna derecha simulación original* 63
Figura 42 *Torque de cadera y rodilla para la pierna derecha para simulación propuesta* 63
Figura 43 *Torque del tobillo de la pierna derecha para la simulación original* 64
Figura 44 *Torque tobillo pierna derecha para la simulación propuesta* 65
Figura 45 *Torque de cadera derecha y cadera izquierda para la simulación original* 66
Figura 46 *Torque para la cadera izquierda y derecha para la simulación propuesta* 67
Figura 47 *Torque de rodilla derecha y rodilla izquierda para la simulación original* 68
Figura 48 *Torque de la rodilla derecha e izquierda para la simulación propuesta* 69
Figura 49 *Torque para el tobillo derecho e izquierdo para la simulación original* 70
Figura 50 *Torque para el tobillo derecho e izquierdo para la simulación propuesta* 71
Figura 51 *Diagrama de cuerpo libre el pasador del tobillo* 72
Figura 52 *Diagrama de cuerpo libre para el pasador para la rodilla* 73
Figura 53 *Diagrama de cuerpo libre pasador coyuntura de la cadera* 74
Figura 54 *Configuración de bloque file solid Pierna* 87
Figura 55 *Configuración de la pierna block file solid frame de la pierna* 88
Figura 56 *Configuración de File Solid MUSLO Izquierdo* 89
Figura 57 *Configuración Configuración de File Solid MUSLO Izquierdo* 90
Figura 58 *Configuración de File solid Cadera* 91

Figura 59 *Configuración de file solid frarme de la cadera* 92
Figura 60 *Configuración de transformada rígida Pierna Izquierdo* 93
Figura 61 *Configuración de transformada rígida Pie Izquierdo* 94
Figura 62 *Configuración de transformada rígida PE_PERNA* 95
Figura 63 *Configuración de transformada rígida ROTACION S3 S4* 95
Figura 64 *Configuración de transformada rígida pierna Izquierdo* 96
Figura 65 *Configuración de transformada rígida PERNA_PE* 97
Figura 66 *Configuración de transformada rígida MUSLO PIERNA Izquierdo* 97
Figura 67 *Configuración de transformada rígida MUSLO Izquierdo* 98
Figura 68 *Configuración de transformada rígida MUSLO RODILLA Izquierda* 99
Figura 69 *Configuración de transformada rígida MUSLO CADERA Izquierda* 99
Figura 70 *Configuración de transformada rígida ROTACION S0 S1 Izquierda* 100

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 *Segmento corporal e incidencia en el peso corporal* 29

Tabla 2 *Parámetros de longitudes iniciales de los solidos* 32

Tabla 3 *Cuadro comparativo materiales de construcción elemento bípedo* 41

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar en un software CAD y simular la marcha de un mecanismo bípedo, para posteriormente compararlo con gráficas obtenidas en trabajos anteriores. Este proyecto tiene como origen el interés por el desarrollo y la investigación de la integración del diseño mecánico, la biomecánica y la robótica en la Universidad de América, con el propósito de contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas con limitantes motrices en las extremidades inferiores de su cuerpo o complementar proyectos que busquen contribuir, en modo alguno a este contexto, como es la robótica colaborativa. El enfoque de este proyecto tiene como fundamento el diseño de los componentes del mecanismo robótico usando una herramienta de software CAD, y la integración de estos componentes en la biblioteca SIMSCAPE de Simulink de Matlab, para la simulación del ciclo de marcha. El objetivo principal de este proyecto es lograr un diseño de un mecanismo bípedo que se ajuste, tanto como sea posible, a la marcha humana, comparado con señales biomecánicas de referencia. Las señales biomecánicas de referencia son los perfiles de torque en cada grado de libertad considerado en el mecanismo, respetando las restricciones específicas que afectan el movimiento humano en el plano sagital de referencia.

Palabras clave: Mecanismo bípedo, mecánica, marcha humana, plano sagital, simulación de trayectoria

INTRODUCCIÓN

Los robots humanoides son sistemas con múltiples articulaciones que cuentan con dos piernas para la locomoción y dos brazos para la manipulación, siendo considerados ideales para colaborar con los humanos en entornos operativos compatibles con herramientas humanas.

Algunos ejemplos notables de robots humanoides incluyen HUBO, Atlas, Asimo, HRP y Schaft. [1]. Inicialmente, estos robots se diseñaron para entornos estructurados y limitados; sin embargo, la necesidad de realizar tareas en entornos no estructurados y peligrosos, como en casos de desastres, ha impulsado la investigación en hardware y algoritmos de control más avanzados.

La investigación actual en robótica y mecanismos bípedos se centra en resolver el problema de la locomoción, abordando preguntas sobre qué variables son las que mejor reflejan el comportamiento de la marcha y cómo controlar estas variables para lograr patrones de marcha deseados en robots. Sin embargo, esta tarea es compleja debido a la multitud de variables involucradas, tanto antropométricas, como espacio-temporales, cinemáticas y cinéticas. Los robots bípedos son sistemas altamente no lineales con una complejidad que aumenta con el número de grados de libertad, lo que los hace difíciles de controlar y requiere tecnologías y técnicas avanzadas para abordar cuestiones como control de trayectoria, estabilidad y generación de patrones de marcha.

Este proyecto de investigación se enfoca en la síntesis dimensional óptima de un mecanismo robótico bípedo según un modelo antropométrico, que pueda imitar, de manera precisa y eficiente los movimientos de la marcha humana en el plano sagital. La marcha humana es un proceso altamente complejo que involucra una interacción sofisticada entre los sistemas musculoesquelético y neuromuscular. Lograr que estos movimientos se repliquen con precisión requiere una comprensión profunda de la biomecánica de la marcha y su implementación en un mecanismo robótico.

Para garantizar una réplica precisa de los movimientos de la marcha, se necesita inicialmente el prototipo CAD con las respectivas entradas de diseño para, posteriormente, simular el comportamiento del mecanismo y compararlo con señales biomecánicas de referencia, con las que, en este caso corresponden a los perfiles de torque en las articulaciones de la cadera, la rodilla y el tobillo en el plano sagital, durante un ciclo de marcha normal. Las trayectorias angulares de referencia en cada grado de libertad considerado, se obtuvieron en el laboratorio de

instrumentación para biomecánica de la facultad de Física de la Universidad Estatal de Campiñas ubicada en San Pablo, Brasil.

Por último, este proyecto contendrá un análisis y comparación entre dos materiales de producción para el prototipo, utilizando el análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés). Esto se convierte en una herramienta esencial en el diseño y desarrollo de prototipos de robots bípedos, particularmente para la selección de materiales. Este proceso permite evaluar la respuesta estructural del robot bajo diferentes condiciones de carga y optimizar el diseño para garantizar la resistencia, rigidez y durabilidad necesarias

1. ESTADO DEL ARTE

El artículo "Highly Realistic Anthropomorphic Robotic Arm and Hand Design" [2] aborda la creación y desarrollo de un brazo y mano robóticos con características antropomórficas altamente realistas. El objetivo central del estudio es diseñar un dispositivo que no solo se asemeje a un brazo y mano humanos en términos de apariencia, sino que también imite sus movimientos y capacidades funcionales. Los resultados del estudio indican que los investigadores lograron desarrollar una mano robótica con una apariencia extremadamente realista, adecuada para aplicaciones que requieren interacción humana. Este realismo ayuda a evitar sensaciones de incomodidad en los usuarios, un aspecto crucial en la interacción humano-robot. El artículo de O'Malley et al. (2020) proporciona una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la robótica antropomórfica, subrayando la importancia de la integración de diseño mecánico avanzado, algoritmos de control sofisticados y pruebas rigurosas para lograr resultados óptimos en la creación de dispositivos robóticos realistas. [2]

El artículo “Soft robotics for human-robot interaction: a review of soft actuators and sensors” [3] presenta avances en robótica blanda, centrándose en actuadores y sensores blandos y su aplicación en la interacción humano-robot, con el objetivo de mejorar la seguridad, adaptabilidad y efectividad en estos robots. La metodología incluye seis fases: hace referencia a los actuadores blandos como neumáticos, hidráulicos y basados en materiales inteligentes; diseño y funcionamiento de estos actuadores para movimientos suaves y biológicos; revisión de sensores blandos como los de deformación, presión, tacto y proximidad; integración de estos componentes en robots blandos para una interacción segura y precisa; aplicaciones específicas en prótesis y exoesqueletos, mejorando la comodidad y funcionalidad para los usuarios; y finalmente, mejoras en seguridad y adaptabilidad mediante el uso de estos sensores y actuadores blandos [3]

El artículo “Algoritmo para controlar un brazo antropomórfico usando una transformación lineal” [4] presenta un algoritmo diseñado para manipular un brazo robótico antropomórfico utilizando una pantalla táctil LCD y una transformación lineal, con el objetivo de facilitar el control del brazo para personas con discapacidades físicas que tienen dificultades para mover sus cuerpos o carecen de fuerza suficiente. El algoritmo, desarrollado en MATLAB, permite visualizar la trayectoria del brazo robótico y su representación con tres articulaciones movidas por motores paso a paso. El control se realiza mediante una transformación lineal que traduce las coordenadas de la pantalla

táctil (dos dimensiones) a movimientos en el espacio tridimensional del brazo robótico. Se utilizan dos transformaciones lineales para controlar el movimiento del brazo, permitiendo que este llegue al punto deseado en el espacio en menos de un segundo. El artículo concluye con una discusión crítica de los resultados obtenidos en las simulaciones y experimentos, destacando la precisión y eficiencia del algoritmo. [4]

El artículo “Aplicación de técnicas de desenvolvimiento de producto para el desarrollo de un robot antropomórfico” [5] presenta el desarrollo de un robot antropomórfico mediante técnicas avanzadas de desarrollo de producto, con el objetivo de crear un robot capaz de interactuar con humanos y ser útil en diversas aplicaciones, desde asistencia personal hasta investigación en inteligencia artificial y robótica. En la fase de diseño conceptual, se definen características como estructura, movilidad y sistemas de control, eligiendo el enfoque más adecuado basado en funcionalidad, costo y viabilidad técnica. Durante el diseño detallado y prototipado, se seleccionan componentes y materiales, desarrollando prototipos para validar el diseño. La integración de sistemas asegura que la mecánica, electrónica y software trabajen eficientemente, y se realicen pruebas exhaustivas para evaluar y mejorar el desempeño del robot. El artículo concluye que las técnicas avanzadas de desarrollo de productos han permitido crear un robot funcional y adaptable a múltiples aplicaciones futuras [5]

El artículo "Concepto de robot humanoide antropométrico para investigación en control" [6] describe el diseño y desarrollo de un prototipo de robot bípedo antropomórfico con 10 grados de libertad (DOF), inspirado en las proporciones humanas y optimizado para operar en entornos humanos. Utilizando SolidWorks y MATLAB para el diseño y simulación, el prototipo sigue principios antropométricos y reglas internacionales, como las de la RoboCup. El artículo revisa antecedentes teóricos y prácticos, citando ejemplos de robots bípedos de diversas instituciones, y detalla la selección de materiales, actuadores y la geometría de las articulaciones. Se establece un modelo antropométrico para asegurar movimientos realistas y funcionales, integrando sensores y sistemas de control en cada articulación para mejorar su operatividad en entornos no estructurados. En resumen, el artículo ofrece un enfoque exhaustivo para desarrollar un robot bípedo robusto, destinado a futuras investigaciones en control de locomoción y comportamiento autónomo. [6]

El artículo “Sistema manipulador antropomórfico de tres grados de libertad” [7] describe el desarrollo de un sistema manipulador antropomórfico de tres grados de libertad, diseñado para

aplicaciones industriales y de investigación. Inspirado en la antropometría humana, el manipulador realiza movimientos naturales y fluidos, utilizando motores paso a paso y sensores avanzados para controlar y monitorear sus movimientos. La estructura ligera y robusta del sistema, junto con un diseño modular, permite futuras expansiones y mejoras. Los algoritmos avanzados de control gestionan la coordinación de los motores y sensores, ajustando la posición y velocidad en respuesta a señales de control y adaptándose a diferentes condiciones de carga y entorno. Experimentos demuestran su capacidad para realizar tareas complejas con alta precisión, incluyendo la manipulación de objetos frágiles y movimientos delicados, adecuados para aplicaciones como la cirugía robótica y el ensamblaje electrónico. El sistema destaca por su precisión y adaptabilidad, y su diseño antropomórfico asegura una interacción segura y eficiente, lo que lo convierte en una herramienta versátil y efectiva para diversas aplicaciones. [7]

El artículo “Prototipo de emulación de movimiento humano mediante una plataforma bípeda humanoide” [8] detalla el desarrollo y evaluación de un robot bípedo diseñado para replicar los movimientos humanos, con el objetivo de mejorar la comprensión de la locomoción humana y desarrollar aplicaciones en áreas como la asistencia a personas con discapacidad y la robótica de servicio. El prototipo incluye articulaciones y motores que imitan las funciones de las extremidades humanas, y su estructura está optimizada para mantener el equilibrio y estabilidad durante la marcha. Utiliza técnicas avanzadas de control y algoritmos que ajustan los movimientos en tiempo real basándose en datos de sensores. Los resultados experimentales demostraron que el robot puede caminar en superficies planas, subir y bajar escaleras, y navegar en terrenos irregulares, mostrando su potencial para diversas aplicaciones. El estudio concluye que emular el movimiento humano mediante una plataforma bípeda es viable y beneficioso, proporcionando herramientas valiosas para la investigación y nuevas posibilidades para el desarrollo de robots de asistencia y servicio. [8]

2. JUSTIFICACIÓN

El desafío de reproducir la marcha humana en diferentes mecanismos o robots, radica en la cantidad de variables y diferentes relaciones y reacciones que se generan al momento de realizar los movimientos. El contacto del pie con el suelo, los ángulos variables de la rodilla, la capacidad de la cadera de generar movimientos para disminuir el impacto o equilibrar el cuerpo, todo esto y más hace que el replicar la marcha humana fielmente, sea una tarea de una magnitud considerable [9]. Con base a lo anterior, se pretende crear un diseño que replique las trayectorias que rigen el movimiento mecánico humano en el plano sagital, cumpliendo con las restricciones angulares y grados de libertad del mismo. La intención entonces, de este proyecto es generar sólidos que serán cargados en SIMULINK para obtener las gráficas de torque a lo largo del ciclo de marcha de cada una de las articulaciones, y así compararlas con los resultados previamente obtenidos por otros autores. Siendo consecuentes con esta propuesta, se plantea una metodología con un enfoque cualitativo, teniendo en cuenta el análisis de la teoría, la construcción del modelo CAD, la simulación del modelo CAD, y a través de las gráficas resultado, generar una comparación con las curvas obtenidas de las mediciones realizadas sobre humanos.

2.1 Planteamiento del problema

El problema que se plantea en este proyecto, se centra en la posibilidad de tener un software que permita el cargue y la simulación de diferentes ensambles de 3 grados de libertad orientados a replicar los miembros inferiores del cuerpo humano, y poder obtener como resultado los torques producidos durante la totalidad del ciclo de marcha para cada una de las articulaciones. Es importante entonces resaltar que este software será de utilidad para futuros proyectos de investigación que deseen realizar simulaciones con los parámetros previamente establecidos.

Por otra parte, es importante resaltar que, en la actualidad, los robots que se enfocan en sustituir a los humanos en interacciones simples y con bajos niveles de raciocinio, buscan generar un alto grado de similitud con los movimientos humanos y así lograr que el relacionamiento entre robots y humanos sea imposible de diferenciar con las relaciones humano-humano. La capacidad de replicar los torques en cada una de las articulaciones, generará similitud entre los movimientos del mecanismo y los movimientos naturales del humano.

2.2 Pregunta de investigación

¿Cómo realizar la síntesis dimensional de los componentes de un mecanismo robótico bípedo antropomórfico en función de señales biomecánicas, orientado a replicar un movimiento de marcha aproximado de la dinámica natural humana?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Diseñar en un software CAD un mecanismo bípedo con longitudes antropométricas, orientado a replicar, a través de la simulación, los movimientos característicos del patrón de marcha humana en el plano sagital.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar en un software CAD el modelo geométrico y el modelo cinemático para el mecanismo bípedo utilizado para describir el comportamiento del miembro inferior humano durante el ciclo de la marcha en el plano sagital.
- Diseñar los componentes del mecanismo bípedo para satisfacer la trayectoria deseada durante un ciclo de marcha basándose en las longitudes típicas humanas.
- Simular el comportamiento del mecanismo en SIMSCAPE y compararlo con las curvas correspondientes a los perfiles de torque en cada articulación del mecanismo para una trayectoria de marcha en el plano sagital.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Robot

Un robot es una estructura mecánica que opera con un grado de autonomía, controlada por un ordenador, para llevar a cabo una tarea y que cuenta con un sistema sensorial, de complejidad avanzado, para recoger información de su entorno. Tradicionalmente, la robótica se clasifica en dos áreas principales: la robótica de manipulación y la robótica móvil. La robótica de manipulación ha trascendido el ámbito industrial y, junto a la robótica móvil, ha generado numerosas aplicaciones en diversos campos, que incluyen desde robots quirúrgicos hasta robots humanoides y mascotas robóticas, desarrollados por importantes multinacionales japonesas. [10]

4.2 Robótica moderna

En el primer tercio del siglo XX comienzo el desarrollo de la ingeniería en diversas ramas del conocimiento como lo son (mecánica, electrónica, informática, telecomunicaciones), uniendo estas disciplinas facilito la creación de robots modernos. La lista de hitos científicos y técnicos relacionados con la robótica no se limita a la ingeniería, sino que también abarca las matemáticas y la física teórica. Las formulaciones de Lagrange, Newton y Euler, realizadas durante el periodo clásico, son esenciales para desarrollar posteriormente las ecuaciones que explican la dinámica y la inteligencia de los robots actuales. Los avances en computación de las últimas décadas han sido el impulso decisivo que ha permitido crear máquinas que se acercan al ideal de automatismo y autonomía que siempre han buscado los creadores de robots

Actualmente la robótica desempeña un papel muy importante en la sociedad contemporánea y tiene infinidad de aplicaciones que varían desde robótica industrial, domótica, medicina, entre otros. La robótica ha avanzado tanto en la sociedad que actualmente sería difícil concebir la sociedad como la reconocemos, sin todos los procesos que automáticamente se realizan por medio de la robótica. [11]

4.3 Robots antropomórficos

La robótica ha revolucionado y transformado la producción en innumerables industrias, aumentando así la eficiencia, precisión, velocidad de producción y repetibilidad en los procesos de manufactura. La sustitución de la mano de obra, por medio de robótica industrial, permite que las fábricas no detengan su producción ni sean dependientes de horarios, sino que mantienen volúmenes de manufactura constante y por ende disminuyen los costos operativos y de producción.

Adicionalmente los robots que tienen una estructura antropomórfica tienen la capacidad de mezclarse visualmente con el ambiente y generar menos aversión respecto al cambio. [12]

4.4 Aplicaciones en medicina

En la medicina se utilizan los robots para realizar cirugías asistidas, o procesos de microcirugía. Los procesos donde los robots se utilizan permiten y aseguran, repetibilidad y precisión en los procesos. Adicionalmente permiten que cada procedimiento quede documentado en su totalidad y cada uno de los movimientos por cada coordenada que se realizó a través del robot o asistente. [13]

4.5 Aplicaciones en científicas

A través de robots se pueden realizar observaciones por prolongados tiempos y en zonas donde nunca hubiese sido posible realizar observaciones. Por ejemplo, en las zonas donde la presión por el agua, no permite la presencia de humanos, los robots han logrado superar esas barreras y presentarnos un universo que en la actualidad aún estamos reconociendo. [13]

4.6 Aplicaciones en servicio

Actualmente, la demanda de servicio y la atención al usuario requieren consistencia, repetibilidad y confiabilidad en las respuestas entregadas. Dentro de los procesos de servicios y atención al usuario, se ha descubierto que es importante que el usuario sienta algo de “tacto humano”, y la forma más fácil de obtener dicho resultado, es a través de lograr un robot con una imagen humana. Por ese motivo los robots Antropomórficos y de comportamiento humano, se encuentran en auge. Los procesos no solo responden a la respuesta en términos del lenguaje, sino también a los procesos de movimiento y expresiones. [10]

4.7 Cinemática

La cinemática se refiere como parte del estudio de dinámica de los sistemas físicos, donde se realiza la descripción a partir de la geometría, la posición, la velocidad y la aceleración de un cuerpo o partícula en un instante específico del tiempo. En el estudio cinemático puntual de un robot, se pueden utilizar dos aproximaciones diferentes, la cinemática directa y la cinemática inversa. [14]

4.8 Cinemática de robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y orientación del extremo final del robot y los valores que toman sus coordenadas articulares. [11]

4.8.1 Cinemática directa

Se refiere al problema de determinar la posición y orientación final del extremo de un robot (o efector final) dado un conjunto de valores para sus articulaciones. En otras palabras, a partir de los ángulos de las articulaciones o las longitudes de los eslabones, se calcula la ubicación del efector final en el espacio tridimensional. Es un proceso relativamente directo y se representa mediante ecuaciones de transformación que relacionan las coordenadas de los diferentes eslabones del robot. [11]

4.8.2 Modelo denavit-hartenberg

El modelo Denavit-Hartenberg (DH) es una metodología estándar para describir la geometría de robots de eslabones interconectados. El modelo DH utiliza cuatro parámetros para definir la posición y orientación de los eslabones del robot: longitud del eslabón, ángulo del eslabón, desplazamiento del eslabón y ángulo de torsión. Estos parámetros se organizan en matrices de transformación homogénea que permiten el cálculo de la posición y orientación del efector final del robot a partir de sus variables de articulación. [15]

Considerando el miembro inferior como un manipulador robótico en serie, la representación geométrica de la posición y orientación del efector terminal, que en la fase de balanceo corresponde al pulgar, se realiza fijando rígidamente sistemas de referencia a cada segmento del robot, y expresando las relaciones entre estos sistemas como transformaciones homogéneas. Para este problema llamado cinemática directa se utiliza un procedimiento sistemático conocido como convención de Denavit-Hartenberg, que permite determinar las ecuaciones de cinemática directa mediante multiplicación matricial de transformaciones homogéneas. [16]

4.8.3 Cinemática inversa

Aborda el problema opuesto, es decir, dado un punto objetivo en el espacio, determinar los valores de las articulaciones necesarias para que el efector final del robot alcance dicha posición y orientación. Este problema es más complejo que la cinemática directa, ya que puede haber

múltiples soluciones posibles, una sola solución, o ninguna solución, dependiendo de la configuración del robot y de las restricciones del entorno. [11]

4.8.4 Modelo cinemático

Un modelo cinemático es una representación matemática que describe el movimiento de un sistema robótico o mecánico en términos de sus variables de movimiento, como las posiciones, velocidades y aceleraciones de sus partes móviles, sin considerar las fuerzas y momentos que causan dicho movimiento. En el contexto de la robótica, un modelo cinemático se utiliza para predecir la posición y orientación del efector final del robot basándose en las configuraciones de sus articulaciones y eslabones. El modelo cinemático puede tener varias soluciones para varias de las posiciones finales solicitadas debido a las diferentes posibilidades que generan sus eslabones con los grados de libertad. [11]

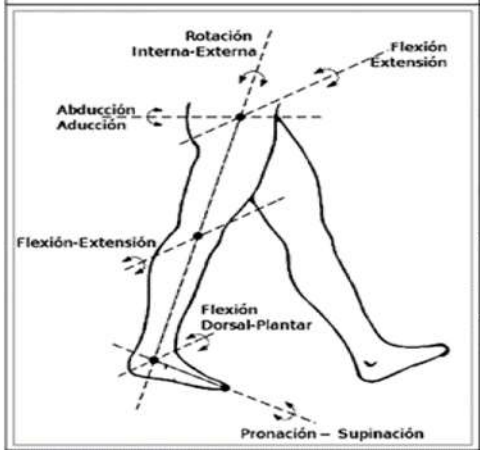
4.8.5 Grados de libertad

L Los grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés) se refieren a la cantidad de movimientos independientes que puede realizar un sistema robótico. En el contexto de la robótica, los grados de libertad representan las diferentes maneras en las que un robot puede moverse o ajustar su posición y orientación. Cada grado de libertad corresponde a un movimiento de traslación o rotación alrededor de un eje específico.

Por ejemplo, un brazo robótico con tres articulaciones puede tener tres grados de libertad, lo que significa que puede moverse, tener una velocidad, y, una aceleración diferente en 3 direcciones diferentes. La comprensión y el control de estos grados de libertad son esenciales para el diseño y la programación de robots, permitiéndoles realizar tareas complejas de manera precisa y eficiente. [11]

Figura 1

Grados de libertad de la pierna y la cadera



Articulación	Función	Rango
Cadera	Extensión - Flexión	-30 ~ 120
	Aducción - Abducción	-20 ~ 45
	Rotación Interna – Externa	-15 ~ 60
Rodilla	Extensión - Flexión	0 ~ 120
Tobillo	Flexión Plantar – Dorsal	-40 ~ 20
	Supinación - Pronación	-35 ~ 15

Nota. En la figura 1 muestra las articulaciones de la pierna desde la cadera, su función y su rango en grados Tomado de: [16] M. Nordin y V. H. Frankel, Biomecánica básica del sistema musculoesqueletico, Madrid: McGraw Hill, 2004

4.9 Movimientos antropomórficos

El término "movimiento antropomórfico" se refiere a un tipo de movimiento que imita o replica las características y patrones de movimiento típicos de los seres humanos. La palabra "antropomorfismo" proviene de "antro," que significa "ser humano," y "morfismo," que significa "forma" o "apariencia," por lo que se refiere a la atribución de características humanas a objetos, animales o sistemas. [12]

En el contexto de la robótica y la biomecánica, un "movimiento antropomórfico" se refiere a la capacidad de un robot o sistema mecánico para realizar movimientos y acciones que se asemejan a los realizados por el cuerpo humano. Esto incluye movimientos como caminar, correr, levantar objetos, agarrar, mover extremidades, entre otros. Los robots o sistemas que pueden llevar a cabo movimientos antropomórficos suelen estar diseñados para imitar la biomecánica y la cinemática humanas, ya sea en términos de anatomía, mecánica o control.

La capacidad de lograr movimientos antropomórficos es importante en aplicaciones en las que se requiere que los robots o sistemas interactúen con el entorno de manera similar a cómo lo haría un ser humano. Ejemplos de aplicaciones incluyen la robótica de asistencia en la atención médica y

la rehabilitación, la exploración de entornos humanos o la realización de tareas en entornos diseñados para personas. La imitación del movimiento humano puede facilitar la interacción y la colaboración entre humanos y robots en estas situaciones. [12]

4.10 Biomecánica

La biomecánica se aplica en diversas áreas, incluyendo la medicina, la investigación deportiva, la ingeniería, la ergonomía y la rehabilitación. Algunos de los temas de estudio comunes en la biomecánica incluyen la cinemática; el estudio del movimiento, la cinética; el estudio de las fuerzas que actúan sobre los objetos, la dinámica; el estudio de las leyes del movimiento, la biomecánica del deporte, la biomecánica ortopédica, la biomecánica ocupacional y la biomecánica clínica, entre otros. [13]

4.11 Marcha humana

El patrón típico de la marcha humana implica una serie de fases, que incluyen la elevación y avance de una pierna, el apoyo del peso del cuerpo sobre la otra pierna, y la posterior transición a la siguiente zancada. Durante la marcha, se logra un equilibrio continuo a medida que el cuerpo se desplaza hacia adelante.

El estudio de la marcha humana es fundamental en campos como la biomecánica, la fisioterapia, la rehabilitación y la medicina deportiva, ya que permite entender cómo se produce el movimiento, evaluar el rendimiento físico y tratar problemas relacionados con la marcha, como lesiones o discapacidades. El análisis de la marcha humana puede ayudar a identificar desviaciones o problemas en el patrón de movimiento y desarrollar intervenciones adecuadas para mejorar la calidad de vida de las personas. [12].

4.11.1 Plano sagital

El plano sagital es un plano anatómico que separa el cuerpo humano en dos mitades simétricas: derecha e izquierda. Este plano se extiende de adelante hacia atrás, dividiendo el cuerpo en dos partes casi iguales, y es perpendicular tanto al plano frontal (coronal) como al plano horizontal (transversal).

4.12 Simulación de trayectoria

La simulación de trayectoria es un proceso mediante el cual se recrea o se modela digitalmente el movimiento de un objeto o entidad a lo largo de una ruta o camino específico. Se utiliza en diversos

campos, como la ingeniería, la aviación, la robótica y los videojuegos, para prever y analizar cómo un objeto se desplazará o se comportará en una situación determinada. Esta simulación permite estudiar y comprender el comportamiento de sistemas en movimiento sin necesidad de realizar pruebas físicas reales. [13]

4.13 Servo motores

Un servomotor es un dispositivo electromecánico que permite un control preciso de la posición angular, la velocidad y la aceleración. Está compuesto por un motor, un sensor de posición, y un circuito de control. Los servomotores son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se requiere un control exacto del movimiento, como en la robótica, la automatización industrial, y los sistemas de control de vuelo.

4.13.1 Sensores

En el contexto de la robótica, un sensor es un dispositivo que identifica y reacciona a estímulos provenientes del entorno del robot, proporcionando información que permite al robot operar de manera autónoma o con asistencia. Los sensores pueden hacer que el robot modifique sus movimientos, se ajuste a nuevos estímulos o hacer que el robot realice una actividad puntual.

4.14 Síntesis dimensional

La síntesis dimensional en el contexto de modelos CAD se refiere al proceso de crear modelos tridimensionales que representen de manera precisa y detallada objetos físicos o componentes. Esto implica capturar todas las dimensiones, formas y propiedades del objeto en cuestión dentro del entorno virtual del software CAD. [11]

4.15 Análisis por elementos finitos

El análisis por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés, Finite Element Analysis) es un método computacional utilizado para simular y analizar el comportamiento de estructuras y sistemas físicos complejos. Consiste en dividir el objeto o sistema en pequeños elementos finitos con formas geométricas simples (como triángulos o tetraedros en 3D) y resolver ecuaciones matemáticas para cada uno de estos elementos. A partir de esto, se obtienen soluciones aproximadas para las variables físicas (como tensiones, deformaciones, temperatura, flujo de fluidos, etc.) en todo el dominio del problema. El análisis por elementos finitos permite modelar y predecir el comportamiento de estructuras y sistemas mediante la discretización del dominio en elementos más pequeños y la resolución de ecuaciones físicas y matemáticas.

4.16 Cálculo de la masa promedio de una persona por estatura

Existen diversas formas para poder calcular la masa ideal de una persona utilizando la estatura de la persona. Para efectos prácticos y de cálculo en este documento, se utilizará una fórmula matemática estándar que se conoce como la fórmula de Wan Der Vael:

Para hombres.

$$Peso\ ideal = Altura\ en\ cm - 150 * 0.75 + 50$$

Para mujeres.

$$Peso\ ideal = Altura\ en\ cm - 150 * 0.6 + 50$$

A través de estas fórmulas se puede calcular el peso ideal, para la persona promedio y utilizando estas ecuaciones se realizan los planteamientos de las simulaciones de elementos finitos. [18]

4.17 Distribución porcentual del peso corporal por segmento

De acuerdo con la literatura, para los seres humanos que no tienen ningún tipo de sobrepeso, ni tampoco con enfermedades que aumenten el tamaño de las extremidades, se puede referenciar que el porcentaje del peso corporal total se distribuye como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1

Segmento corporal e incidencia en el peso corporal

SEGMENTO CORPORAL	PORCENTAJE DEL PESO CORPORAL
Torso	50%
Muslo	20%
Brazos	10%
Cabeza	8%
Piernas	8%
Pies	4%

Nota. La tabla 1 describe el porcentaje del peso corporal que cada segmento donde el segmento del Torso es el que tiene más porcentaje con un valor de 50%.

4.18 Esfuerzos y deformaciones unitarias

En el libro "Mechanics of Materials" de Ferdinand P. Beer, el esfuerzo se define como la medida de la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro de un material, clasificándose en esfuerzo normal, que actúa perpendicularmente a la sección transversal del material, y esfuerzo cortante, que actúa tangencialmente a dicha sección. La deformación unitaria se describe como la medida del cambio en la forma o tamaño del material debido a la aplicación de un esfuerzo, clasificándose en deformación unitaria normal, que ocurre cuando una fuerza normal cambia la longitud del material, y deformación unitaria cortante, que ocurre cuando una fuerza cortante cambia la forma del material sin afectar significativamente su volumen. Estas definiciones son fundamentales para el análisis y diseño de estructuras y componentes en la mecánica de materiales. [19]

4.19 Materiales de uso prostético

Los materiales de uso prostético requieren cumplir con ciertas características que permitirán que su utilidad y durabilidad sea la adecuada. Las características principales que deben cumplir dichos materiales son: Alta resistencia mecánica; flexibilidad y elasticidad de acuerdo con los requerimientos puntuales (adaptabilidad y amortiguación); baja densidad; durabilidad y resistencia al desgaste; biocompatibilidad; Resistencia térmica; facilidad de manufactura y personalización; estabilidad dimensional. Algunos de los materiales más utilizados para la manufactura de dichas piezas son: PETG (Tereftalato de polietileno glicol), Aluminio (Aluminio 3003), Titanio (titanio de fresado y aditivo). [20]

4.19.1 Tereftalato de polietileno glicol

El tereftalato de polietileno modificado con glicol o PETG, como también es conocido, es un material adecuado para la el envasado de alimentos o para aplicaciones en medicina y bioingeniería debido a sus características de baja reactividad química. Este material adicionalmente, tiene propiedades que le permiten ser utilizado para manufacturar a través de la impresión 3D. [21]

4.19.2 Aluminio 3003

La aleación de aluminio 3003 H14 es conocida por su contenido de manganeso, lo que le otorga mayor resistencia mecánica en comparación con otros tipos de aluminio. También destaca por su buena resistencia a la corrosión y capacidad para ser trabajada en frío, lo que la convierte en un material versátil y fácil de conformar para diferentes aplicaciones industriales. [21]

4.19.3 Titanio aditivo y fresado (ti6al4v-eli)

El titanio Ti6Al4V-ELI es una aleación de titanio con aluminio y vanadio, conocida por su alta resistencia y biocompatibilidad. Cumple con las normas ASTM F136 e ISO 5832-3, lo que la hace ideal para aplicaciones médicas y de prótesis. [21]

5. METODOLOGÍA

Este proyecto tiene un enfoque y una proyección cuantitativa y con caracterizaciones cualitativas. Se espera que mediante la modificación iterativa de las partes componentes de las piernas, se logren resultados comparativos y con poca diferencia en términos de las posiciones comparadas con las señales mecánicas obtenidas con anterioridad. Siendo consecuentes con esta propuesta, la metodología a seguir será:

5.1 Análisis de teoría y antecedentes

Se realizará una revisión exhaustiva de la información existente y relevante para las temáticas de evaluación y utilizando bases de datos como Scopus, Dialnet, Elsevier, dentro de la literatura como se ha referenciado en el marco teórico, el estado de arte y tomando como principal información el documento guía, como referencia las medidas iniciales de los sólidos representados en el modelo propuesto del trabajo anterior, como primeros parámetros de diseño.

La matriz jacobiana que resulta del conjunto de matriz de transformación homogénea de Denavit-Hartenberg para el balanceo resultante es la permite relacionar las velocidades lineales y angulares del efector final con las velocidades de las juntas de la siguiente manera:

Tabla 2

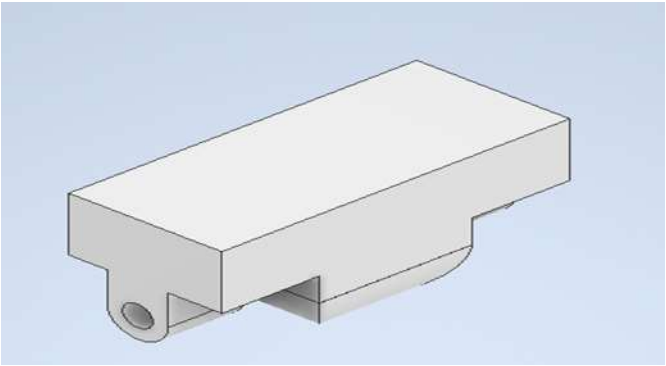
Parámetros de longitudes iniciales de los solidos

Segmento	Longitud $[m]$	Longitud $[m]$	Ángulo $[°]$	Masa $[kg]$	Momentos de inercia $[kg \cdot m^2]$
Torso	0.2752	0.109	0	4.826	[0.021, 0.023, 0.042]
Muslo	0.42	0.21	θ_q	0.249	[0.002, 0.0039, 0.037]
Pierna	0.46	0.23	θ_j	0.282	[0.00024, 0.0052, 0.005
Pie	0.11	0.055	θ_t	0.11	$5.95x10^{-5}$, $1.69x10^{-4}$, $1.12x10^{-4}$]

Nota. En la tabla 2 se muestra las medidas de longitud iniciales para el diseño geométrico. [8]

Figura 2

Vista isométrica el sólido correspondiente a la cadera



Nota. La Figura 2 muestra el diseño de geometría realizado para el sólido de la cadera.

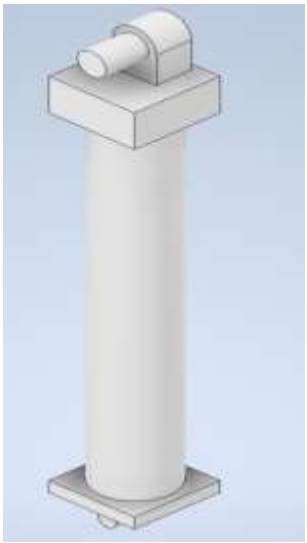
Figura 3

Vista isométrica para el sólido correspondiente al muslo

Nota. La Figura 3 muestra el diseño de geometría realizado para el sólido del muslo

Figura 4

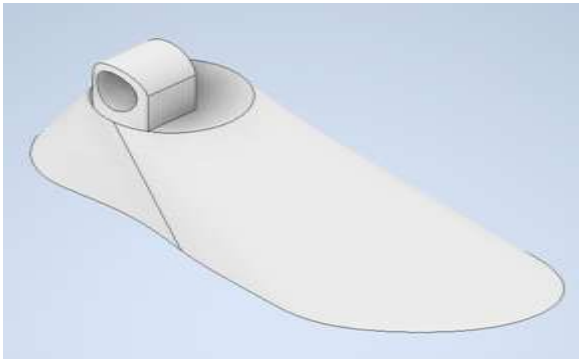
Vista isométrica para el diseño de la pierna



Nota. La Figura 4 muestra el diseño de geometría realizado para el sólido de la pierna.

Figura 5

Vista isométrica para sólido correspondiente al pie



Nota. La Figura 5 muestra el diseño de geometría realizado para el sólido del pie derecho.

5.2 Construcción del modelo y síntesis dimensional

Se desarrollará un diseño conceptual del mecanismo robótico bípedo que se basará en los principios biomecánicos estudiados en la literatura. Esto incluirá el tipo de actuadores, sensores y estructura mecánica. Posteriormente, se creará un modelo geométrico que describe la geometría del mecanismo robótico, incluyendo las dimensiones, la disposición de las articulaciones y aplicará modelo cinemático que relaciona las posiciones y velocidades de las articulaciones del mecanismo

con las posiciones y velocidades de los segmentos corporales durante el ciclo de la marcha. Como última parte de esta fase metodológica se realizará una síntesis dimensional optimizada de las variables de diseño antropomórficas para asegurar que el mecanismo robótico pueda replicar de manera efectiva la trayectoria deseada durante un ciclo de marcha.

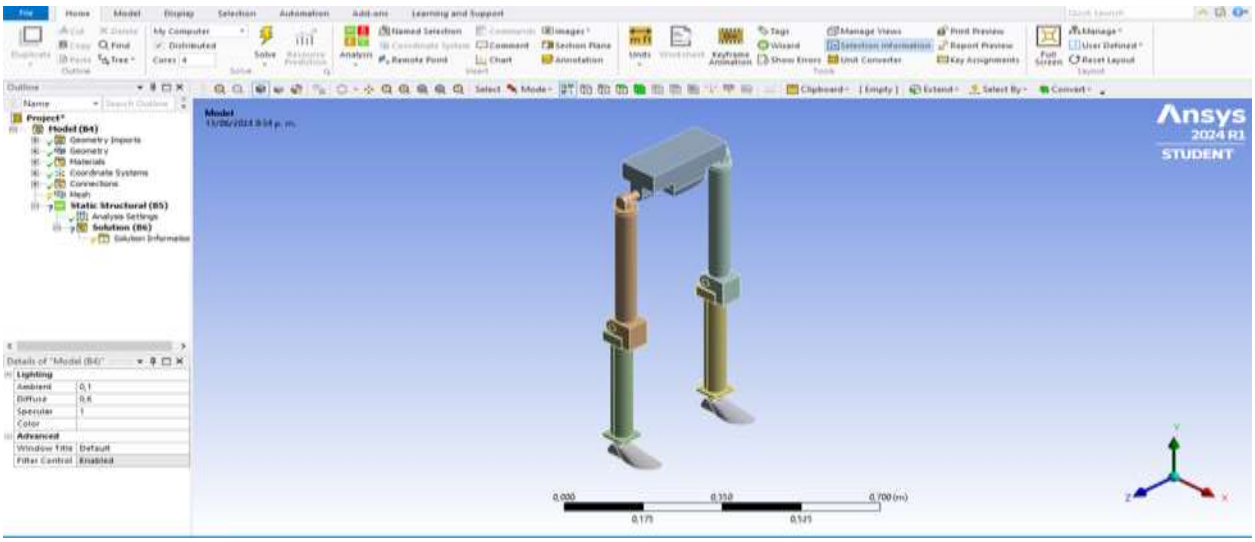
5.3 Análisis de materiales y elementos finitos del modelo cad

Durante el proceso de análisis de resultados y comparación con las señales biomecánicas previamente adquiridas, se revisará su concordancia, y en caso de que el resultado no sea satisfactorio, se realizará un proceso iterativo de modificación del CAD hasta que se obtengan curvas de movimiento concordantes.

En primera instancia para realizar la simulación, se utiliza el software ANSYS WORKBENCH. Donde se carga el ensamble CAD propuesto. El ensamble del CAD se constituyó en el software inventor, y fue necesario exportarlo con la extensión .STP para poder realizar la importación y correcto cargue del ensamble en ANSYS WORKBENCH

Figura 6

Ensamble propuesto cargador en el ambiente de ANSYS



Nota. En la figura 6 representa como se ve el ensamble cargado en el ambiente ANSYS.

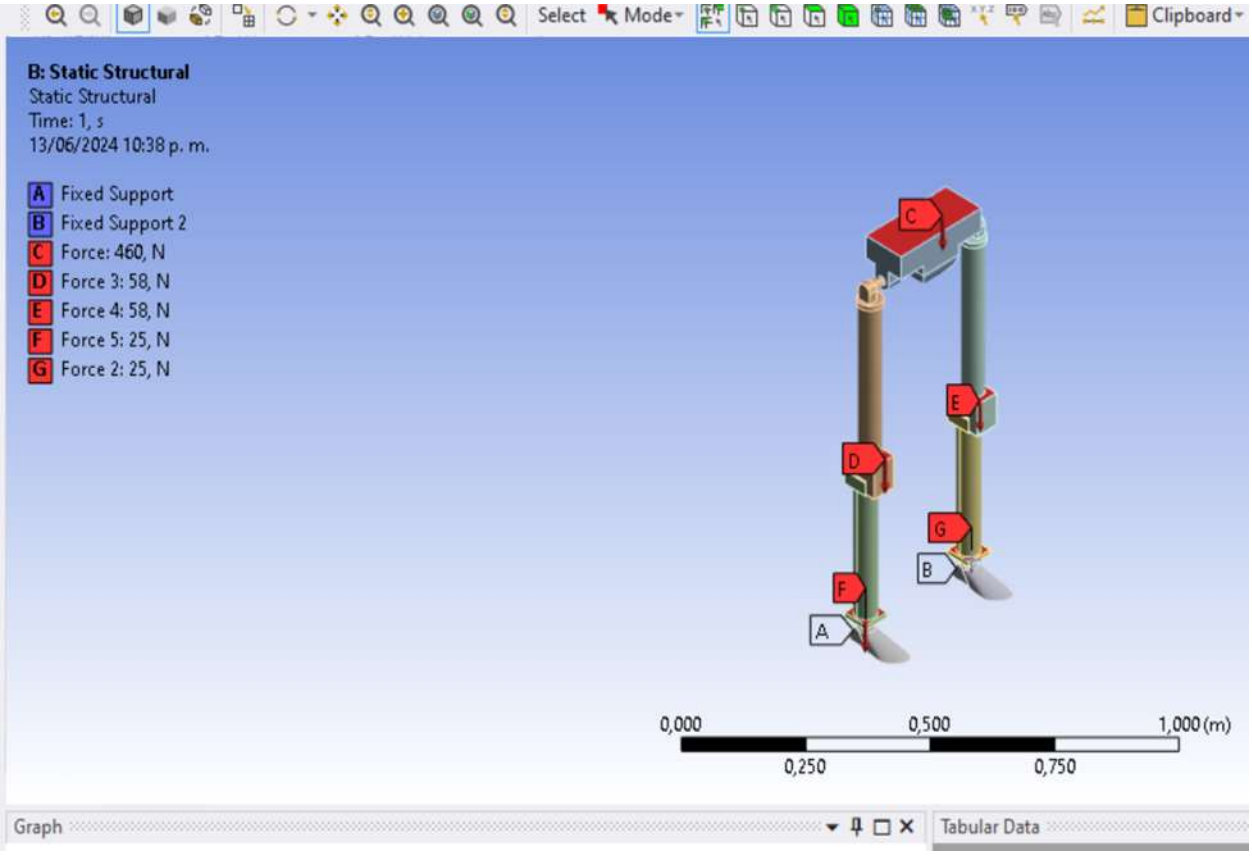
5.3.1 Cálculo de la carga por sección corporal

Para realizar la simulación de las cargas, se deben definir las cargas aproximadas que se dispondrán en cada una de los grados de libertad del ensamble propuesto. Dichas cargas se calcularán de

acuerdo con la ecuación [1] y [2] y según la altura de la persona propuesta para el desarrollo se definen las siguientes cargas corporales.

Figura 7

Cargas distribuidas porcentuales para simulación de carga



Nota. figura 7 representa las cargas distribuidas porcentuales donde la carga C es la fuerza con más unidad con 460N, Esta fuerza C hace referencia a la carga ejercida en la cadera.

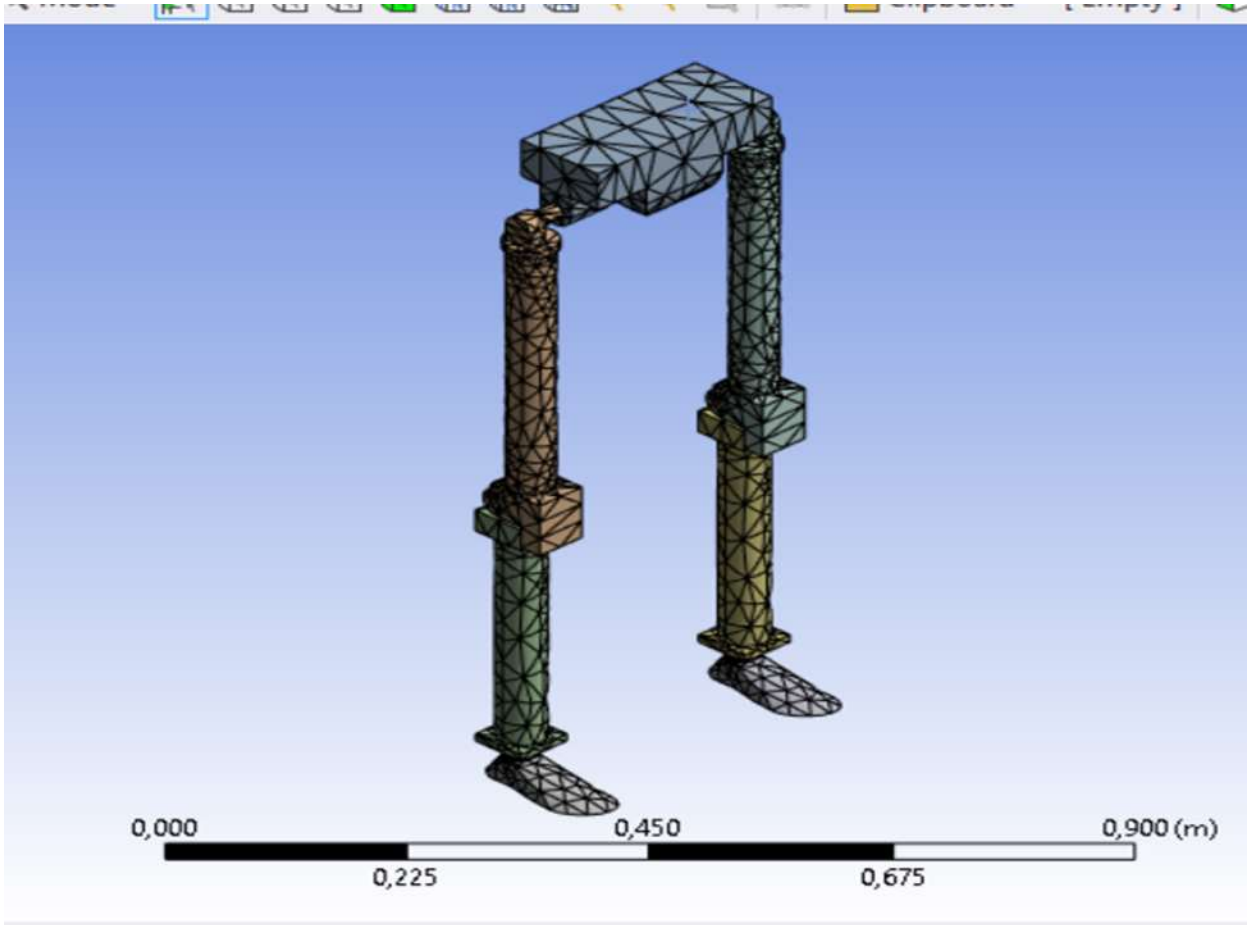
5.3.2 Generación del enmallado de simulación

Adicionalmente es fundamental establecer las plantas de los pies como cada uno de los puntos fijos del ensamble y así permitir que la carga se aplique de forma vectorial a lo largo del eje Y. El software ANSYS WORKBENCH, permite que las cargas implementadas se apliquen distribuidas de forma uniforme sobre la superficie seleccionada, de esta forma la aplicación de la fuerza no debe ser necesariamente aplicada sobre los centros de gravedad de cada uno de los segmentos, sino que se puede disponer directamente sobre la articulación.

Posteriormente, se deben realizar dos definiciones; las características del material que compone el ensamble y el enmallado necesario para realizar la simulación de las cargas y el análisis de elementos finitos correspondientes.

Figura 8

Enmallado para simulación de carga y deformaciones



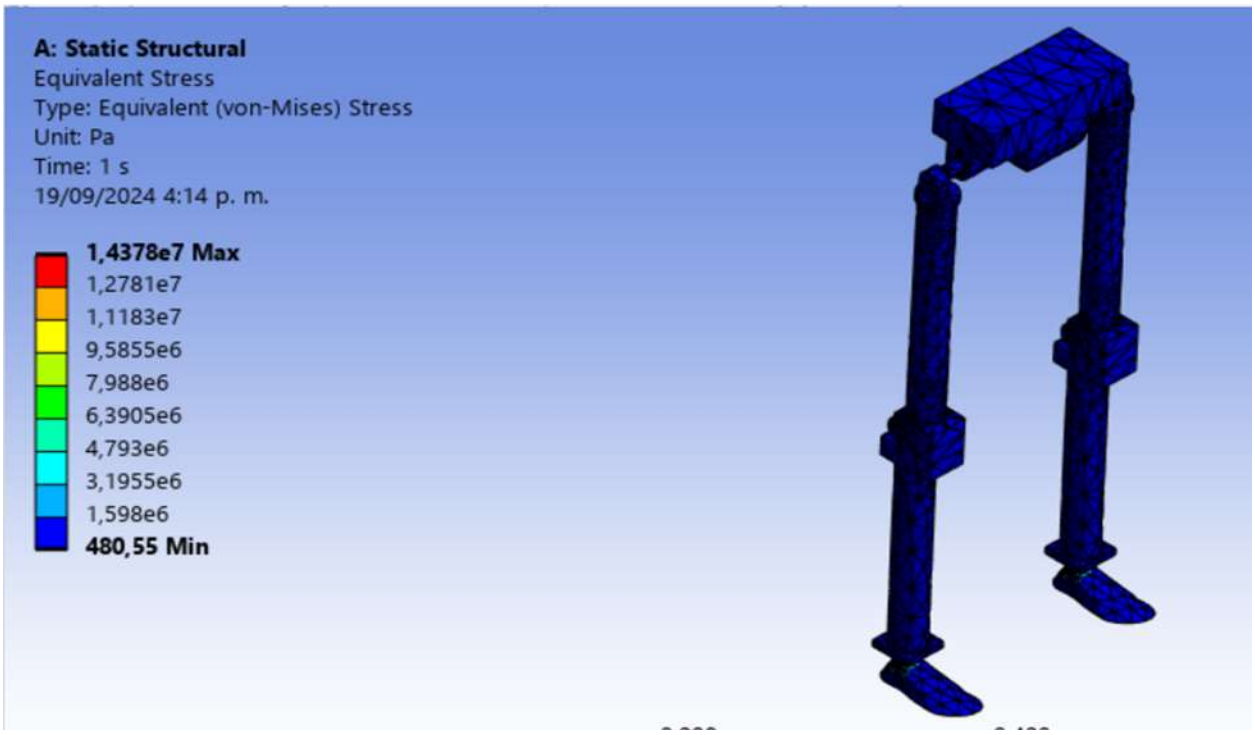
Nota. La Figura 8 representa el enmallado propuesto el cual se generó a través de las herramientas de ANSYS WORKBENCH, y resultó en un enmallado constituido por 13.400 nodos y 6.300 segmentos.

5.3.3 Simulaciones y resultados gráficos

El análisis estructural del ensamble utilizó los esfuerzos equivalentes de Von Mises para realizar la evaluación de los esfuerzos.

Figura 9

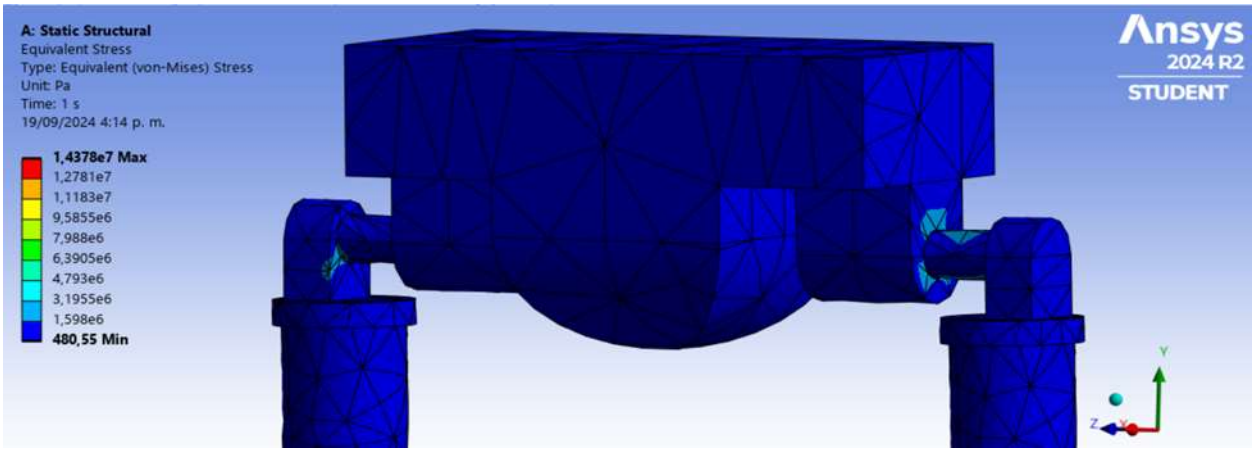
Visualización isométrica para los esfuerzos equivalentes de Von Mises



Nota. El análisis estructural del software ANSYS, presenta, según la figura 9, valores desde los 480.55 Pascales, hasta los 14.37 MPa.

Figura 10

Visualización de las coyunturas de la cadera para los esfuerzos de Von Mises

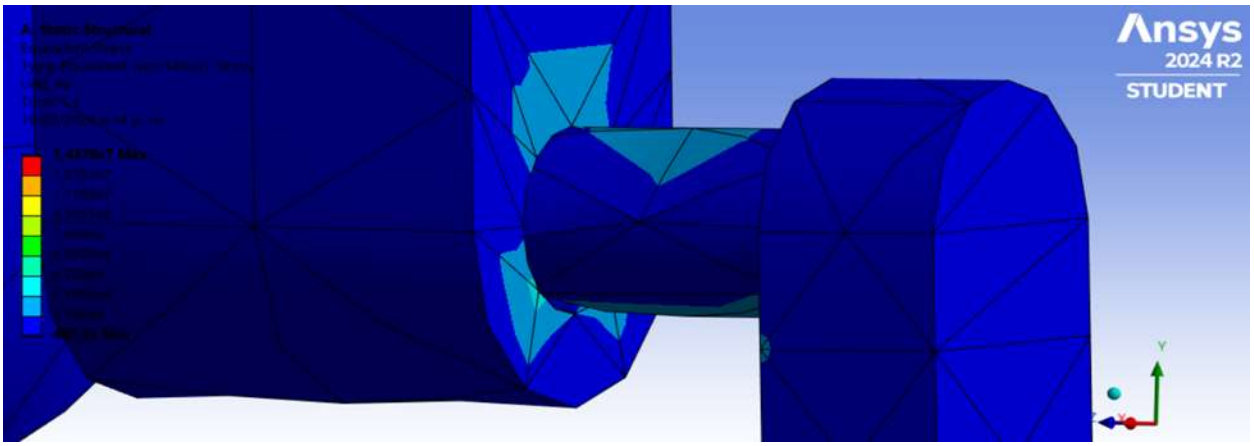


Nota. La figura 10 representa el esfuerzo realizado por las coyunturas.

Ahondando en el análisis de esfuerzos, se realiza un acercamiento a los puntos críticos, donde de acuerdo con análisis previos, se podrían generar concentradores de esfuerzos. Es posible diferenciar que los esfuerzos equivalentes de Von Mises en la zona de la coyuntura de la cadera y el fémur, se observa un aumento considerable llegando hasta los 3.19 MPa.

Figura 11

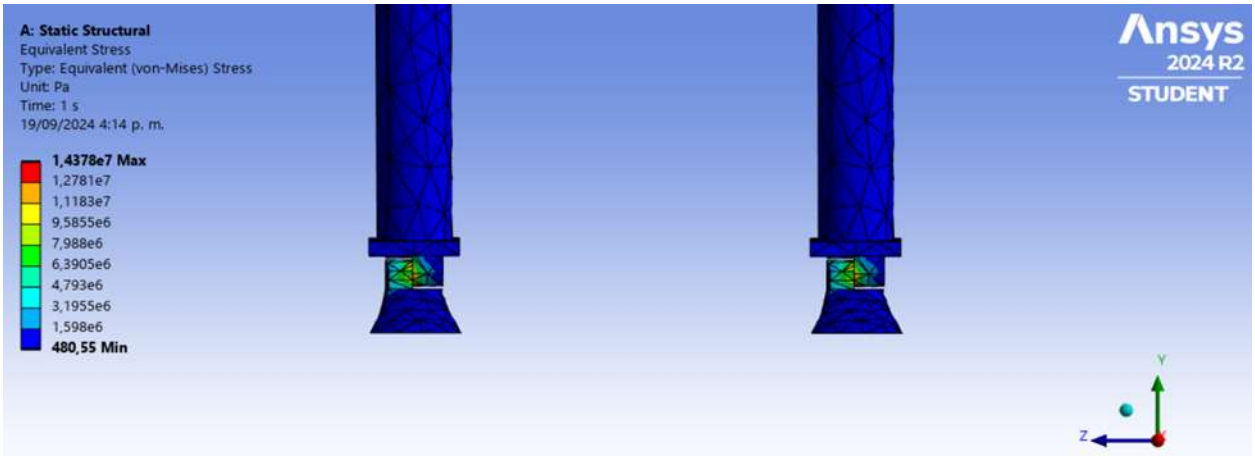
Detalle para la coyuntura de la cadera para los esfuerzos de Von Mises



Nota. En la figura 11 se presenta un detalle para la coyuntura, donde es posible discernir las zonas donde los esfuerzos serán superiores y se verá un aumento considerable en la deformación unitaria.

Figura 12

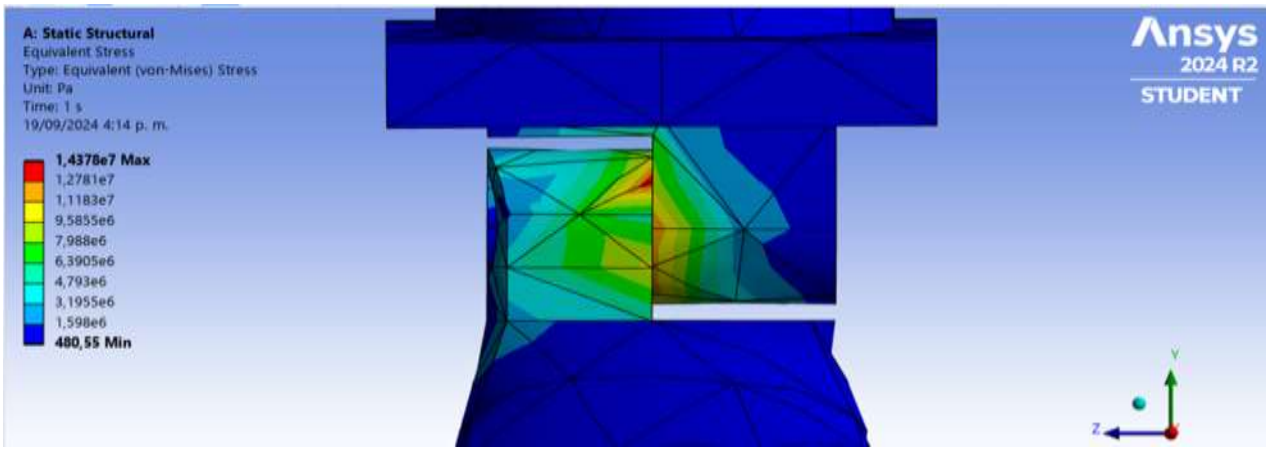
Coyuntura de tobillos para los esfuerzos equivalentes de Von Mises



Nota. En la Figura 12 es posible apreciar que los tobillos, zonas que también se podrían considerar como concentradores de esfuerzo, presentan cargas que de acuerdo con la escala de color podrían encontrarse entre los $6MPa$ y los $9MPa$.

Figura 13

Detalle coyuntura de tobillo para los esfuerzos equivalentes de Von Mises.



Nota. En la figura 13 represente el detalle de coyuntura de tobillo.

De acuerdo con los valores obtenidos, la elección de materiales realizada con anterioridad será determinada a partir del siguiente cuadro comparativo.

5.3.4 Cuadro comparativo para los materiales de construcción del elemento bípedo

Los materiales prostéticos y para construcción de elementos que se podrían considerar como sustitutivos posibles para partes del cuerpo humano, se pueden resaltar 3 materiales, que adicionalmente cumplirían con los criterios de resistencia y de compatibilidad corporal para poder ser considerados como materiales de manufactura para el robot bípedo, objeto del presente trabajo. [20]

A continuación, en la tabla 3 se presentará un cuadro comparativo que permitirá revisar propiedades y características importantes a la hora de tomar una decisión respecto a los, o el material que se utilizará como elemento constitutivo para la construcción del robot bípedo.

Tabla 3

Cuadro comparativo materiales de construcción elemento bípedo

Propiedades	**Materiales**		
	Aluminio Al 3003	**Titanio (Ti6Al4V-ELI)**	**PETG**
Resistencia a la tracción (MPa)	186	860	53
Módulo de Young (GPa)	68,9	110	3
Densidad (Kg*m^-3)	2730	4420	1290
Reactividad química	Baja	Baja	Baja
Coeficiente de Poisson	0,33	0,34	0,29
Manufactura de menor costo	Fresado y formado en frio	Adición y fresado	Impresión 3D
Precio (COP/gramo)	$ 14.367	$ 217.000	$ 1.600

Nota. La tabla 3 representa una comparación de materiales para la construcción del elemento bípedo.

5.4 Implementación del modelo cad em simscape

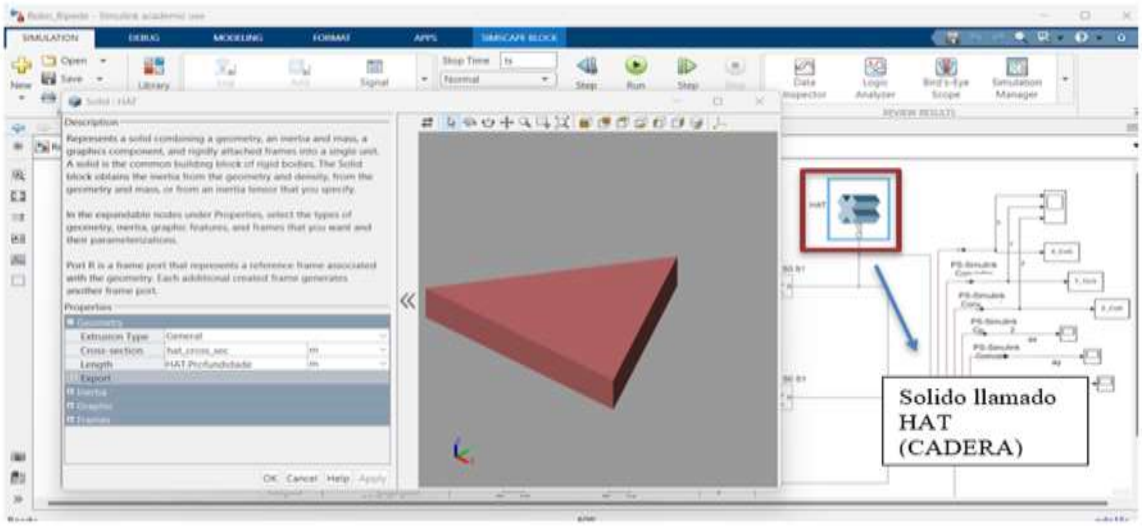
Se ha identificado que el software solo acepta cuatro sólidos, denominados HAT, COXA, PERNA y PE (cadera, muslo, pierna y pie). El siguiente paso consiste en reemplazar los bloques del sólido que se utilizó en el modelo base de SIMSCAPE Multibody. Estos sólidos se construyeron con

bloques de MATLAB, que presentaban limitaciones y no permitían importar otras geometrías. En la figura 14, se ha resaltado con un rectángulo marrón el tipo de bloque que representa el sólido de la cadera, el cual fue seleccionado desde el navegador de bibliotecas en la sección de SIMSCAPE Multibody bajo "variable mass".

5.4.1 Cambio de bloque de solido

Figura 14

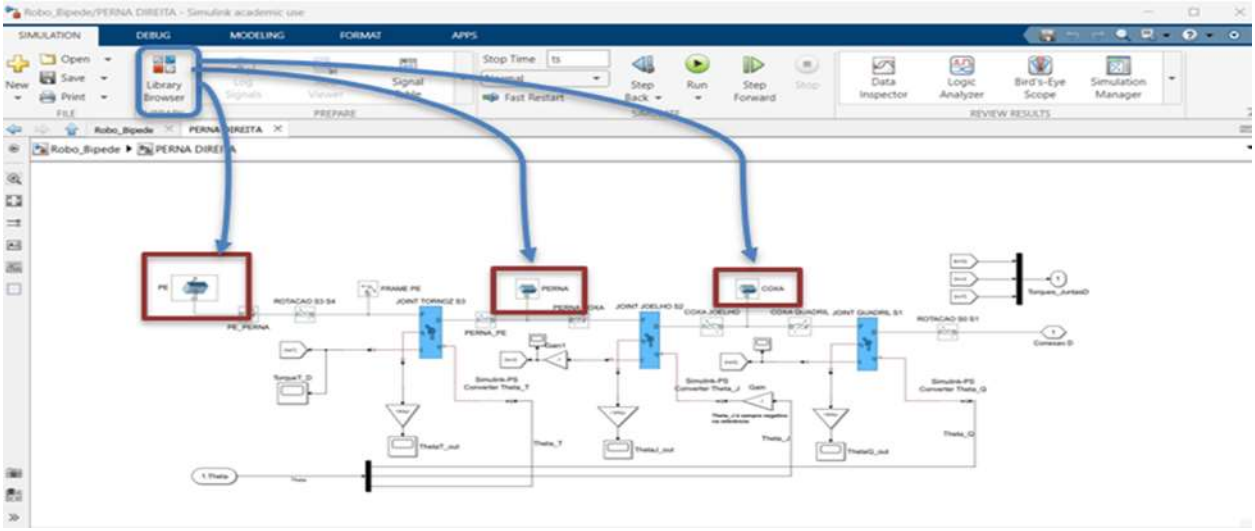
Ubicación y representación del solido correspondiente a la cadera en ambiente SIMSCAPE



Nota. La figura 14 representa el sólido de la cadera del modelo original. [9]

Figura 15

Ubicación de los sólidos del muslo, pierna y pie en ambiente SIMSCAPE



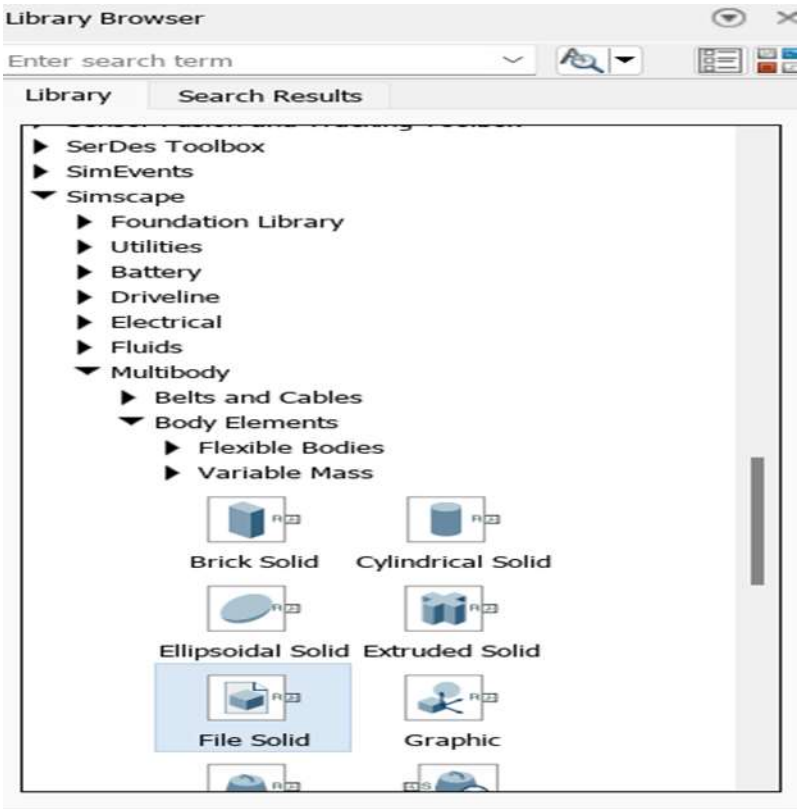
Nota. En la figura número 15, se observar encerrado en rectángulos de color café la ubicación de los elementos correspondientes a los miembros (muslo, pierna pie) constitutivos de cada una de las piernas.

Para garantizar el correcto funcionamiento del software y cumplir con los objetivos planteados, es necesario reemplazar estos sólidos. A continuación, se describe el procedimiento para hacerlo:

Primero, se debe presionar el ícono del navegador de bibliotecas, que abrirá un menú. Desde allí, se selecciona SIMSCAPE, lo que a su vez despliega otro menú de opciones. En este nuevo menú, se elige "Multibody". Dentro de la sección de Multibody, se selecciona el bloque "File Solid" en "Variable Mass", el cual se muestra resaltado en azul claro en la figura 16.

Figura 16

Librería Browser de Simscape variables de masa file solid

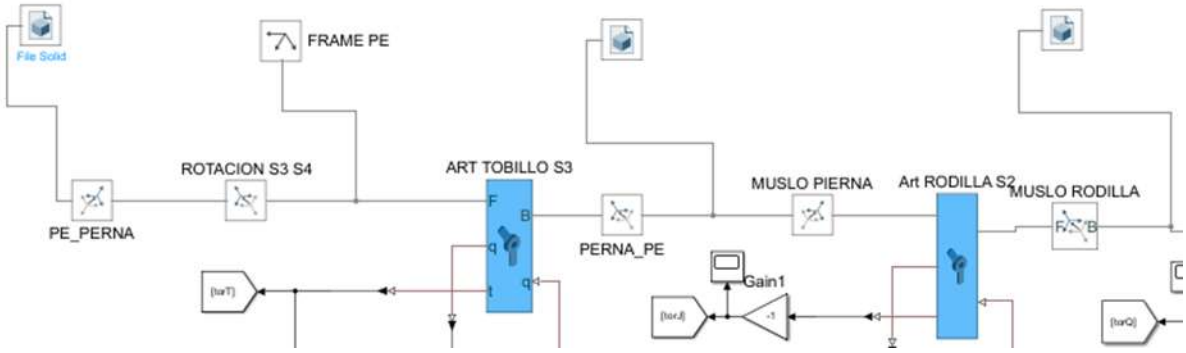


Nota. En la Figura 16 se muestra seleccionado un recuadro de color azul llamado File Solid, archivo que representa un sólido cuya geometría, material y propiedades visuales, se leen desde un archivo que puede ser cargados en formato CATIA, NX, SolidEdge y otros formatos.

Ahora bien se realiza el cambio del sólido extruded solid por file solid quedando de la siguiente manera.

Figura 17

Ambiente de bloques de Matlab Simulink Multibody



Nota. La figura 17 representa los bloques de simulink editados en el bloque de la pierna derecha.

5.4.2 Instalación del complemento de Matlab para inventor

Se importó el ensamblaje desde Inventor. Para realizar esta importación, fue necesario descargar un complemento para MATLAB, así como otro para Inventor. Este complemento, denominado Simscape™ Multibody™ Link, proporciona la interfaz principal para exportar ensamblajes CAD a modelos de Simscape Multibody. Es compatible con tres aplicaciones CAD: Autodesk Inventor®, Creo™ Parametric y SolidWorks®. Si se utiliza una aplicación CAD diferente, todavía es posible exportar ensamblajes CAD utilizando el esquema XML de importación multicuerpo de Simscape.

A continuación, se presentan los pasos para instalar el complemento de MATLAB Simscape Multibody:

Paso 1: Obtener los archivos de instalación

Visite la página de descarga de Simscape Multibody Link: https://la.mathworks.com/campaigns/offerings/download_smlink.html.

Paso 2: Ejecutar la función de instalación

En este paso, asegúrese de que la versión de MATLAB instalada sea compatible. En nuestro caso, es MATLAB 2023b y Win64. Descargue ambos archivos: installaddon.m y smlink-r2023b-win64.zip. Después de descargarlos, colóquelos en una sola carpeta.

Figura 18

Verificación de la versión de MATLAB

Simscape Multibody Link 7.8 – Release 2023b

Win64 (PC) Platform	smlink-r2023b-win64.zip installaddon.m
UNIX (64-bit Linux)	smlink.r2023b.glnxa64.zip installaddon.m
Mac OS X (64-bit Intel)	smlink.r2023b.maci64.zip installaddon.m

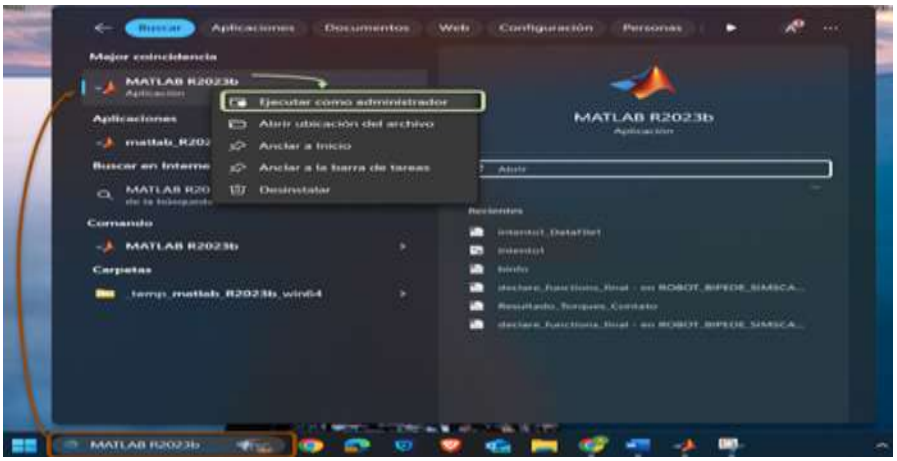
Nota. La figura 18 se observa resaltado en amarillo el sistema operativo que se está trabajando y los archivos que se deben descargar.

Paso 3: Registrar MATLAB como servidor de automatización

Siguiendo con el proceso hay que realizar la activación de plug en inventor o el programa de cad de su preferencia, en este caso el programa elegido para el diseño del Cad es Inventor de AutoDesk, en el ordenador en el apartado de la lupa (buscar) se escribe el Matlab que se esté haya descargado, se da click izquierdo y se da click en Ejecutar como administrador.

Figura 19

Ejecución de Matlab como administrador



Nota. En la figura 19 representa una secuencia de pasos la cual inicia desde el recuadro café y finaliza en el recuadro verde.

A continuación, se abrirá MATLAB. En la barra de archivos, ingrese la ruta de la carpeta donde se instalaron los archivos, en este caso: “C:\Users\IVASI\Downloads\Nueva carpeta”. Luego, en

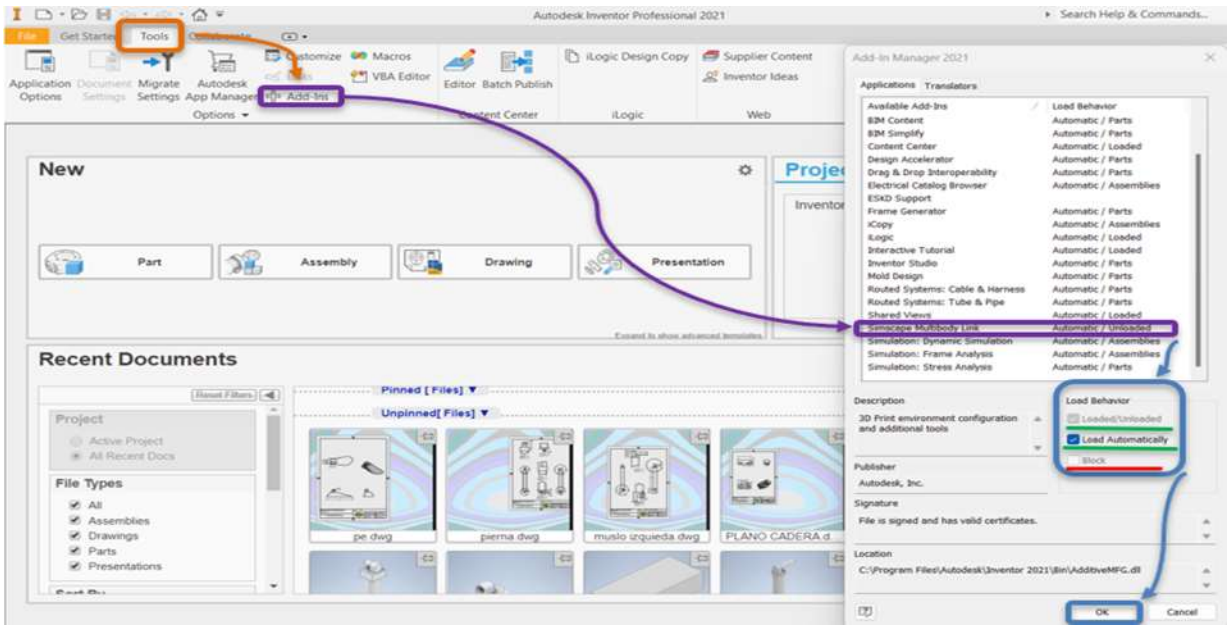
la ventana de comandos (Command Window), escriba: install_addon('nombre_del_archivo.zip') y presione Enter. Esto desplegará un mensaje que indica que la instalación se ha realizado correctamente.

Paso 4: Activar el complemento en Inventor

Abra Inventor, teniendo en cuenta que la versión compatible con MATLAB es la 2021 o anteriores; si tiene una versión más reciente, no podrá importar el archivo. En la barra de funciones de Inventor, encontrará una opción que dice "Tools". Al hacer clic en "Tools", seleccione "Add-Ins" (Administrador de complementos), donde se desplegará un menú con los complementos disponibles. Busque el complemento que indique "Simscape Multibody Link". Inicialmente, estará desactivado, así que marque la casilla para activarlo, tal como se ilustra en la siguiente imagen:

Figura 20

Activación del complemento en Inventor para el cargue de los sólidos



Nota. La figura 20 representa una secuencia de pasos la cual inicia en el recuadro color café y finaliza en el recuadro color azul.

Así se activa el complemento de MATLAB para Inventor. Se recomienda reiniciar el equipo.

Observación: Al activar Simscape en Inventor, debe dirigirse a "Complementos", donde se desplegará una lista con todos los complementos disponibles. En esta sección, el complemento de

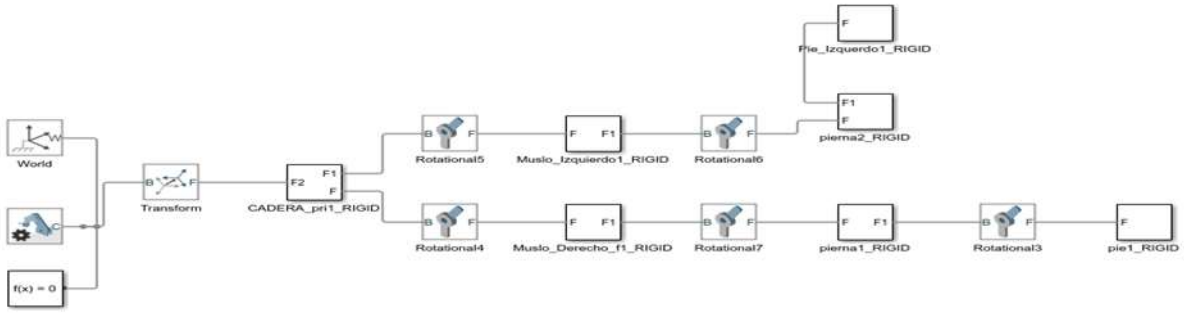
MATLAB aparecerá como bloqueado, pero el sistema lo reconocerá en la barra de opciones. Si no aparece el complemento, puede deberse a dos factores: primero, que esté utilizando una versión diferente a las aceptadas, o segundo, que el complemento no se haya instalado correctamente en MATLAB.

Exportar el Ensamblaje a MATLAB

Se creó una carpeta con los sólidos guardados y el ensamblaje para facilitar la ubicación de la ruta de los archivos al transferir los sólidos a MATLAB. Además, es necesario reemplazar las comas por puntos en el archivo XML generado del sólido; de lo contrario, MATLAB no podrá importar el ensamblaje correctamente. Una vez realizada esta modificación en el archivo XML,

Figura 21

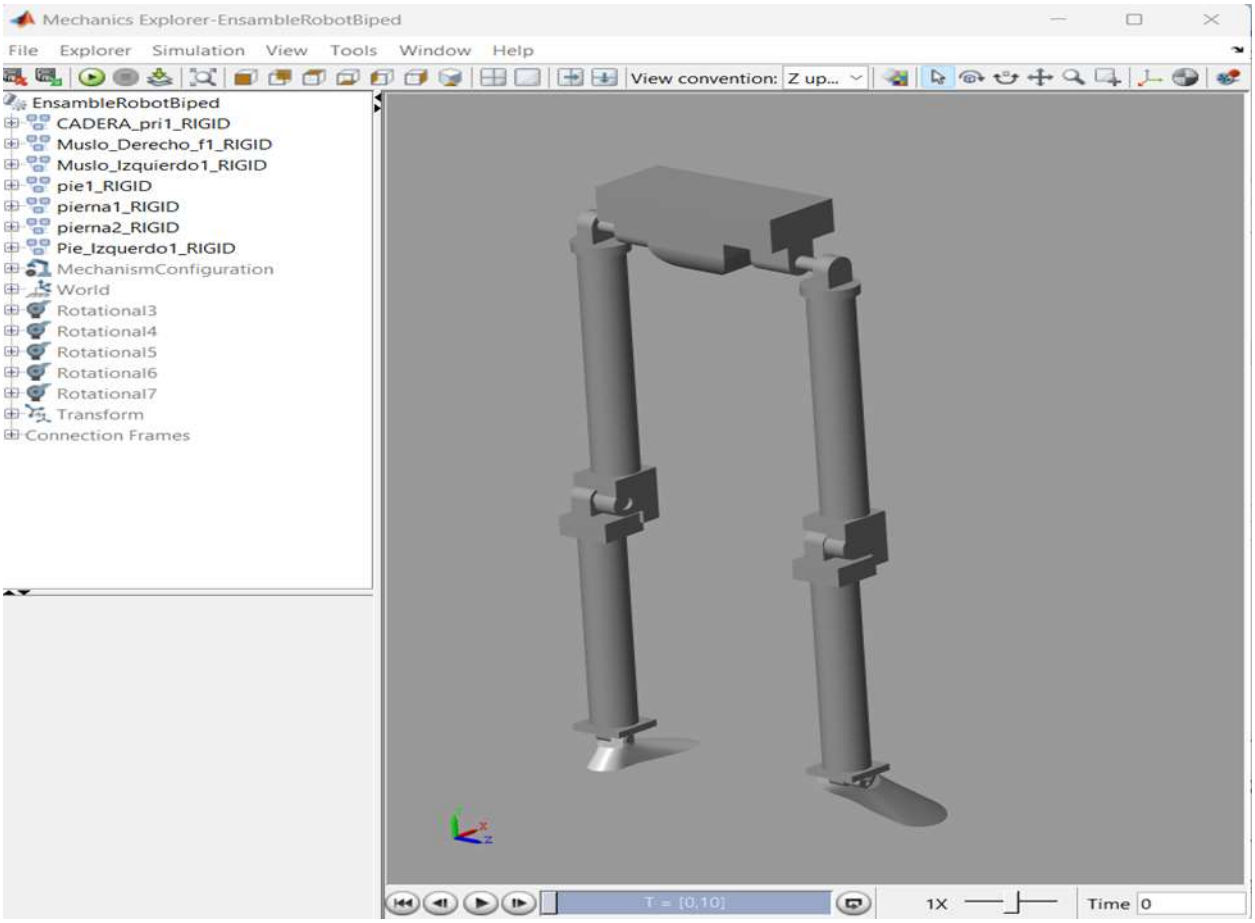
Ambiente de bloques simscape multibody ensamble importado desde inventor



Nota. La figura 21 representa los bloques realizados en la importación de solido desde inventor.

Figura 22

Simulación del ensamble Robot Biped



Nota. La figura 22 representa el ensamble importado desde inventor y después de correr la simulado desde Simscape.

La simulación anterior se hizo con el objetivo de entender como el programa Matlab simulink multibody reconoce un cad importado desde un programa externo, también que bloques crea y como se relacionan las uniones.

5.4.3 Configuración bloques de Matlab Simulink Multibody

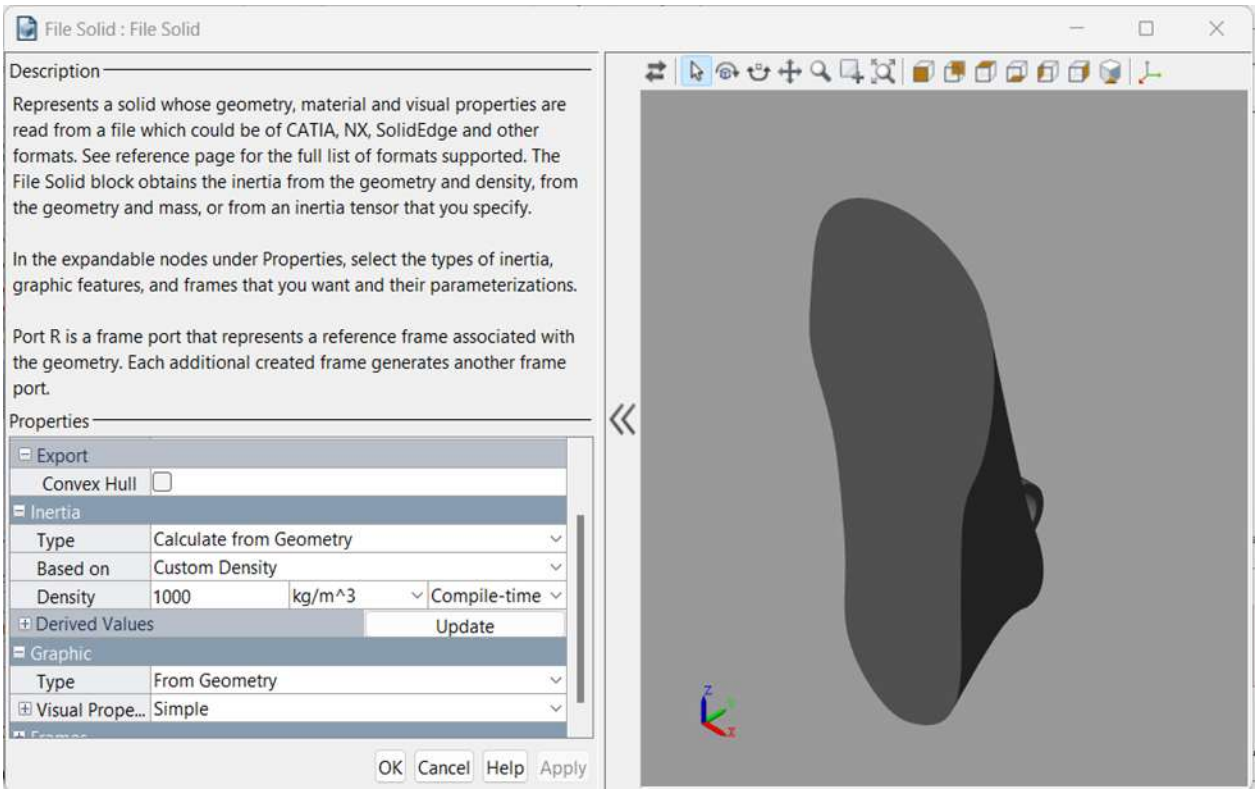
En el Matlab simulink multibody en el icono llamada “file solid” se realizó las siguientes modificaciones:

Primero: Se confirmó el nombre del archivo del solido como demuestra en la siguiente imagen en el recuadro rojo se ubicó el archivo en la carpeta donde estaba guardado y se le dio aceptar con eso terminamos el apartado de geometry

-Segundo: Se dirigió al apartado de inertia ya que en el espacio de “Export” no se realiza ninguna modificación; en inertia en el apartado de “Type” se selecciona “Calculare from Geometry” y en “Based on” se selecciona “Density from File” con el fin que a la hora de simular no nos arroje un error correspondiente a la densidad del solido en la Figura observa como quedo configurado tanto “Export”, “Inertia” como “Graphic”:

Figura 23

Configuración bloque File Solid Inertia



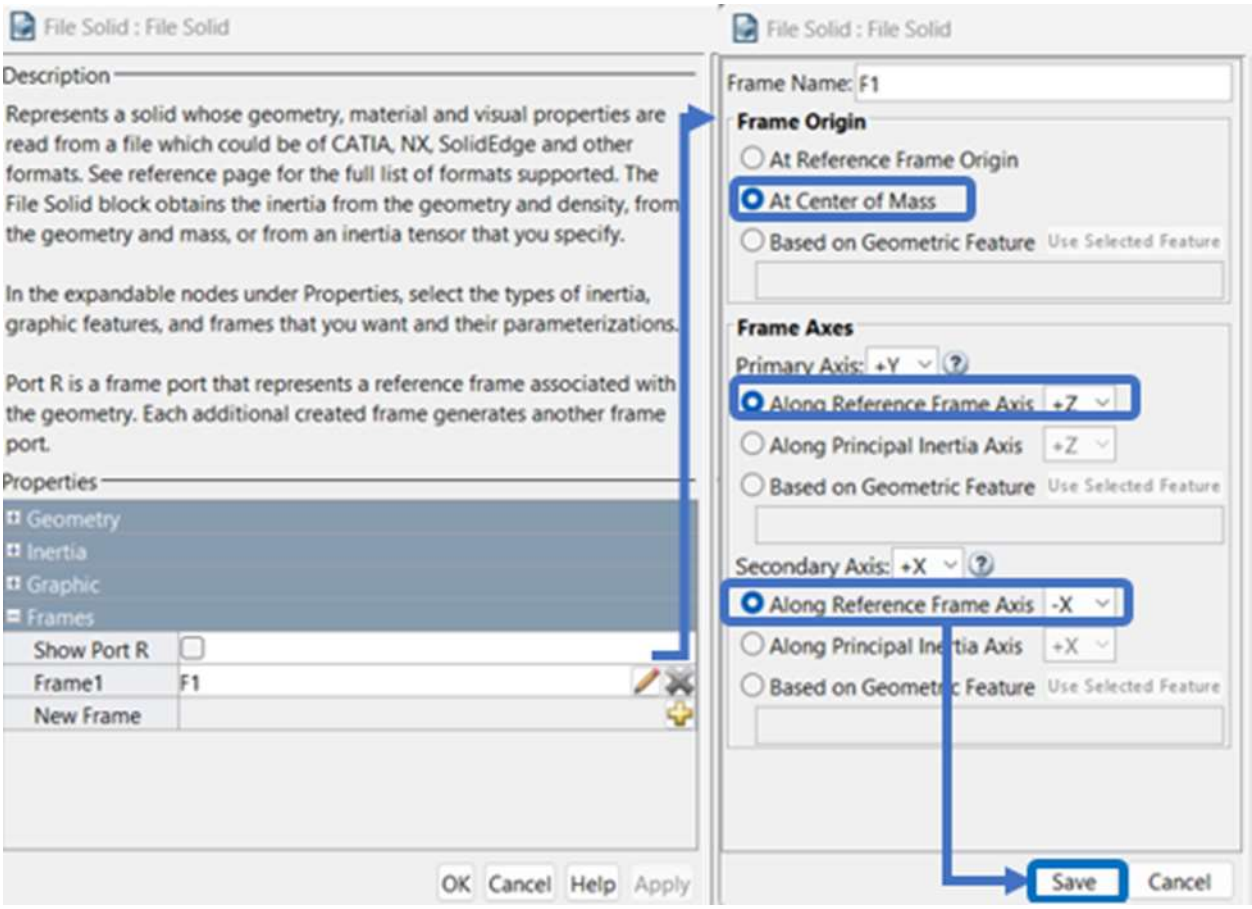
Nota. La figura 23 representa como están configurados los iconos de “Export” “Inertia” y “graphic” correspondientemente

Tercero: Se realiza un nuevo centro de pieza el cual modificamos el “Frames” lo primero que se hizo fue desactivar el origen de centro de coordenadas por defecto que trae el archivo, posteriormente, se seleccionó el origen de ejes coordenadas teniendo en cuenta el centro de masa

de elemento y seleccionado los ejes axiales, para nuestro caso se seleccionó como se muestra en la Figura 24.

Figura 24

Configuración Frame en File Solid



Nota. La Figura 24 representa los cambios realizados en el icono de frames.

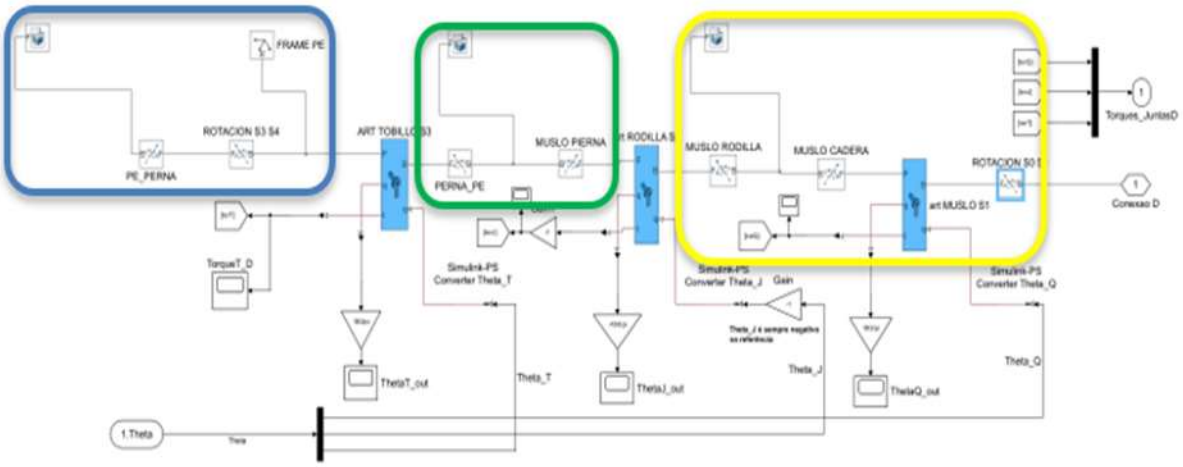
Además, ilustra el paso a paso con las flechas y los recuadros azules, para que quede guardados los cambios realizados al block file solid se debe dar click al icono “Apply” al finalizar su configuración de lo contrario no se guardara ningún cambio realizado al block.Tomado de :Elaboración propia

Se repetirá el mismo procedimiento para el resto de sólidos para mirar la configuración de los otros solidos se pueden ver en el anexo 2.

5.4.4 Configuración transformada rígida para cada solido

Figura 25

Conjunto de bloques de transformadas rígidas



Nota. La figura 25 representa los bloques de la pierna derecha y como estos están entrelazados.

Los recuadros que están agrupados en la figura 25 representa cada grupo de Transformación rígida, el color azul representa el pie figura 26, el color verde presenta la pierna figura 39, finalmente el color amarillo figura 32 que representa la unión del muslo, las transformadas rígida mantiene una relación espacial fija entre dos marcos durante la simulación. La relación espacial puede incluir una traslación y una rotación, en el caso del modelo este block es el encargado relacionar las uniones de nuestros solidos en la simulación, es decir, visualmente se carga de tener las piezas espacialmente unidas una a las otras en el tiempo de la simulación,

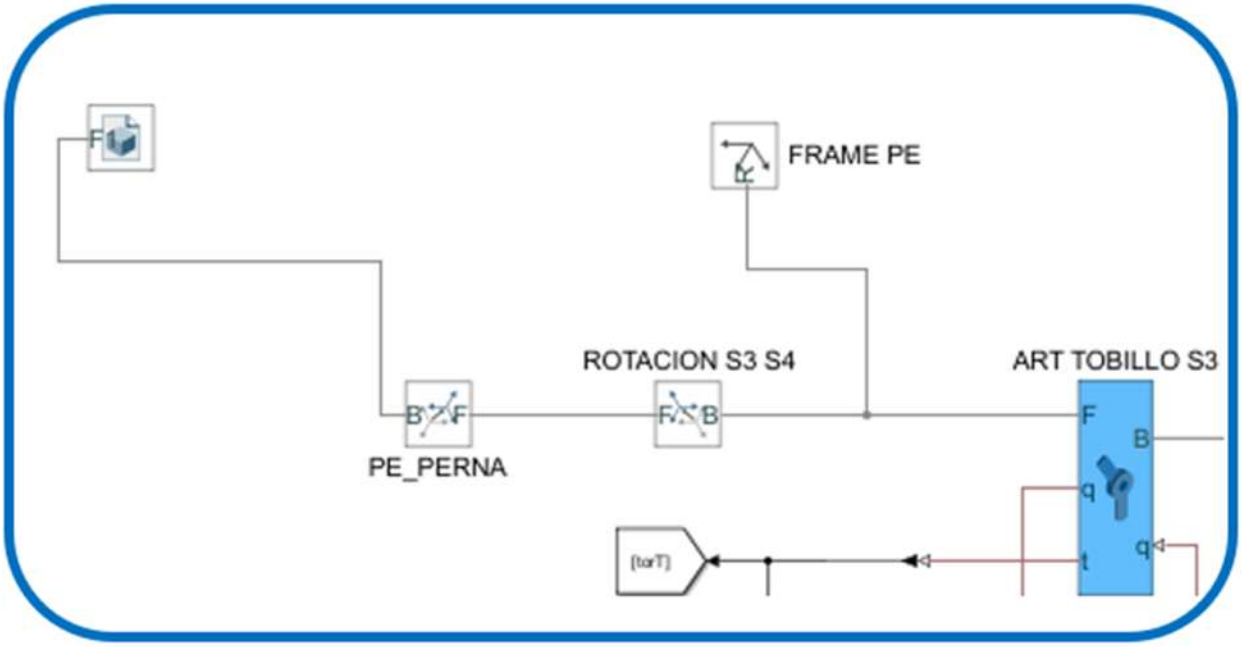
Este bloque cumple un papel importante para poder tener una simulación más precisa, ya que, con el bloque configuramos la posición del movimiento, la posición de la pieza, la cual se modifica según el modelo geométrico usado para la simulación, este icono tiene en cuenta los parámetros geométricos configurados anteriormente y como este solido debe está relacionado con el movimiento de marcha humana en el plano sagital.

Ahora se configuro cada bloque para el conjunto de la pierna derecha:

5.4.5 Configuración transformada rígida para el PIE

Figura 26

Transformaciones rígidas para la unión del pie y la pierna

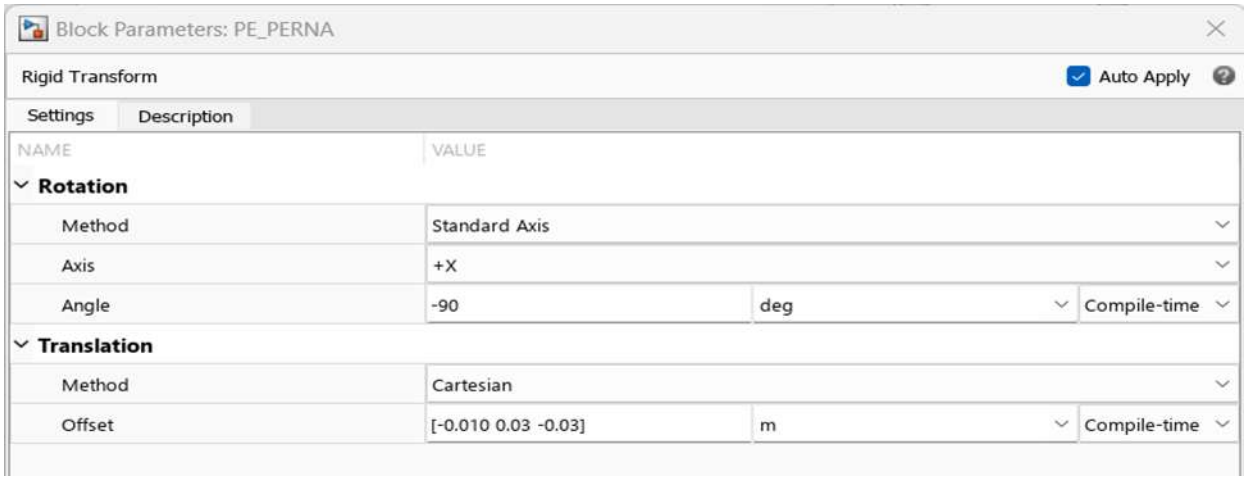


Nota. La figura 26 representa las trasformaciones rígidas existentes en el sólido pie.

En la Figura 26 se muestra dos transformadas rígidas, la primera llamada “PE_PERNA” que hace referencia a la posición de la unión entre el pie y la pierna en este caso se mueve espacialmente el pie, por otro lado, tenemos la ROTACION S3 S4 que hace referencia el movimiento que hay en la parte del pie para el proyecto se modificó respectivamente para satisfacer la unión del diseño se configuraron “PE_PERNA” y “ROTACION S3 S4” como se muestra en la siguiente figura 27 y la figura 28 respectivamente:

Figura 27

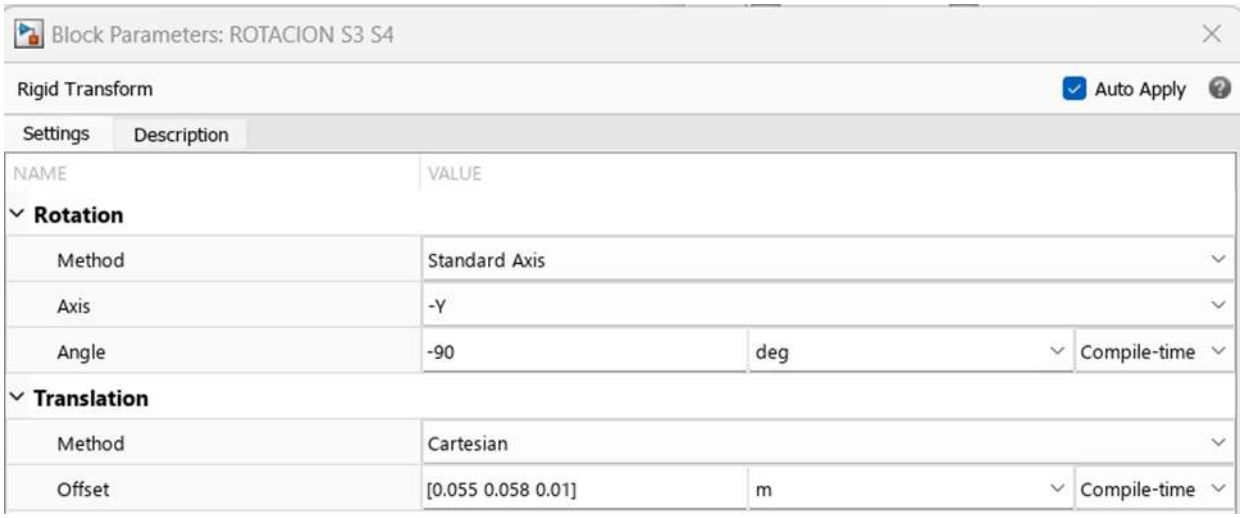
Configuración de la transformada rígida para la pierna bloque PE-PERNA



Nota. La Figura 27 representa el bloque de la transformada rígida PE_PERNA

Figura 28

Configuración de transformada rígida ROTACION S3 S4



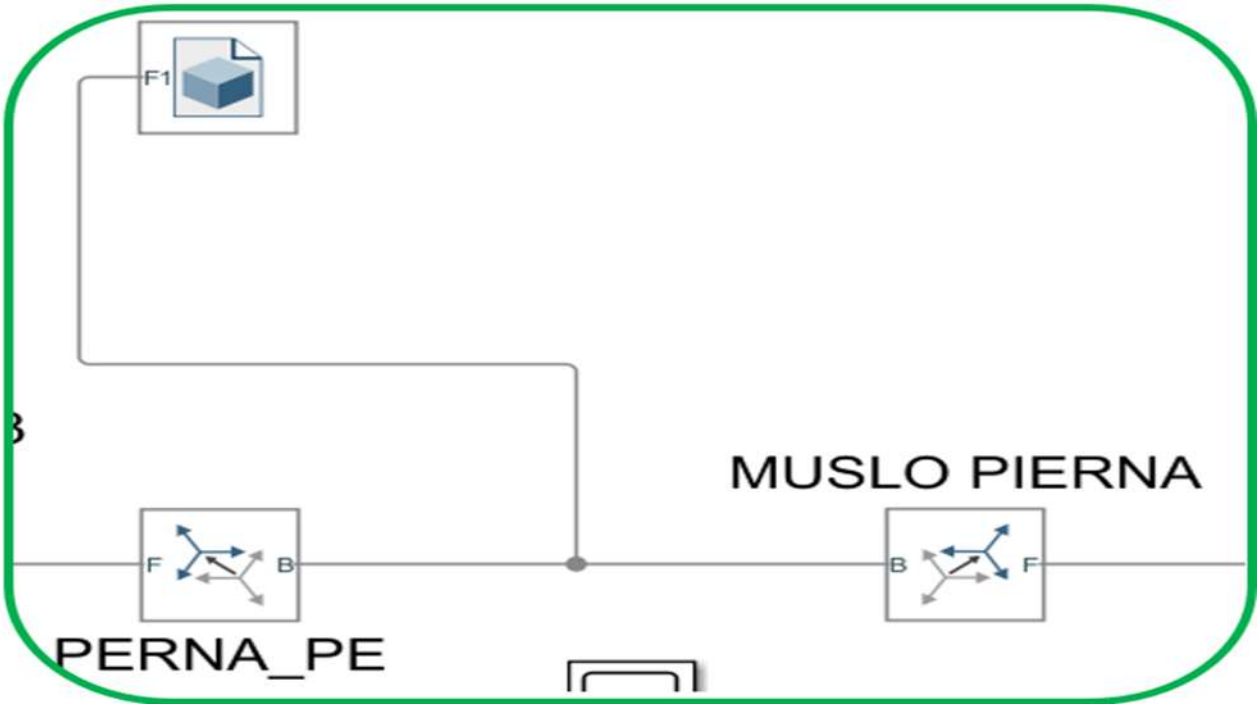
Nota. La figura 28 representa el bloque de transformada rígida ROTACION S3 S4

Posteriormente, se configurarán las transformadas rígidas para la articulación entra la pierna y el fémur.

5.4.6 Configuración de las transformadas rígidas para la solido de la pierna

Figura 29

Configuración de las transformadas rígidas para la pierna

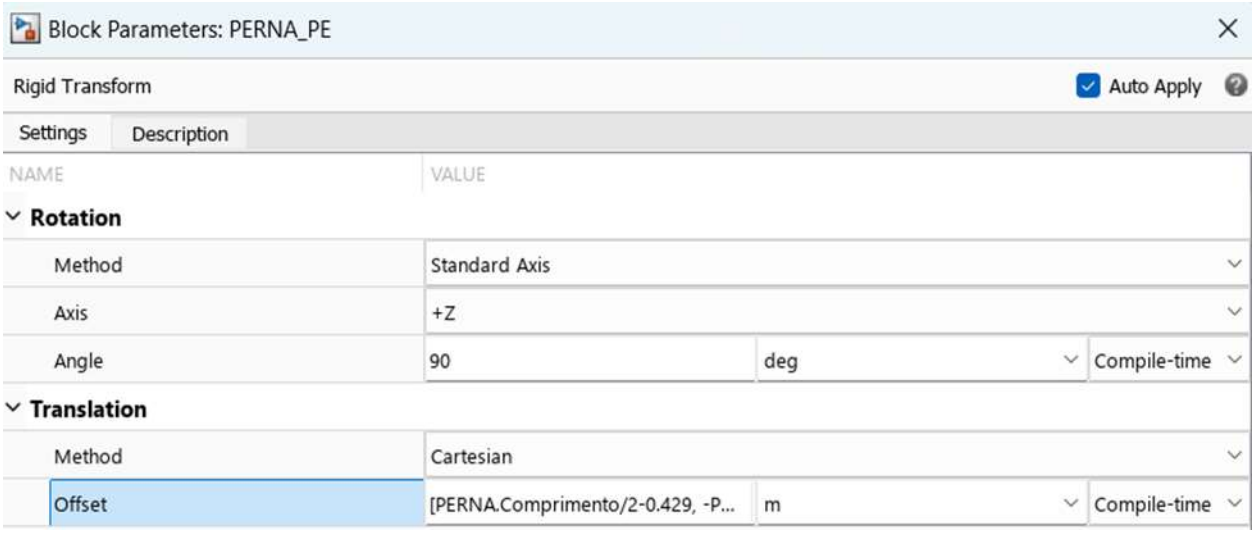


Nota. La Figura 29 representa las transformadas rígidas para la pierna

En la Figura 29 se muestran dos bloques de transformaciones rígidas para el sólido PERNA, la primera transformada rígida que es llamada “PERNA_PE” que hace referencia a la unió de pie con pierna tomando como referencia el sólido de la pierna, por otro lado, se tienen a la transformada rígida llamada MUSLO PIERNA que hacer referencia a la unión entre en la pierna con el muslo teniendo referencia el sólido de la pierna en la figura 30 e figura 31 se representan como se ubican tanto la translación como la rotación que tiene el sólido PIERNA que cumple el diseño propuesto

Figura 30

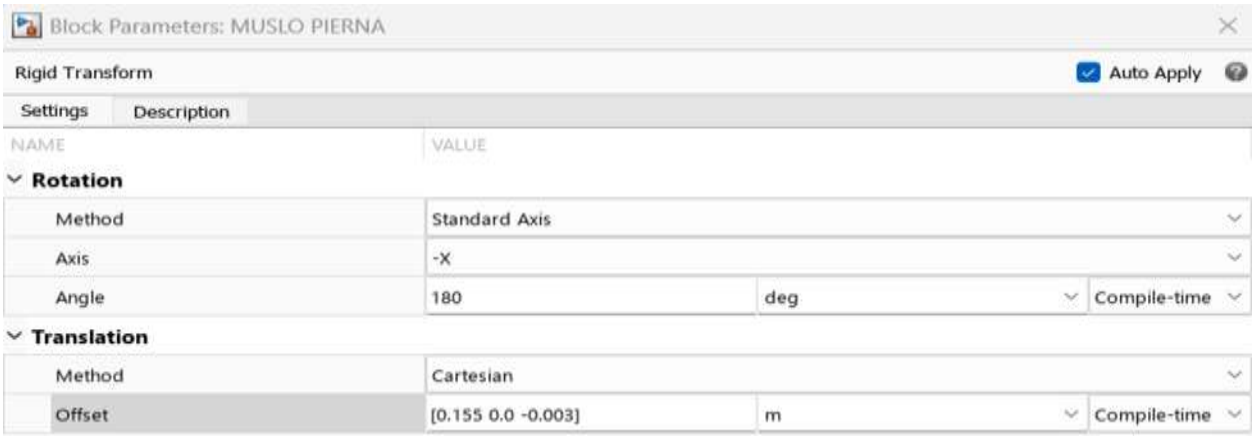
Configuración de la transformada rígida para el bloque PERNA_PE



Nota. La Figura 30 representa el bloque de transformada rígida PERNA_PE

Figura 31

Configuración de la transformada rígida para el bloque MUSLO PIERNA

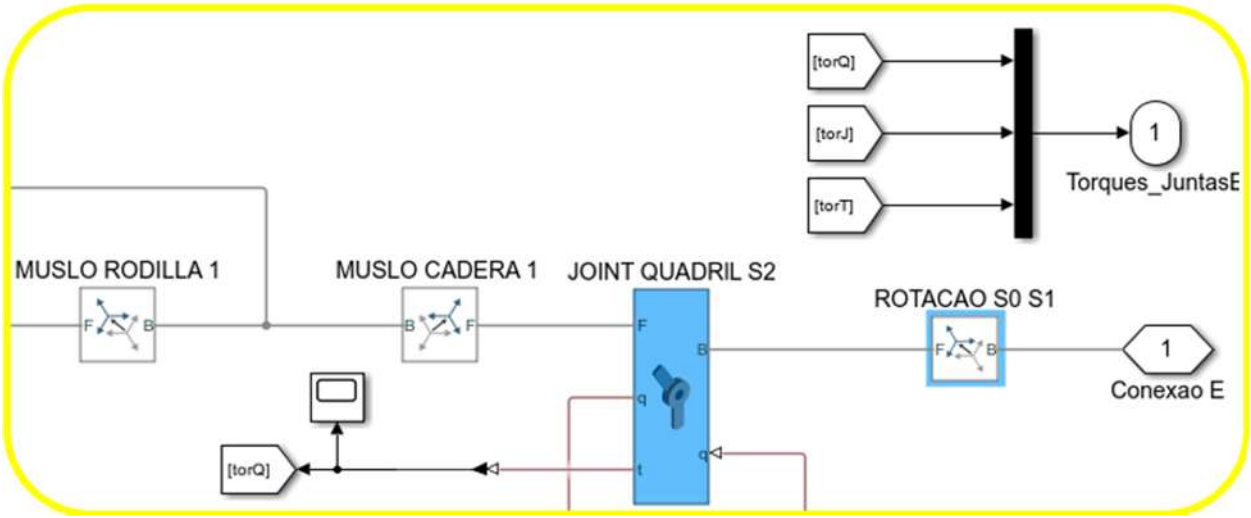


Nota. La figura 31 representa el bloque de transformada rígida MUSLO PIERNA.

5.4.7 Configuración solido muslo

Figura 32

Configuración de las transformadas rígidas del MUSLO

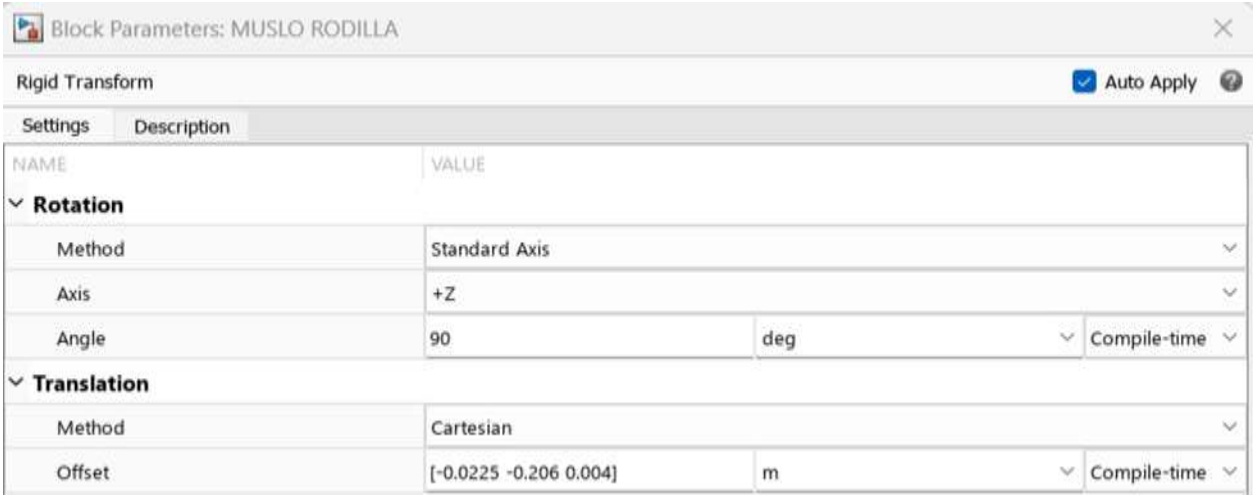


Nota. La Figura 32 representa las transformadas rígidas que hay en el Muslo.

En la Figura 32 se representa tres bloque de transformación rígida llamados “MUSLO RODILLA” que hace referencia a la unió de la pierna con el muslo tomando como referencia el sólido de la muslo, por otro lado, se tienen a la transformada rígida llamada “MUSLO CADERA” que hacer referencia a la unión entre en la muslo con el cadera, por último la transformada rígida llamada “ROTACION S0 S1” la cual hace referencia al rotación que hay entre la unión en la cadera y el muslo , en las siguientes Figuras 33 , figura 34 y figura 35, se configuraron la rotación y la traslación de la siguiente manera:

Figura 33

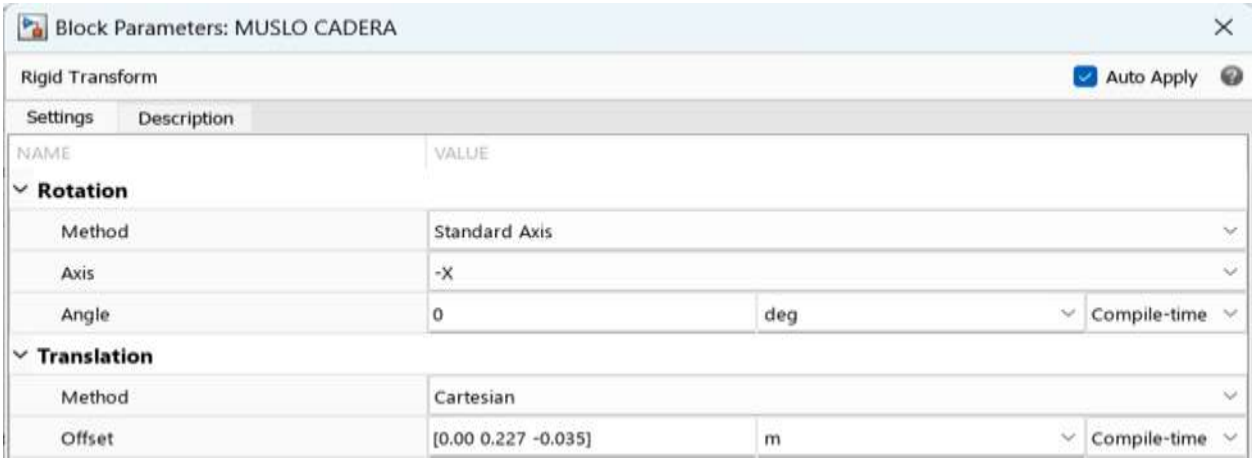
Configuración de la transformada rígida MUSLO RODILLA



Nota. La figura 33 representa el bloque de transformada rígida MUSLO RODILLA

Figura 34

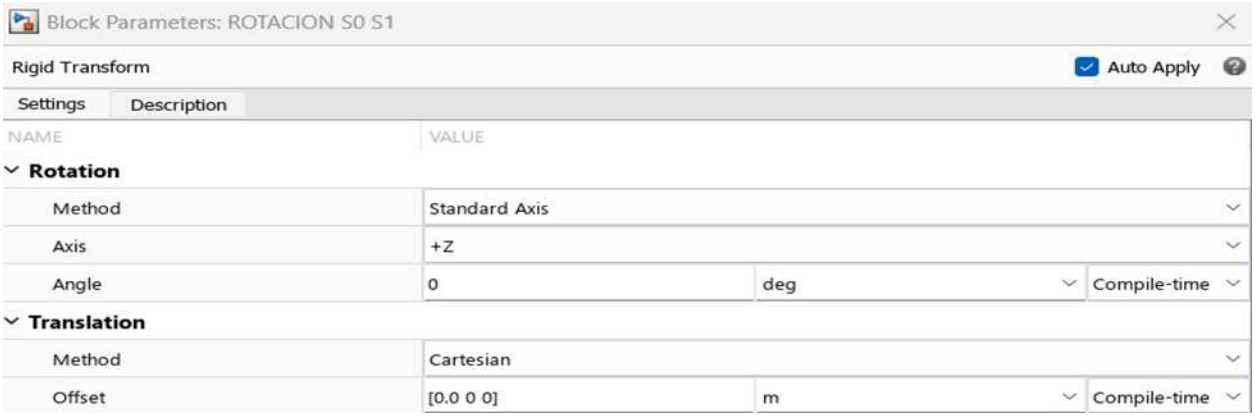
Configuración de la transformada rígida MUSLO CADERA



Nota. La figura 34 representa el bloque de transformada rígida MUSLO CADERA.

Figura 35

Configuración de la transformada rígida ROTACION S0 S1

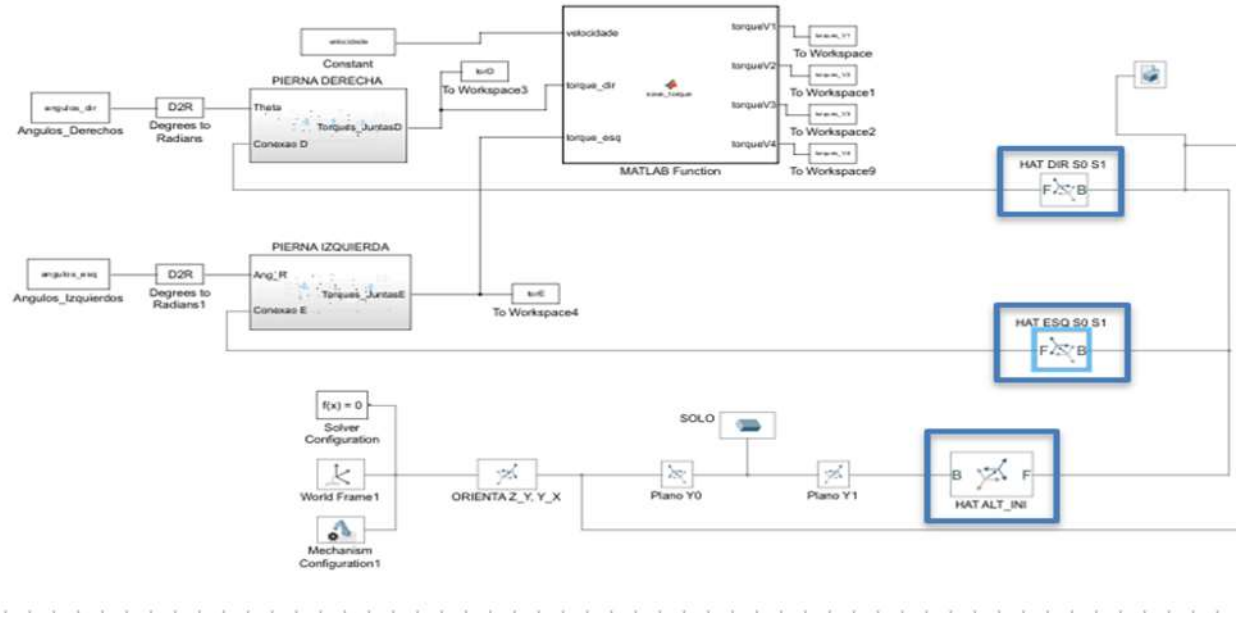


Nota. La figura 35 representa el bloque de transformada rígida *ROTACION S0 S1*.

5.4.8 Configuración solida de la Cadera

Figura 36

Configuracion transformadas rígidas de la CADERA



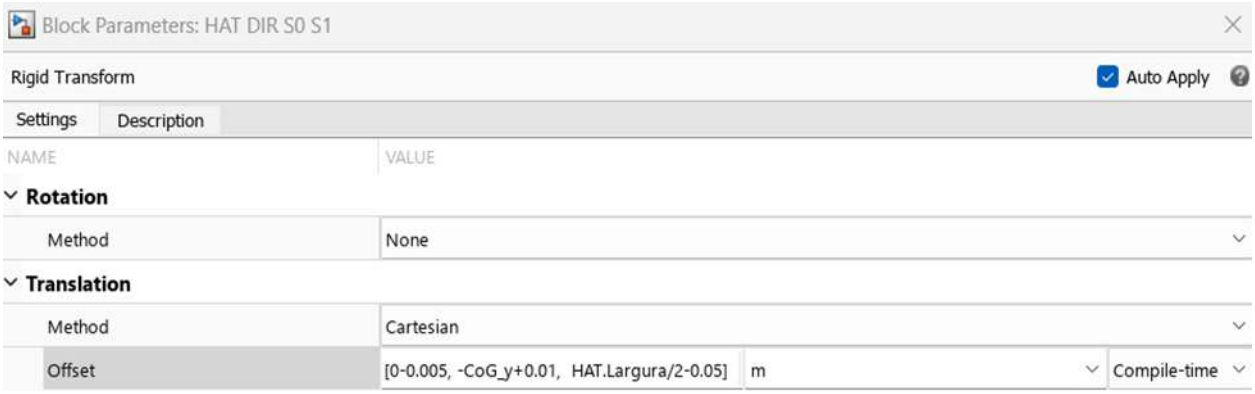
Nota. La figura 36 representa los bloques del conjunto de las dos Piernas y la Cadera.

En Figura 36 se configuraron tres transformaciones rígidas que están encerrada en los recuadros azules la primera “HAT ALT_INI” que hace referencia a la transformación rígida de posición de

la altura del cuerpo con respecto al piso, por otro lado, la transformación rígida llamada “HAT DIR S0 S1” que configura la rotación entre la cadera y el muslo derecho teniendo como referencia el sólido de la cadera, por ultimo tenemos la transformación rígida llamada “HAT ESQ S0 S1” que hace referencia a la transformación rígida de la posición de la rotación entre la unión de la cadera y el muslo izquierdo teniendo como referencia el sólido de la cadera, en la Figura 37, figura 38 y figura 39 se representa como se configuro cada bloque para cumplir con las características de diseño geométrico.

Figura 37

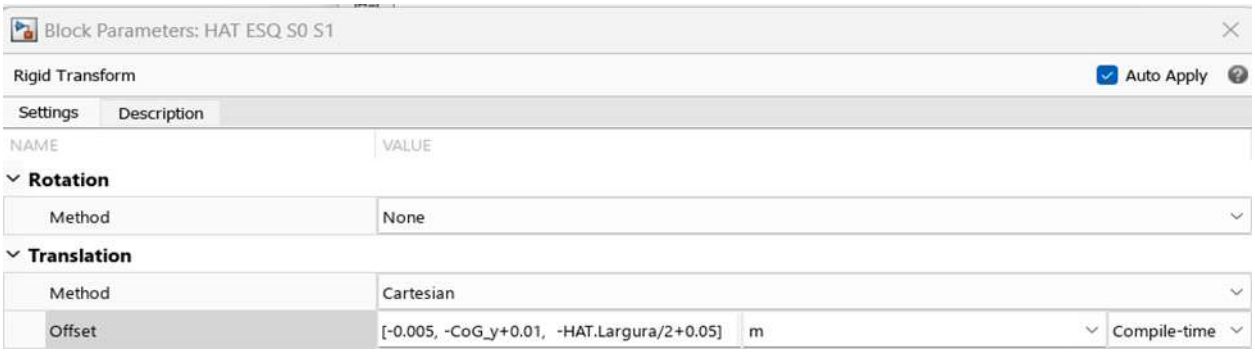
Configuración de la transformada rígida HAT DIR S0 S1



Nota. La figura 37 representa el bloque de transformada rígida *HAT DIR S0 S1*

Figura 38

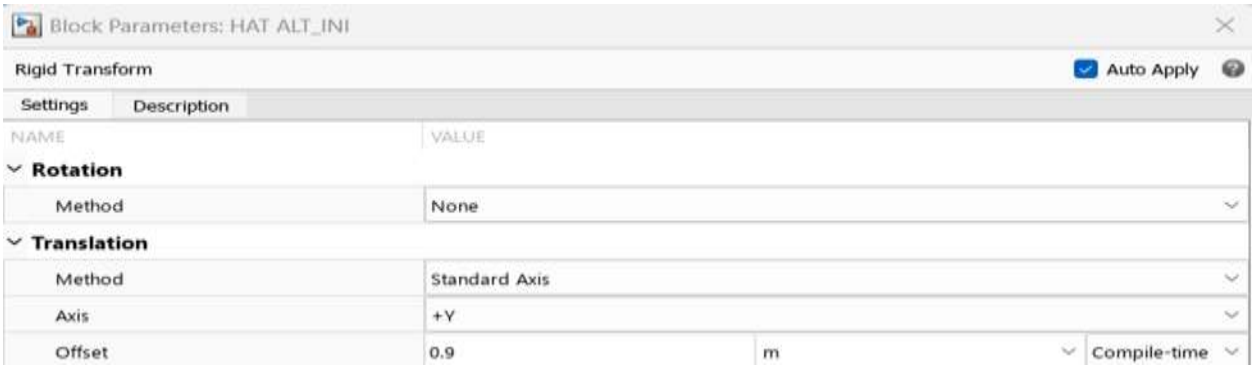
Configuración de la transformada rígida HAT ESQ S0 S1



Nota. La figura 38 representa el bloque de transformada rígida *HAT ESQ S0 S1*.

Figura 39

Configuración de la transformada rígida HAT ALT INI



Nota. La figura 39 representa el bloque de transformada rígida *HAT ESQ S0 S1*.

5.5 Análisis de graficas de simscape y comparación com el modelo anterior de software

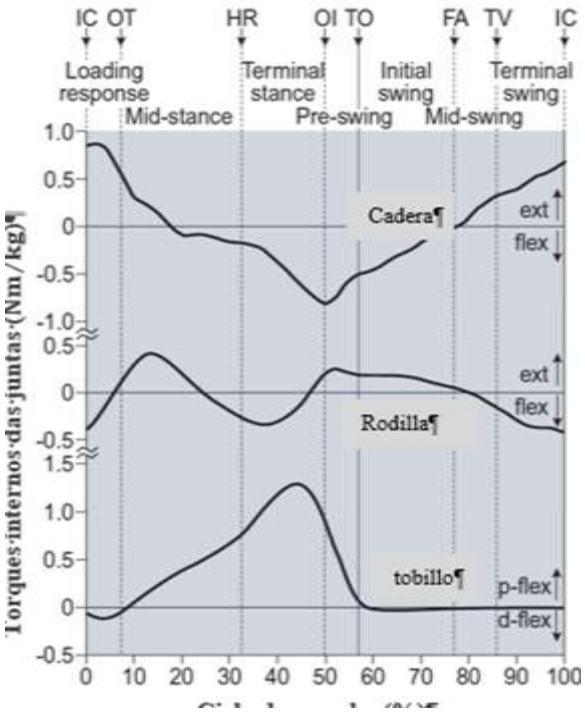
Posterior a los procesos anteriores, se concluirá de acuerdo con las señales biomecánicas antes mencionadas, la veracidad de la simulación y los resultados obtenidos a partir de ella, describiendo así por completo un sistema bípedo antropomórfico, desplazándose por el plano sagital.

Se realizó cambio de materia y también de medidas en el software y no se envíe envío cambio en las gracias de torque

Momentos articulares internos normalizados (N.m/kg) en el plano sagital durante un ciclo de marcha

Figura 40

Torque de rodilla tobillo y pie ciclo de marcha

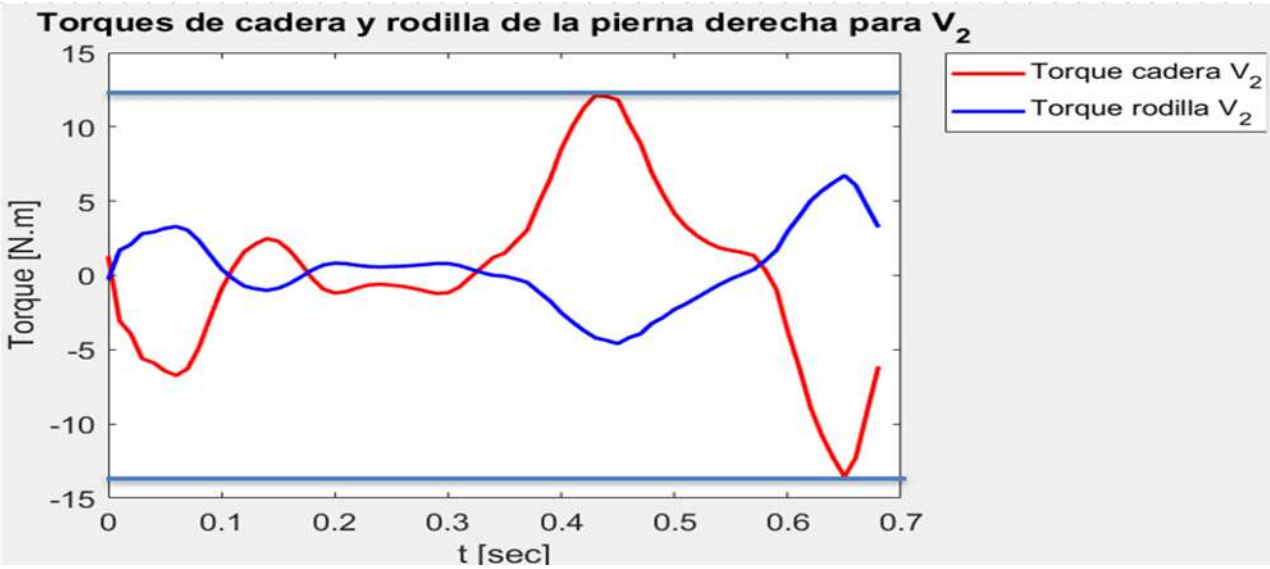


Nota. La figura 40 representa los torques en un ciclo de marcha de la Cadera Rodilla y Tobillo. [9]

En la figura 40 las gráficas de resultados para torques en las diferentes articulaciones. las gráficas para el torque de cada articulación referenciando la simulación propuesta en el documento de Izquierdo [9], y posteriormente las gráficas obtenidas a partir de las nuevas propuestas de sólidos del presente proyecto.

Figura 41

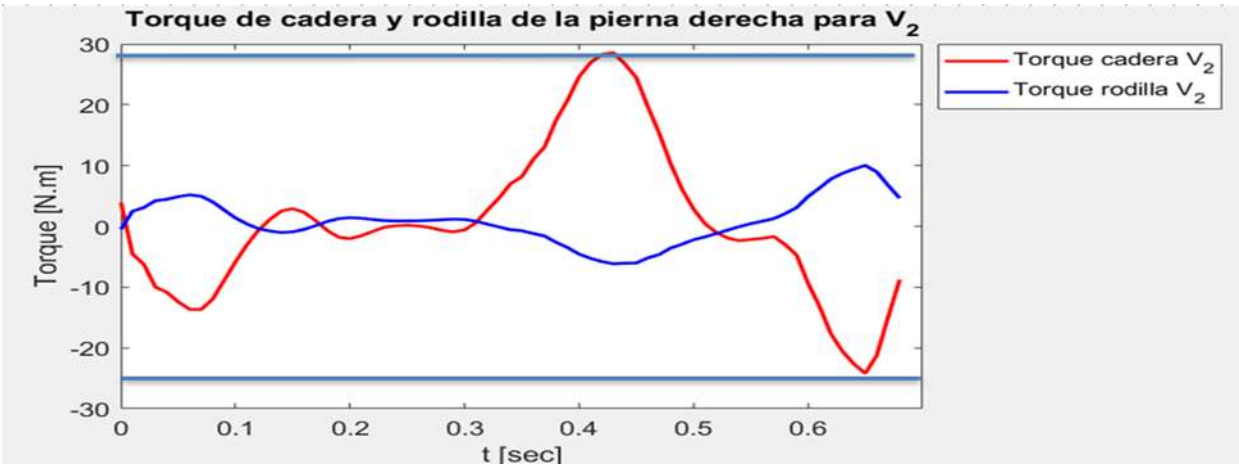
Torques de cadera y rodilla para la pierna derecha simulación original



Nota. En la Figura 41 se observa el torque de la cadera en color rojo el cual nos da un toque muy cercano a los 15 N. m por otro lado, se tiene la línea azul que representa el toque de la rodilla el cual tiene una magnitud de 7.5 N. m. [9]

Figura 42

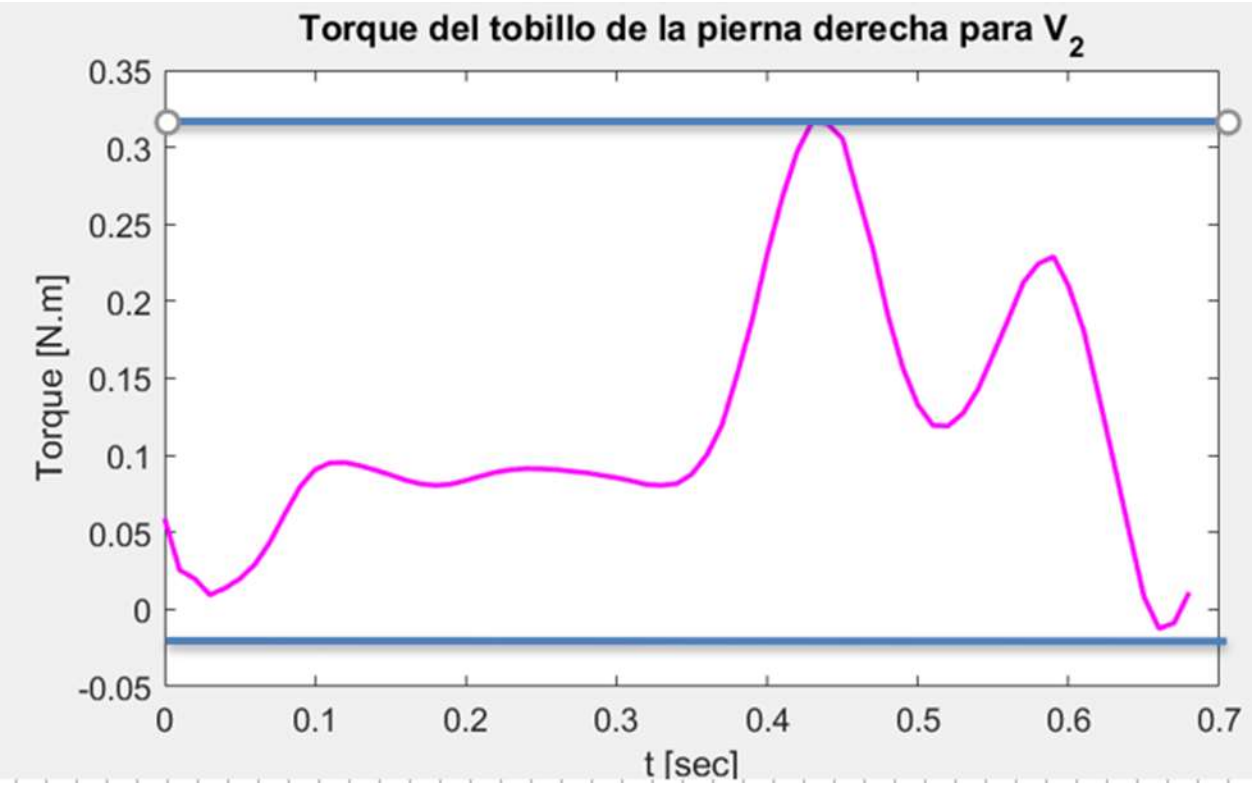
Torque de cadera y rodilla para la pierna derecha para simulación propuesta



Nota. En la Figura 42 se observa el torque de la cadera en color rojo el cual nos da un toque muy cercano a los 30 N.m por otro lado, se tiene la línea azul que representa el toque de la rodilla el cual tiene una magnitud de 10 N.m

Figura 43

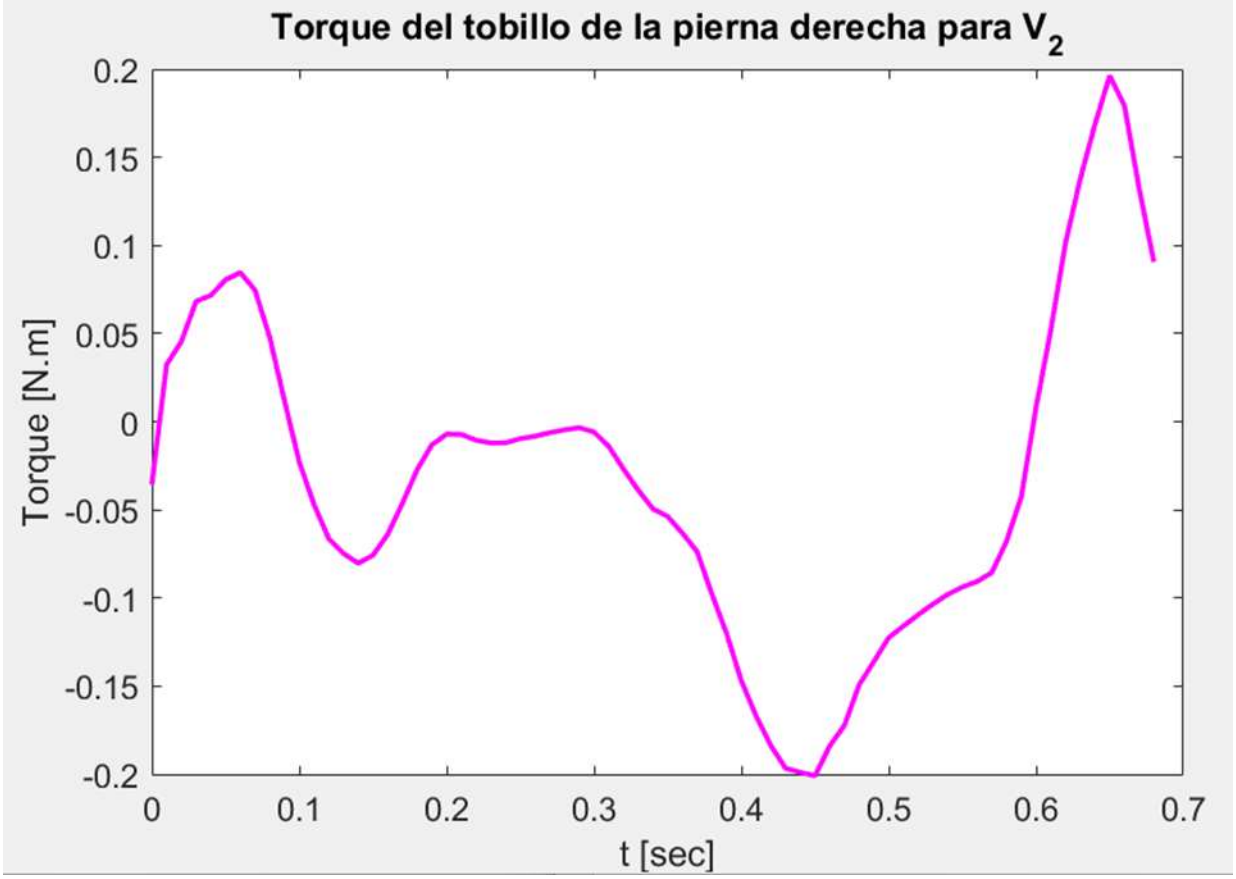
Torque del tobillo de la pierna derecha para la simulación original



Nota. La figura 43[9] se observa el torque del tobillo en color fucsia el cual nos da un toque muy cercano a los 0.32 N. m**.**

Figura 44

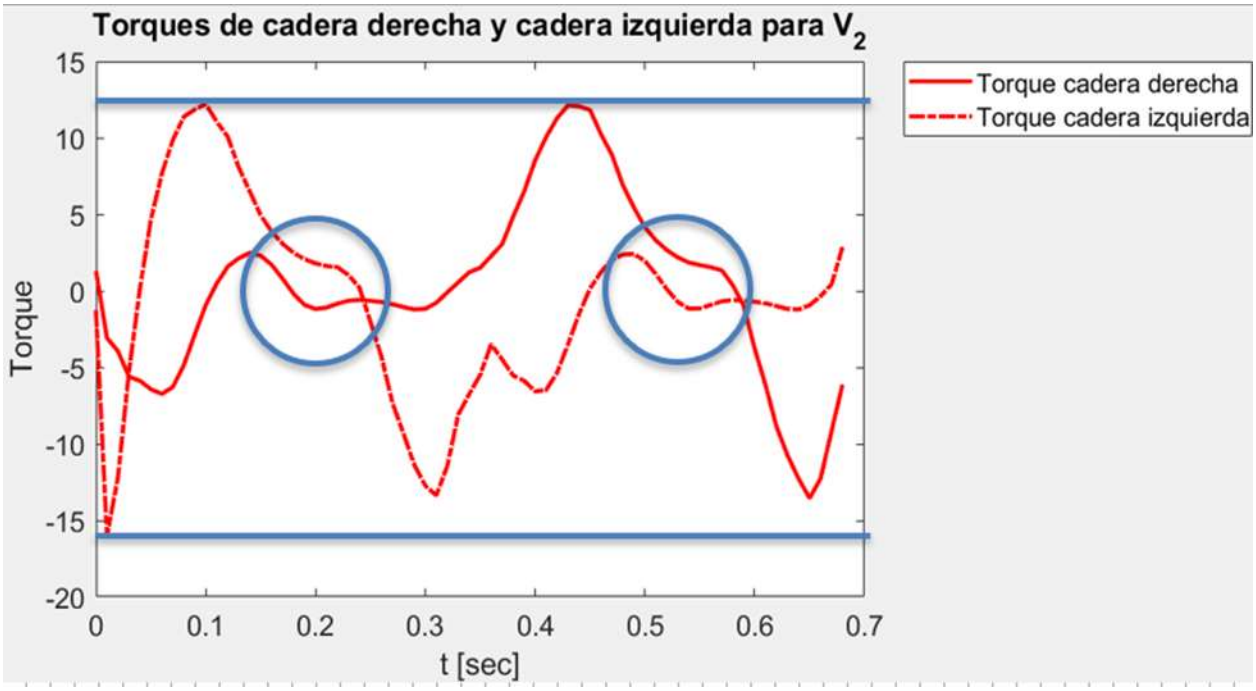
Torque tobillo pierna derecha para la simulación propuesta



Nota. La figura 44 se observa el torque del tobillo en color fucsia el cual nos da un toque muy cercano a los 0.2 N.m es decir se redujo con respecto al anterior diseño, ahora bien también se observa un cambio notoria a la gráfica pese a que es el mismo movimiento, esta cambio se debe a la posición de la transformada rígida del nuevo modelo

Figura 45

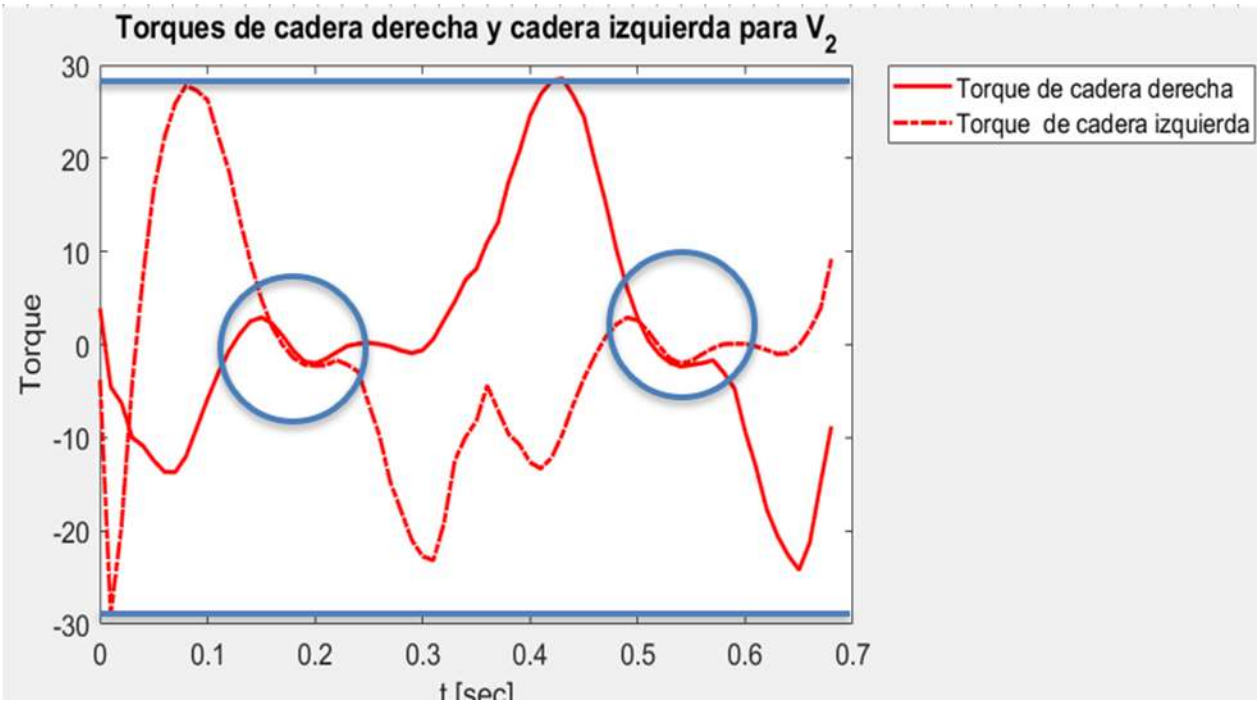
Torque de cadera derecha y cadera izquierda para la simulación original



Nota. La Figura 45[9] representar los torques de la cadera derecha donde se tiene un toque para las dos piernas de 15 N. m.

Figura 46

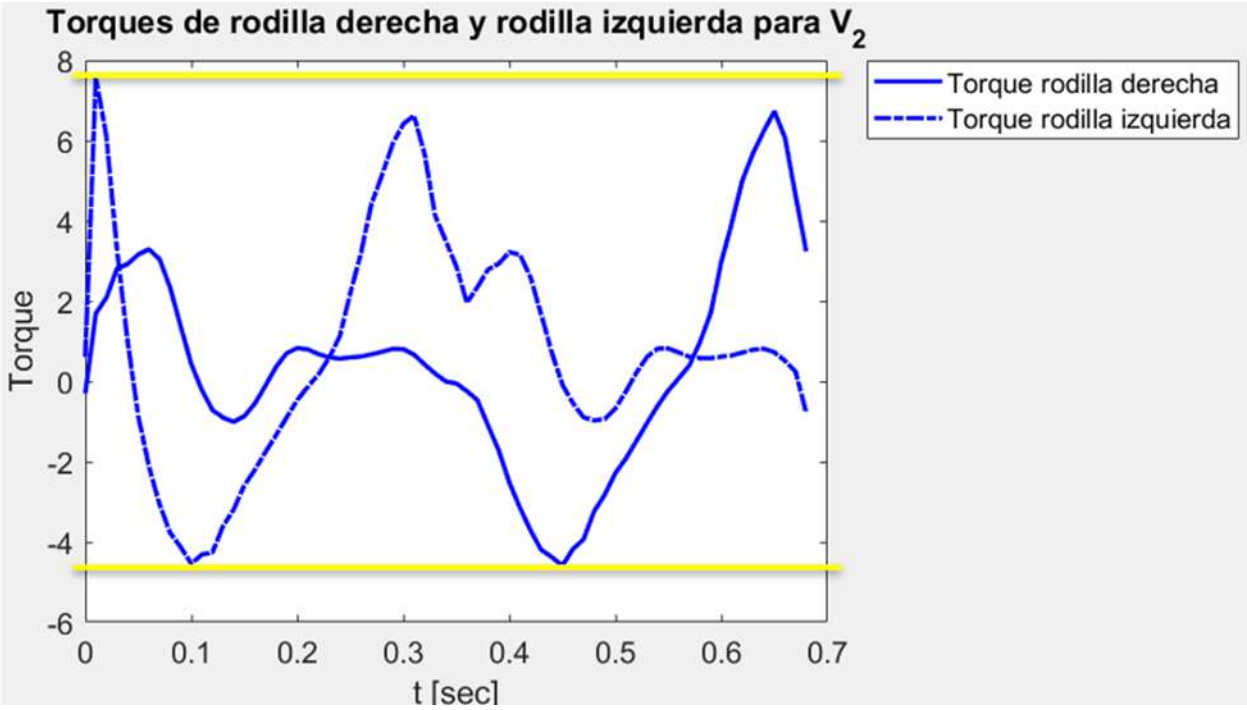
Torque para la cadera izquierda y derecha para la simulación propuesta



Nota. La Figura 46 representar los torques de la cadera derecha. con respecto al anterior solido se puede observar que aumento el torque con un torque de 30 N.m a su vez, se enmarco en un círculo azul un comportamiento de unión el cual se debe a que las transformadas rígidas tanto para la pierna derecha como izquierda quedaron en la misma posición espacial .

Figura 47

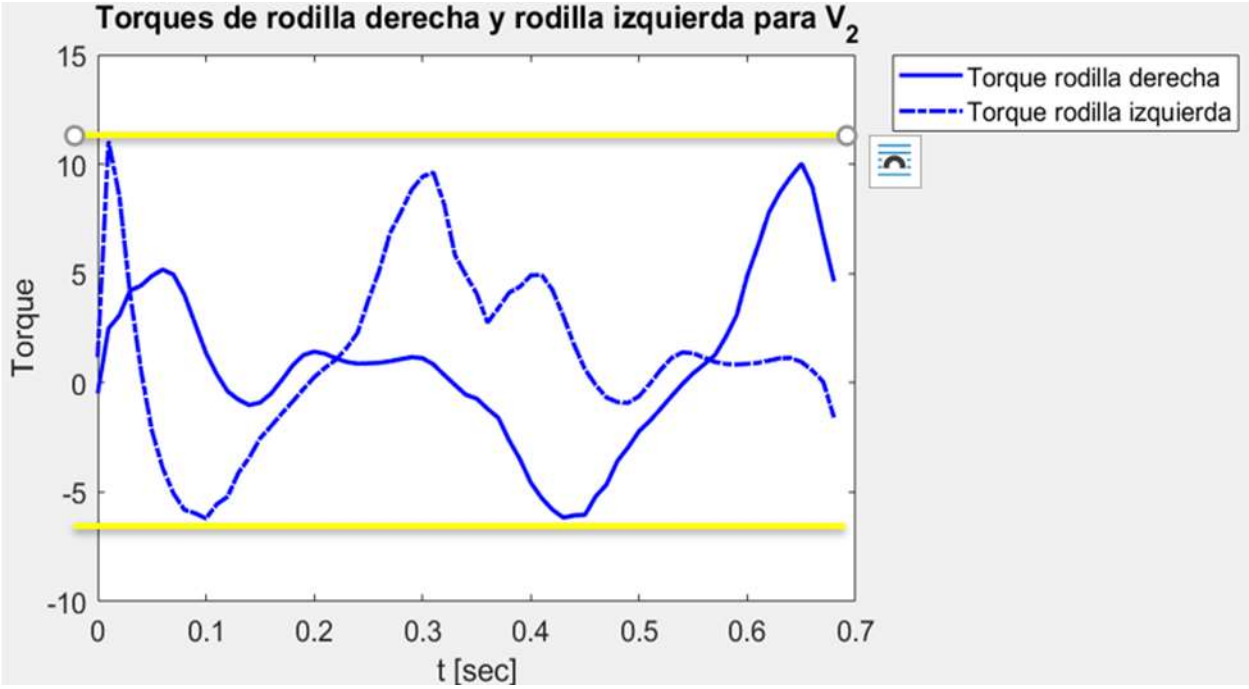
Torque de rodilla derecha y rodilla izquierda para la simulación original



Nota. La Figura 50[9] representar los torques de la rodilla derecha e izquierda donde se tiene un torque max para las dos piernas de 8 N. m.

Figura 48

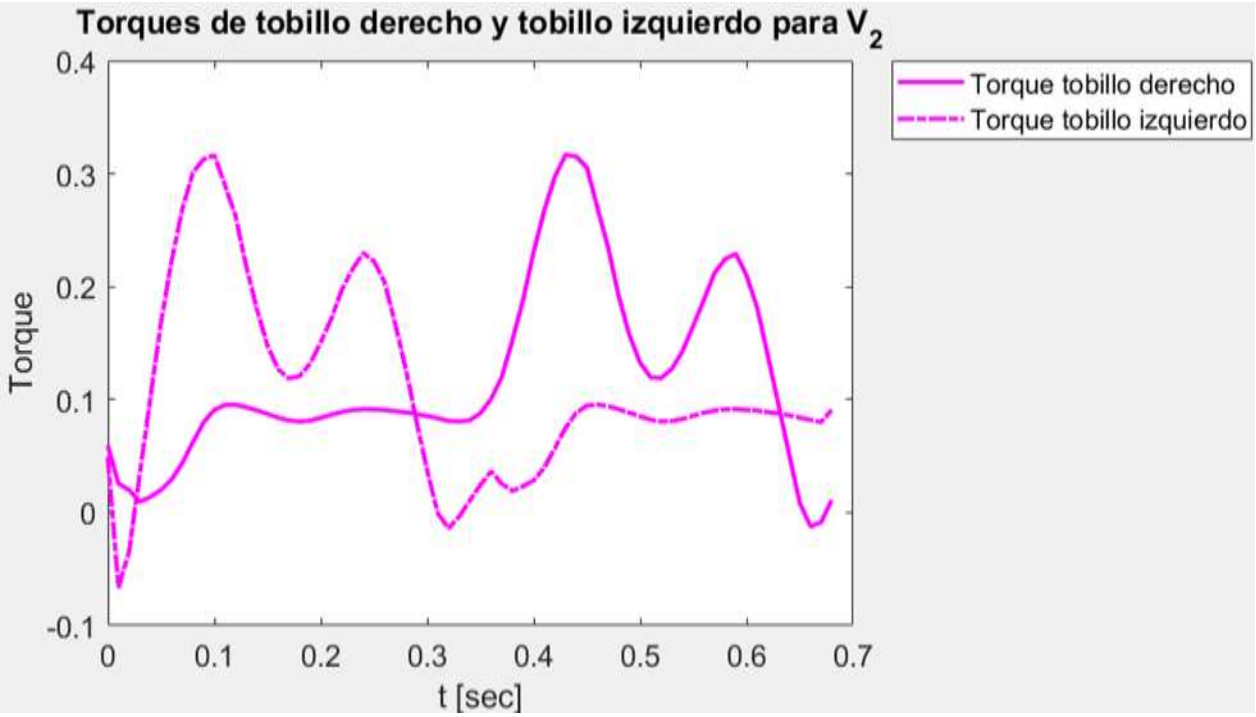
Torque de la rodilla derecha e izquierda para la simulación propuesta



Nota. La Figura 48 representar los torques de la rodilla derecha e izquierda, con respecto al anterior solido se puede observar que aumento el torque con un torque de 12 N.m pero se mantuvo el mismo patrón de grafica a la hora de simular la caminata

Figura 49

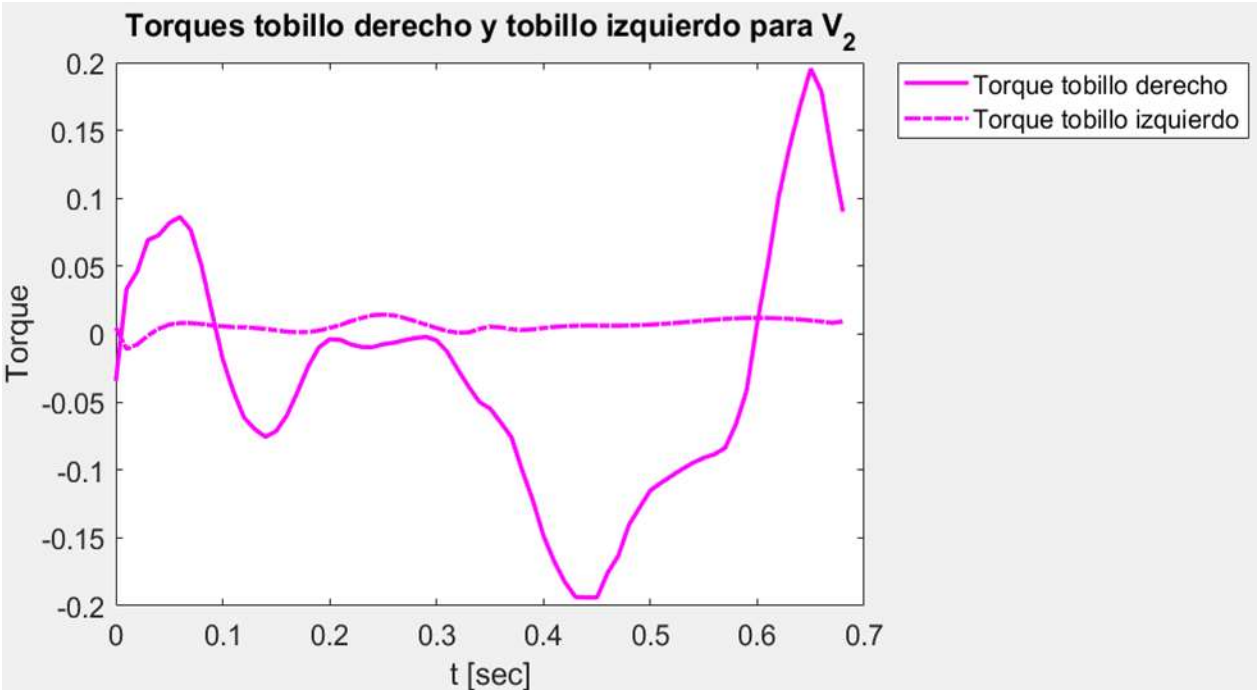
Torque para el tobillo derecho e izquierdo para la simulación original



Nota. La Figura 49 representar los torques del tobillo derecho e izquierdo donde se tiene un torque para las dos piernas de 0.3 N. m. [9]

Figura 50

Torque para el tobillo derecho e izquierdo para la simulación propuesta



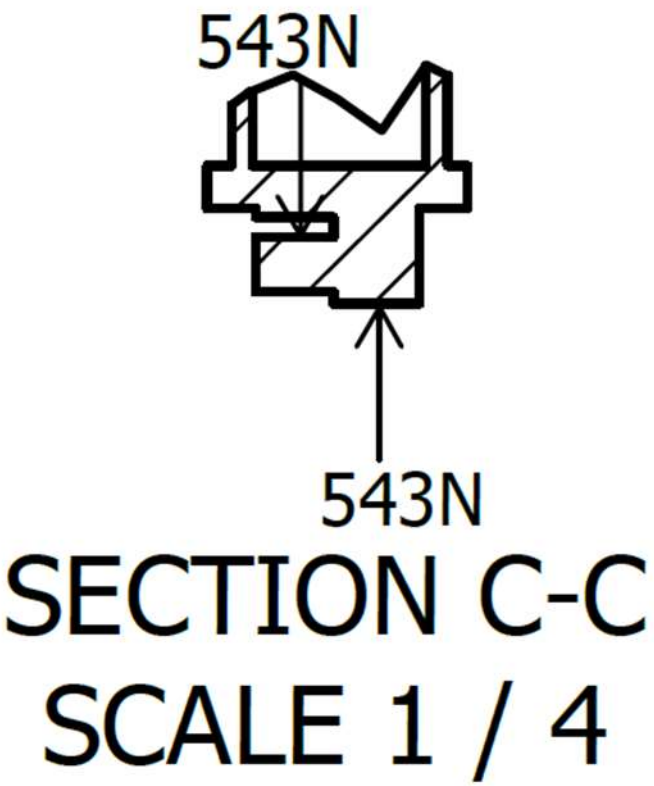
Nota. La Figura 50 representar los torques del tobillo derecho e izquierdo donde se observa que cambio el comportamiento del tobillo izquierdo esto se debe a la configuración de bloque de transformada rígida.

5.6 Cálculo del esfuerzo crítico de cizalladura en los pasadores

5.6.1 Pasadores en la coyuntura del tobillo

Figura 51

Diagrama de cuerpo libre el pasador del tobillo



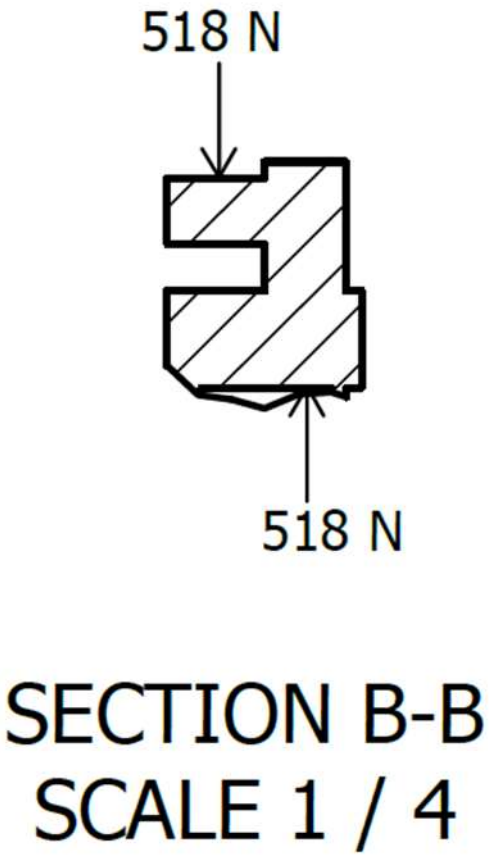
Nota. La figura 51 representa el diagrama de cuerpo libre para las cargas propuestas para el pasador que se ubica entre el pie y la pierna. El plano completo de la pieza se encuentra en los anexos del presente documento.

$$\tau_{max} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} * d^2} = \frac{543\ N * 4}{\pi * (0.0126\ m)^2} = 4.35\ MPa$$

5.6.2 Pasador para la coyuntura de la rodilla

Figura 52

Diagrama de cuerpo libre para el pasador para la rodilla



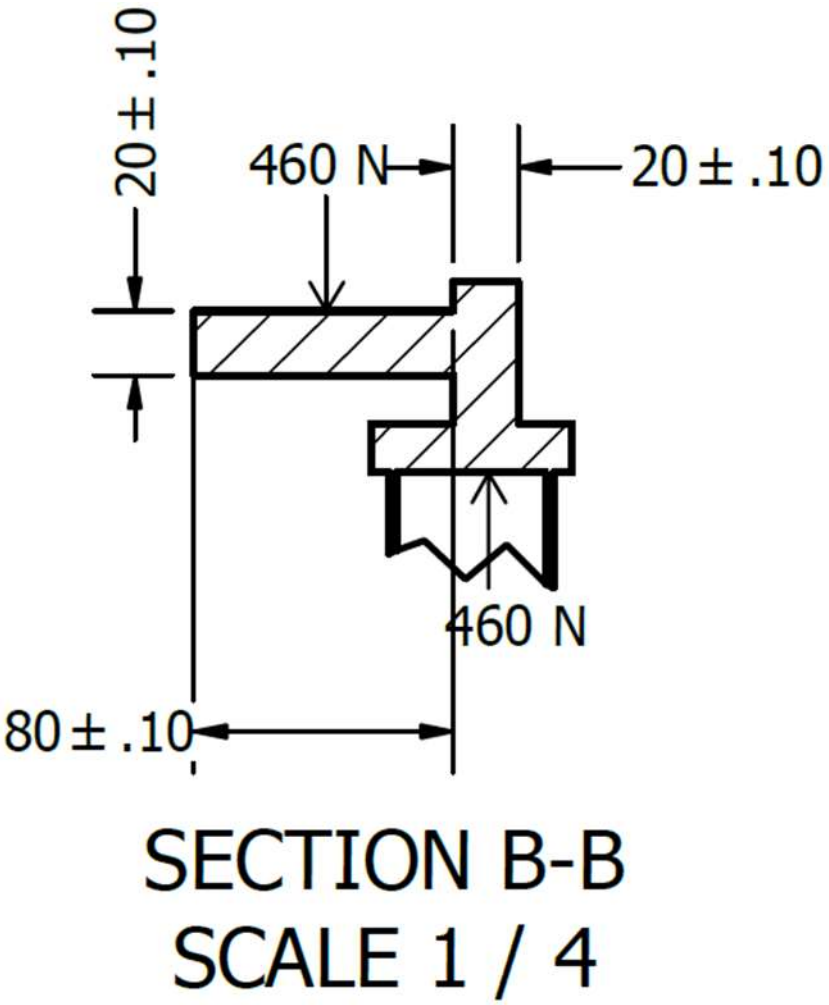
Nota. La figura 52 representa el diagrama de cuerpo libre del pasador que conforma la coyuntura de la rodilla.

$$\tau_{max} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} * d^2} = \frac{518\ N * 4}{\pi * (0.02048\ m)^2} = 1.57\ MPa$$

5.6.3 Pasador para la coyuntura de la cadera

Figura 53

Diagrama de cuerpo libre pasador coyuntura de la cadera



Nota. La figura 53 representa el diagrama de cuerpo libre del pasador que conforma la coyuntura de la cadera

6. CONCLUSIONES

Utilizando las herramientas de software CAD y la evaluación de los resultados obtenidos fue posible mejorar los niveles de réplica de las curvas de torque generadas en cada una de las articulaciones del segmento inferior del cuerpo humano. Logrando obtener curvas menos pronunciadas y más cercanas a las medidas originalmente presentadas por la literatura

En el presente estudio, se ha desarrollado con éxito el modelo geométrico y el modelo cinemático del mecanismo robótico basado en conceptos biomecánicos para describir el comportamiento del miembro inferior humano durante el ciclo de la marcha en el plano sagital. El modelo geométrico permitió una representación precisa de la estructura y las articulaciones del miembro inferior, mientras que el modelo cinemático proporcionó una descripción detallada de los movimientos angulares y lineales de las articulaciones y segmentos durante el ciclo de la marcha

En este estudio, se ha diseñado con éxito un mecanismo robótico bípedo que cumple con la trayectoria deseada durante un ciclo de marcha, utilizando la síntesis dimensional optimizada de variables de diseño antropomórficas. La metodología de iteración aplicada permitió determinar las dimensiones y configuraciones óptimas de los componentes

Utilizando el software SIMSCAPE se espera obtener una simulación congruente con el proceso de marcha biomecánico, y así obtener los algoritmos de control que permitirán a un robot construido materialmente, realizar los procesos de marcha equivalentes.

En el presente estudio, se ha desarrollado con éxito el modelo geométrico y el modelo cinemático del mecanismo robótico basado en conceptos biomecánicos para describir el comportamiento del miembro inferior humano durante el ciclo de la marcha en el plano sagital. El modelo geométrico permitió una representación precisa de la estructura y las articulaciones del miembro inferior, mientras que el modelo cinemático proporcionó una descripción detallada de los movimientos angulares y lineales de las articulaciones y segmentos durante el ciclo de la marcha.

Utilizando herramientas de simulación y análisis por elementos finitos, hemos determinado que el material ideal para la construcción del mecanismo bípedo es el PETG. Este material ha demostrado ser capaz de soportar las cargas operativas, y las deformaciones unitarias resultantes

son lo suficientemente pequeñas como para no afectar la operación del sistema. Considerando, adicionalmente, las propiedades de baja reactividad química, su valor unitario, y sus condiciones de fácil manufactura, hacen del PETG el material idóneo para la construcción física del modelo propuesto.

REFERENCIAS

[1] T. Yuchuang, L. Haotian y Z. Zhengtao , «Advancements in Humanoid Robots: A Comprehensive,» IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA, pp. 301-328, 1 02 2024.

[2] M. O'Malley, A. D. Wilson y A. M. Young, «HIGHLY REALISTIC ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC ARM AND HAND DESIGN,» Science Robotics, vol. 5, nº 48, pp. 5-25, 2020.

[3] L. Umiya y C. Laschi, «SOFT ROBOTICS FOR HUMAN-ROBOT INTERACTION: A REVIEW OF SOFT ACTUATORS AND SENSORS,» Advanced Materials, vol. 10, nº 31, pp. 30-42, 2019.

[4] Y. Quiñonez, O. Zatarain, C. Lizarraga, J. Peraza y J. Mejia, « Algoritmo para controlar un brazo antropomórfico usando una transformación lineal,» Revista lbérica de Sistemas y Tecnologías de Información, vol. 10, nº 36, pp. 65-81, 2020.

[5] C. Riaño, C. Peña y H. Sanchez, «Aplicación de técnicas de desenvolvimiento de producto para el desarrollo de un robot antropomórfico,» Revista UIS Ingenierías, vol. 17, nº 1, pp. 21-34, 2018.

[6] F. H. Martinez, E. J. Gómez y D. A. Zárate, «Concepto de robot humanoide antropométrico para investigación en control,» Tecnura, vol. 19, nº 1, pp. 55-65, 2014.

[7] I. Aguirre, L. Andueza y C. Arinzmendi, «Sistema manipulador antropomórfico de tres grados de libertad,» ITECKNE, vol. 8, nº 1, pp. 87-95, 2011.

[8] M. Calderon, C. Coronel y E. Camargo, «Prototipo de emulación de movimiento humano mediante una plataforma bípeda humanoide,» Tecnura, vol. EDICION ESPECIAL, nº 1, pp. 217-229, 2014.

[9] L. M. Izquierdo, «Estratégia de Controle Híbrido Bioinspirado Para um Exoesqueleto Robótico de Membro Inferior,» de Estratégia de Controle Híbrido Bioinspirado Para um Exoesqueleto Robótico de Membro Inferior, Campinas, 2022, pp. 22-31.

[10]] A. Oppenheimer, ¡Crear o morir! La esperanza de América Latina y las cinco claves de la INNOVACIÓN, Mexico DF: Penguin Random House Grupo Editorial SA de CV, 2014.

[11] J. J. Craig, Introduction to robotics : mechanics and control, New York: Person Pretince-Hall, 2005.

[12] J. Perry y J. M. Burnfield, Gait Analysis: Normal and Pathological Function, New Jersey: McGraw Hill, 2010.

[13] L. Tung-Wu. y C. Chu-Fen, «Biomechanics of human movement and its clinical applications,» The Kaohsiung Journal of Medical Sciences, vol. 28, nº 1, pp. S13-S25, 2010.

[14] R. C. Hibbeler, Ingeniería dinámica 12A edicion, New York: Prentice-Hall, 2010.

[15] V. Tikhanoff, L. Natale, F. Nori y A. Cangelosi, «The iCub Humanoid Robot Simulator,» International Conference on Intelligent RObots and Systems, vol. 1, nº 1, pp. 1-3, 2008.

[16] M. W. Spong, S. Hutchinson y M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, New Jersey: Wiley, 2020.

[17] M. Nordin y V. H. Frankel, Biomecánica básica del sistema musculoesqueletico, Madrid: McGraw Hill, 2004.

[18] E. Español, «EL Español,» NO, 06 06 2024. [En línea]. Available: https://www.elespanol.com/como/20240408/calcular-peso-ideal-estatura-edad-mejor-formula-kwi/367713856_0.html#:~:text=F%C3%B3rmula%20de%20Wan%20der%20Vael,x%200%2C75%20%2B%2050.. [Último acceso: 06 06 2024].

[19] P. Beer, Mecánica de Materiales, Mexico DF: McGraw Hill, 2009.

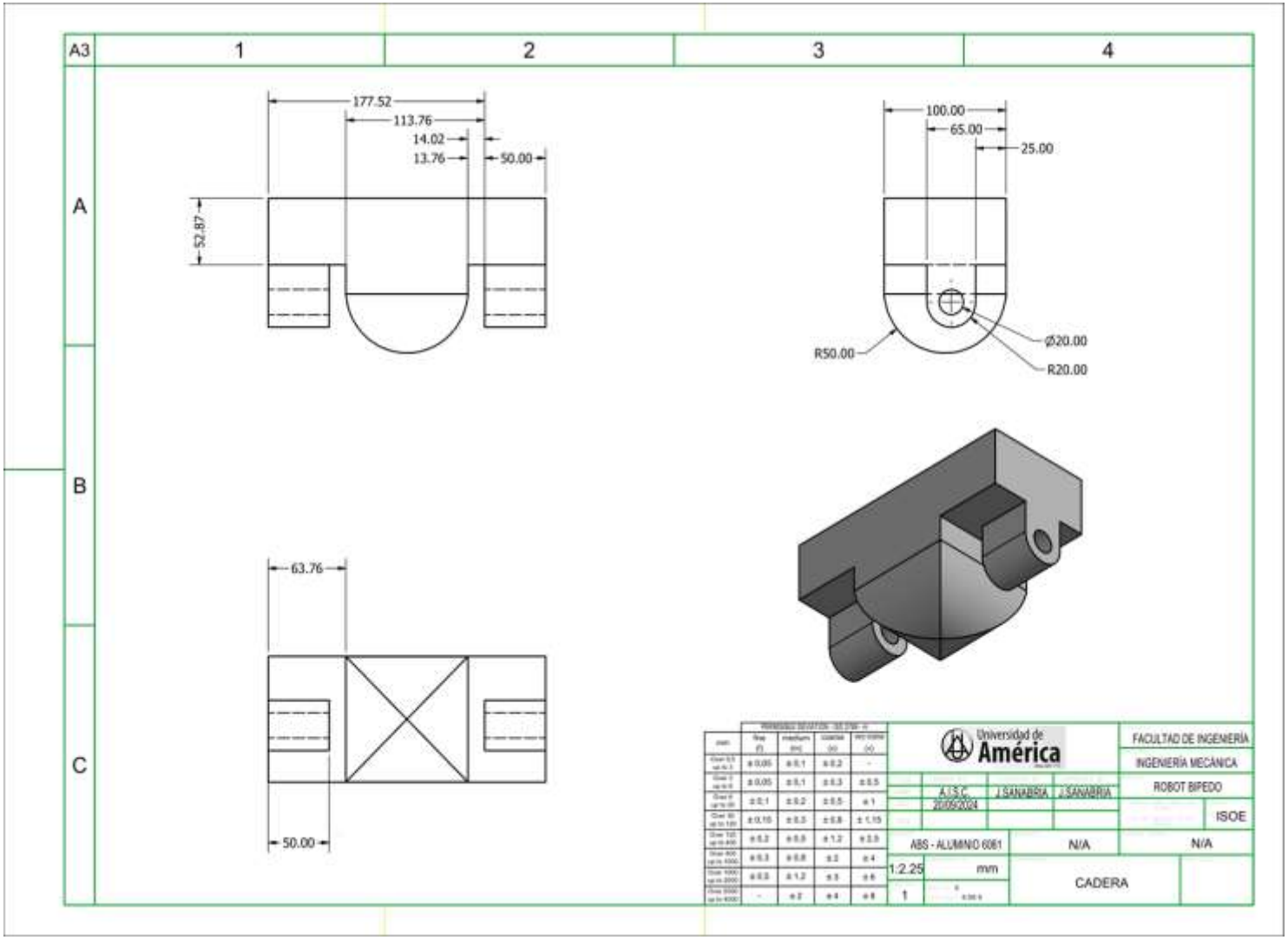
[20] C. Quintero-Quiroz y V. Sazulich Perez, «Materials for lower limb prosthetic and orthotic interfaces,» Revista de la facultad de medicina Universidad nacional de Colombia, vol. 67, nº 1, pp. 117-125, 2017.

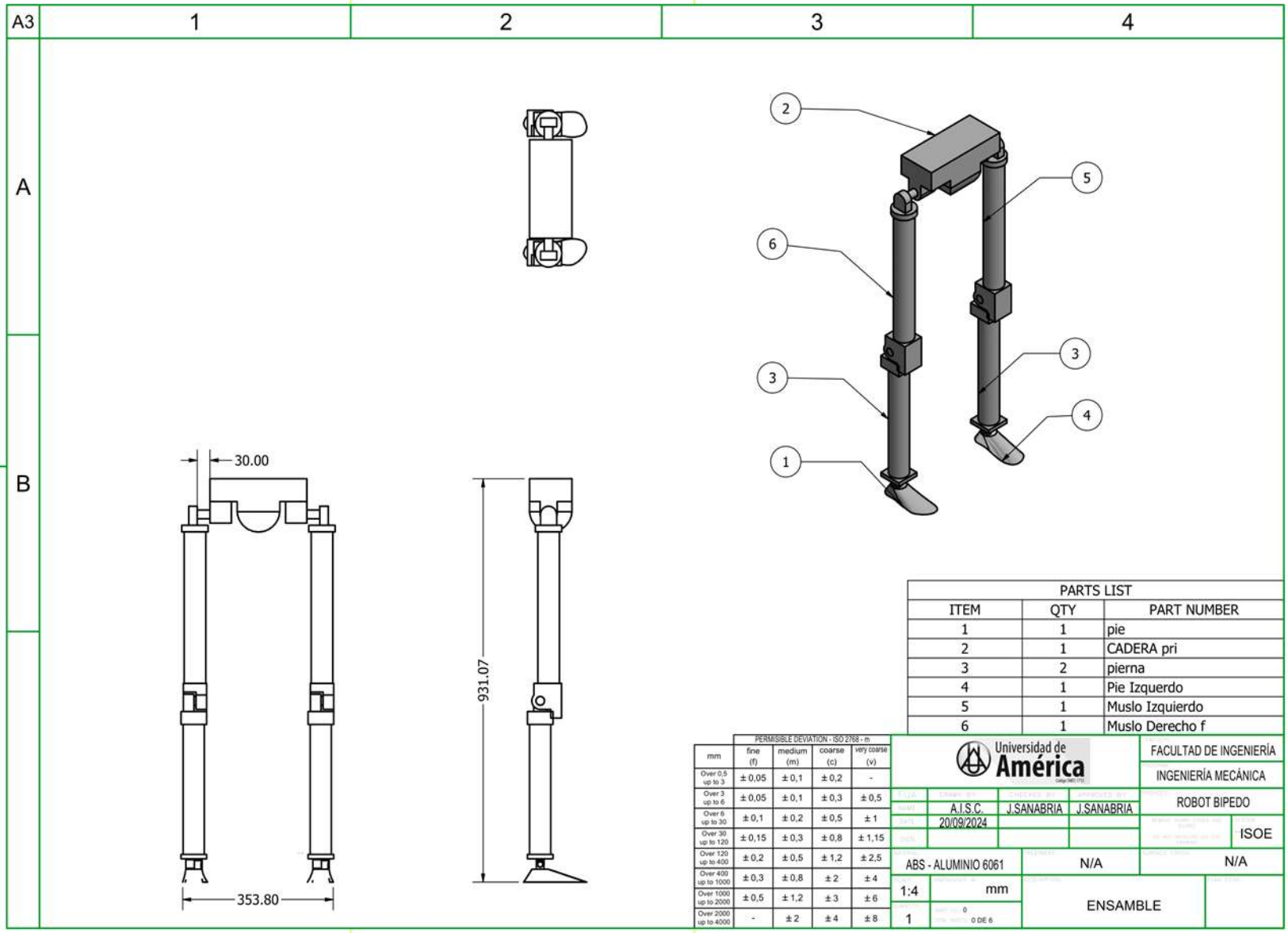
[21] MatWeb, LLC., «MatWeb,» MatWeb, LLC., 01 01 2011. [En línea]. Available: https://www.matweb.com/index.aspx. [Último acceso: 01 08 2024].

ANEXOS

ANEXO 1.

PLANOS DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL ELEMENTO BÍPEDO

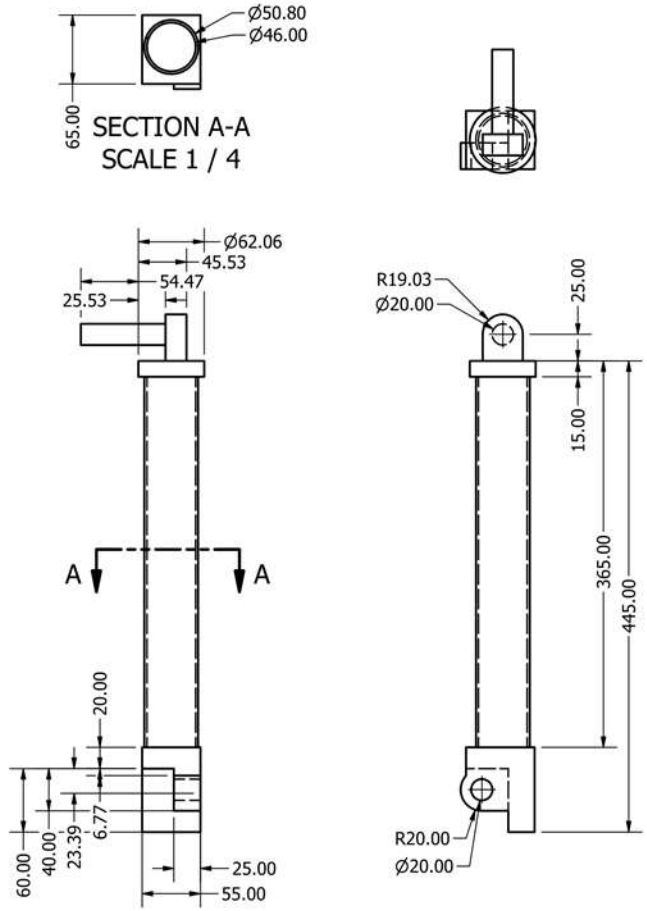




PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	pie
2	1	CADERA pri
3	2	pierna
4	1	Pie Izquerdo
5	1	Muslo Izquierdo
6	1	Muslo Derecho f

PERMISSIBLE DEVIATION - ISO 2768 - m				
mm	fine (f)	medium (m)	coarse (c)	very coarse (v)
Over 0,5 up to 3	± 0,05	± 0,1	± 0,2	-
Over 3 up to 6	± 0,05	± 0,1	± 0,3	± 0,5
Over 6 up to 30	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1
Over 30 up to 120	± 0,15	± 0,3	± 0,8	± 1,15
Over 120 up to 400	± 0,2	± 0,5	± 1,2	± 2,5
Over 400 up to 1000	± 0,3	± 0,8	± 2	± 4
Over 1000 up to 2000	± 0,5	± 1,2	± 3	± 6
Over 2000 up to 4000	-	± 2	± 4	± 8

Universidad de América				FACULTAD DE INGENIERÍA
				INGENIERÍA MECÁNICA
TITLE				ROBOT BIPEDO
DRAWN	A.I.S.C.	J.SANABRIA	J.SANABRIA	
DATE	20/09/2024			ISOE
DATE				
ABS - ALUMINIO 6061		N/A		N/A
1:4	mm	ENSAMBLE		
1	0 DE 6			



mm	PERMISIBLE DEVIATION - ISO 2768 - m			
	fine (f)	medium (m)	coarse (c)	very coarse (v)
Over 0,5 up to 3	± 0,05	± 0,1	± 0,2	-
Over 3 up to 6	± 0,05	± 0,1	± 0,3	± 0,5
Over 6 up to 30	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1
Over 30 up to 120	± 0,15	± 0,3	± 0,8	± 1,15
Over 120 up to 400	± 0,2	± 0,5	± 1,2	± 2,5
Over 400 up to 1000	± 0,3	± 0,8	± 2	± 4
Over 1000 up to 2000	± 0,5	± 1,2	± 3	± 6
Over 2000 up to 4000	-	± 2	± 4	± 8

Universidad de América

FACULTAD DE INGENIERÍA			
INGENIERÍA MECÁNICA			
DRAWN BY	CHECKED BY	APPROVED BY	ROBOT BIPEDO
A.I.S.C.	J.SANABRIA	J.SANABRIA	
20/09/2024			ISOE
ABS - ALUMINIO 6061		N/A	N/A
1:4	mm	MUSLO DERECHO	
1	4 DE 6		

mm	PERMISIBLE DEVIATION - ISO 2768 - m			
	fine (f)	medium (m)	coarse (c)	very coarse (v)
Over 0,5 up to 3	± 0,05	± 0,1	± 0,2	-
Over 3 up to 6	± 0,05	± 0,1	± 0,3	± 0,5
Over 6 up to 30	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1
Over 30 up to 120	± 0,15	± 0,3	± 0,8	± 1,15
Over 120 up to 400	± 0,2	± 0,5	± 1,2	± 2,5
Over 400 up to 1000	± 0,3	± 0,8	± 2	± 4
Over 1000 up to 2000	± 0,5	± 1,2	± 3	± 6
Over 2000 up to 4000	-	± 2	± 4	± 8

Universidad de América

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

ROBOT BIPEDO

DRAWN	A.I.S.C.	J.SANABRIA	J.SANABRIA
DATE	20/09/2024		

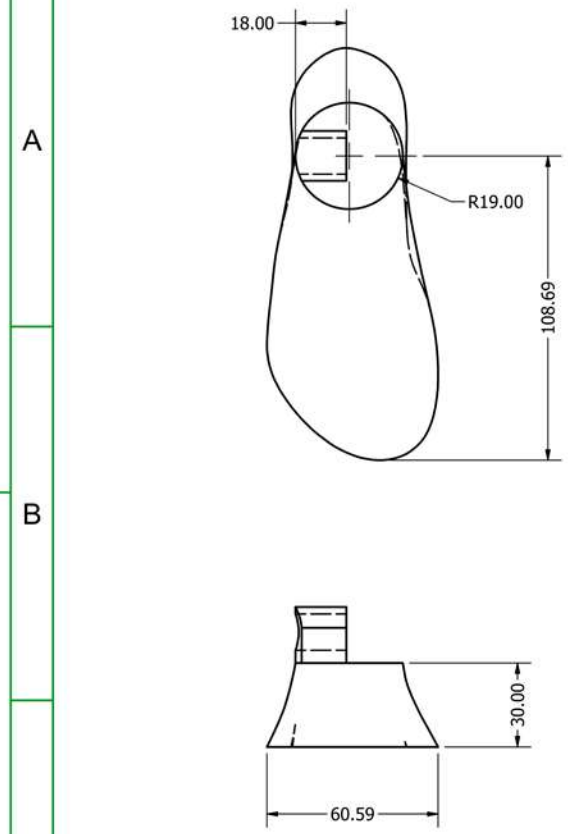
ISOE

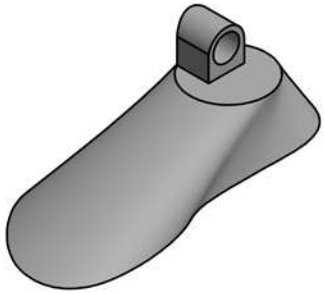
ABS - ALUMINIO 6061 | N/A | N/A

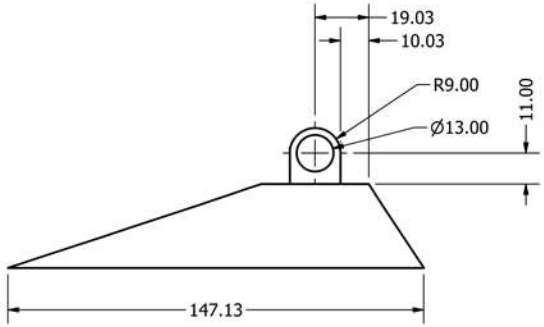
1:4 | mm

MUSLO IZQUIERDO

1 | 5 DE 6







mm	PERMISIBLE DEVIATION - ISO 2768 - m			
	fine (f)	(m)	coarse (c)	very coarse (v)
Over 0,5 up to 3	± 0,05	± 0,1	± 0,2	-
Over 3 up to 6	± 0,05	± 0,1	± 0,3	± 0,5
Over 6 up to 30	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1
Over 30 up to 120	± 0,15	± 0,3	± 0,8	± 1,15
Over 120 up to 400	± 0,2	± 0,5	± 1,2	± 2,5
Over 400 up to 1000	± 0,3	± 0,8	± 2	± 4
Over 1000 up to 2000	± 0,5	± 1,2	± 3	± 6
Over 2000 up to 4000	-	± 2	± 4	± 8

Universidad de América

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

DRAWN BY	A.I.S.C.	J. SANABRIA	J. SANABRIA
DATE	20/09/2024		
SIGN			

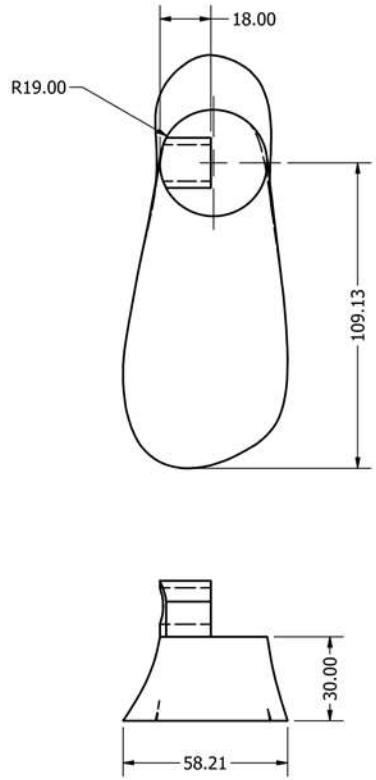
ROBOT BIPEDO

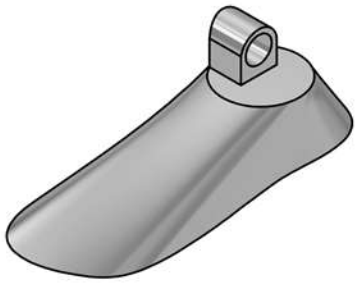
ISOE

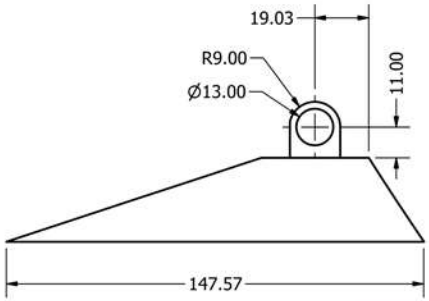
ABS - ALUMINIO 6061 | N/A | N/A

1:1.5 | mm | PIE DERECHO

1 | 1 DE 6







mm	PERMISIBLE DEVIATION - ISO 2768 - m			
	fine (f)	medium (m)	coarse (c)	very coarse (v)
Over 0,5 up to 3	± 0,05	± 0,1	± 0,2	-
Over 3 up to 6	± 0,05	± 0,1	± 0,3	± 0,5
Over 6 up to 30	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 1
Over 30 up to 120	± 0,15	± 0,3	± 0,8	± 1,15
Over 120 up to 400	± 0,2	± 0,5	± 1,2	± 2,5
Over 400 up to 1000	± 0,3	± 0,8	± 2	± 4
Over 1000 up to 2000	± 0,5	± 1,2	± 3	± 6
Over 2000 up to 4000	-	± 2	± 4	± 8

Universidad de América

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

NAME	A.I.S.C.	J. SANABRIA	J. SANABRIA
DATE	20/09/2024		
SIGN.			

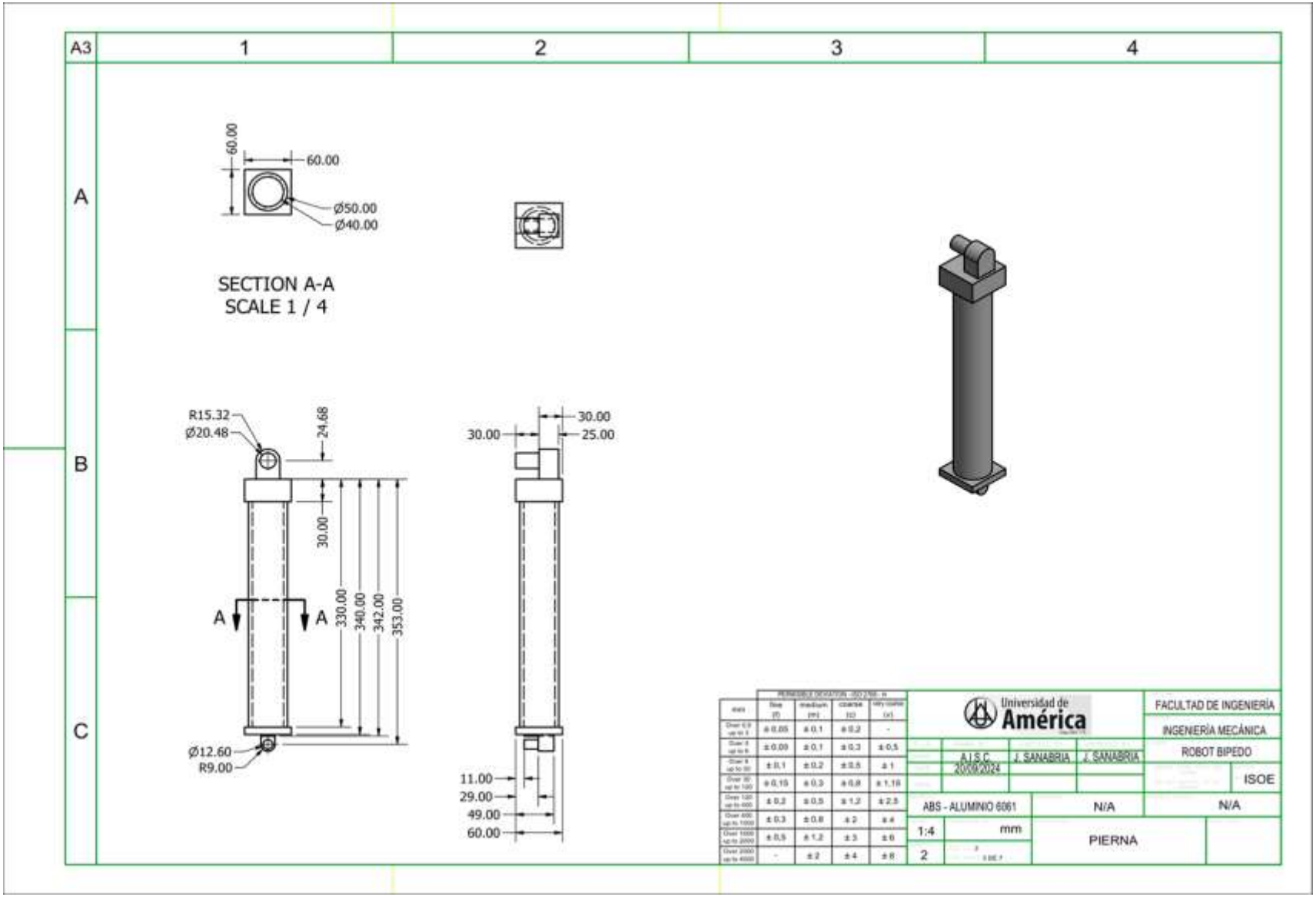
ROBOT BIPEDO

ISOE

ABS - ALUMINIO 6061 | N/A | N/A

1:1.5 | mm | PIE IZQUIERDO

1 | 2 | 2 DE 7


A3
1
2
3
4
A
B
C
60.00
60.00
Ø50.00
Ø40.00
SECTION A-A
SCALE 1 / 4
R15.32
Ø20.48
24.68
30.00
330.00
340.00
342.00
353.00
A
A
Ø12.60
R9.00
30.00
30.00
25.00
11.00
29.00
49.00
60.00
Universidad de América
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
ROBOT BIPEDO
A.I.S.C.
J. SANABRIA
J. SANABRIA
ISOE
ABS - ALUMINIO 6061
N/A
N/A
1:4
mm
PIERNA
2

ANEXO 2.

BLOQUE FIRE SOLID DE PIERNA

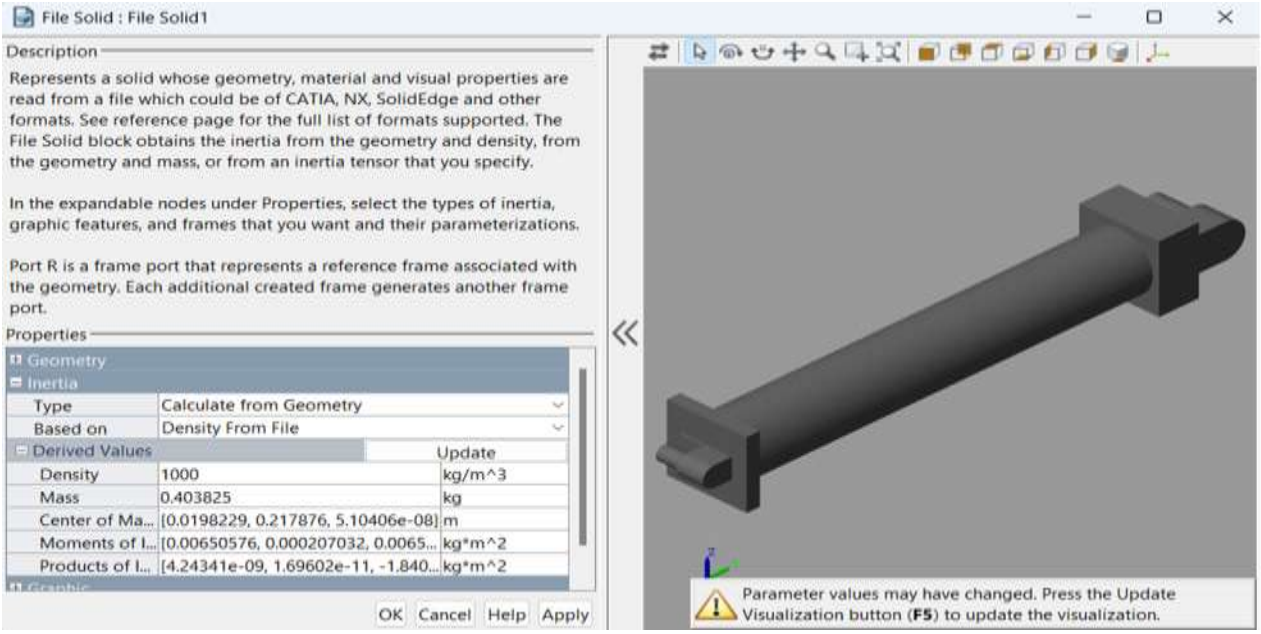
En el Matlab simulink multibody en el icono llamada “file solid” se realizó las siguientes modificaciones:

-Primero: Se confirmó el nombre del archivo del solido como demuestra en la siguiente imagen en el recuadro rojo se ubicó el archivo en la carpeta donde estaba guardado y se le dio aceptar con eso terminamos el apartado de geometry

-Segundo: Se dirigió al apartado de inertia ya que en el espacio de “Export” no se realiza ninguna modificación; en inertia en el apartado de “Type” se selecciona “Calculare from Geometry” y en “Based on” se selecciona “Density from File” con el fin que a la hora de simular no nos arroje un error correspondiente a la densidad del solido en la Figura observa como quedo configurado tanto “Export”, “Inertia” como “Graphic”:

Figura 54

Configuración de bloque file solid Pierna

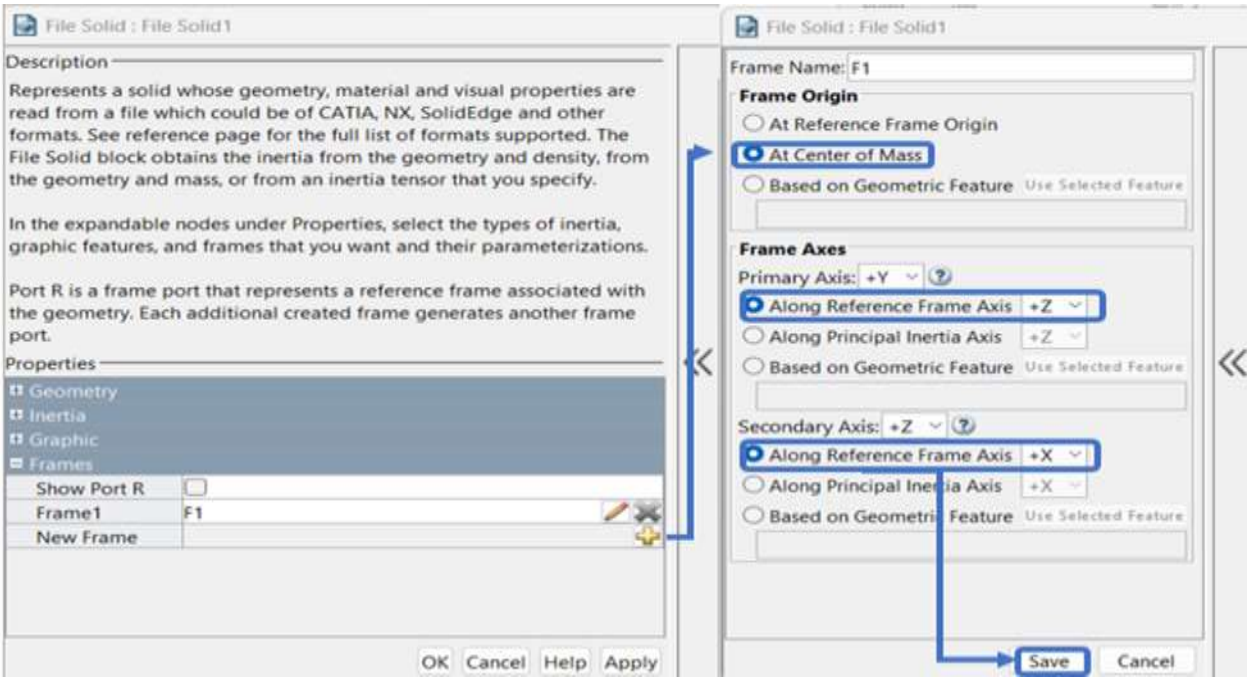


Nota. En la figura 54 se representa el cambio inertia para la pierna

Tercero: Se realiza un nuevo centro de pieza el cual modificamos el “Frames” lo primero que se hizo fue desactivar el origen de centro de coordenadas por defecto que trae el archivo, posteriormente, se seleccionó el origen de ejes coordenadas teniendo en cuenta el centro de masa de elemento y seleccionado los ejes axiales, para nuestro caso se seleccionó como se muestra en la siguiente imagen

Figura 55

Configuración de la pierna block file solid frame de la pierna



Nota. La figura 55 representa el file solid de la pierna para el frame.

para que quede guardados los cambios realizados al block file solid se debe dar click al icono “Apply” al finalizar su configuración de lo contrario no se guardara ningún cambio realizado al block

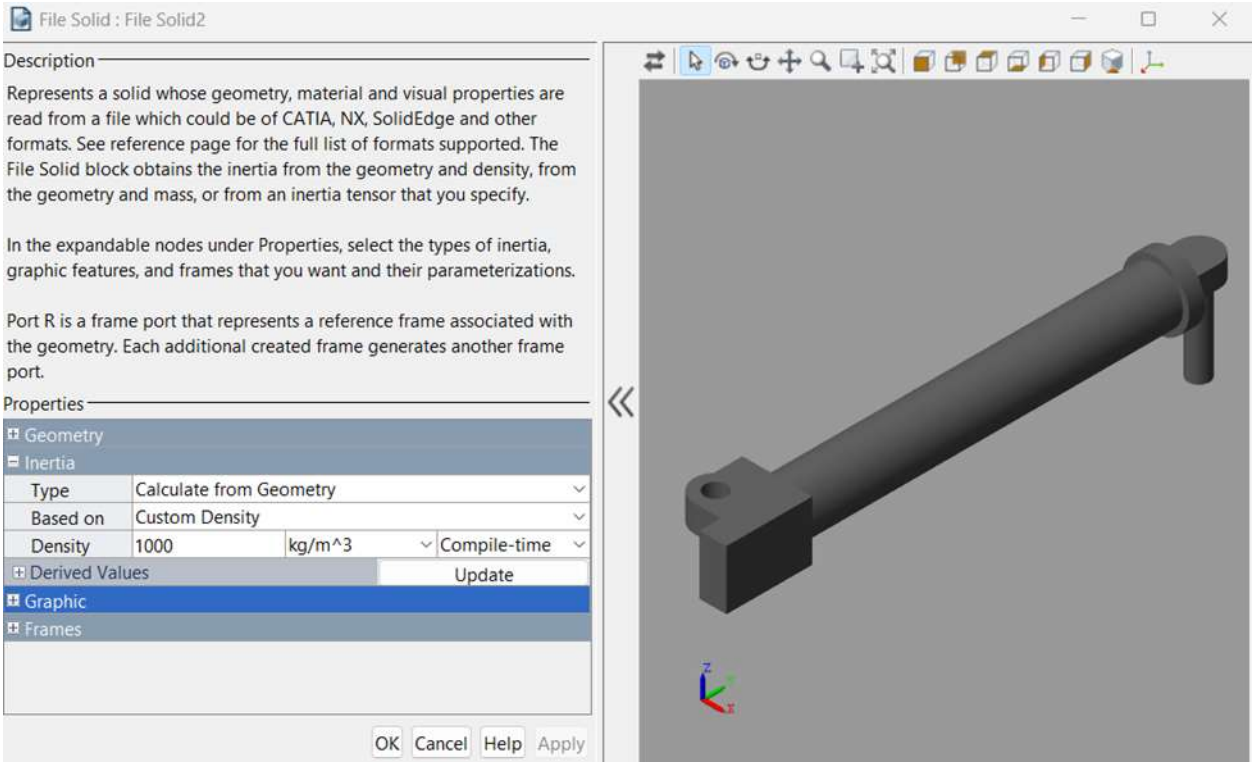
BLOQUE FIRE SOLID DE MUSLO DERECHO

Segundo: Se dirigió al apartado de inertia ya que en el espacio de “Export” no se realiza ninguna modificación; en inertia en el apartado de “Type” se selecciona “Calculare from Geometry” y en “Based on” se selecciona “Density from File” con el fin que a la hora de simular no nos arroje un

error correspondiente a la densidad del solido en la Figura observa como quedo configurado tanto “Export”, “Inertia” como “Graphic”:

Figura 56

Configuración de File Solid MUSLO Izquierdo

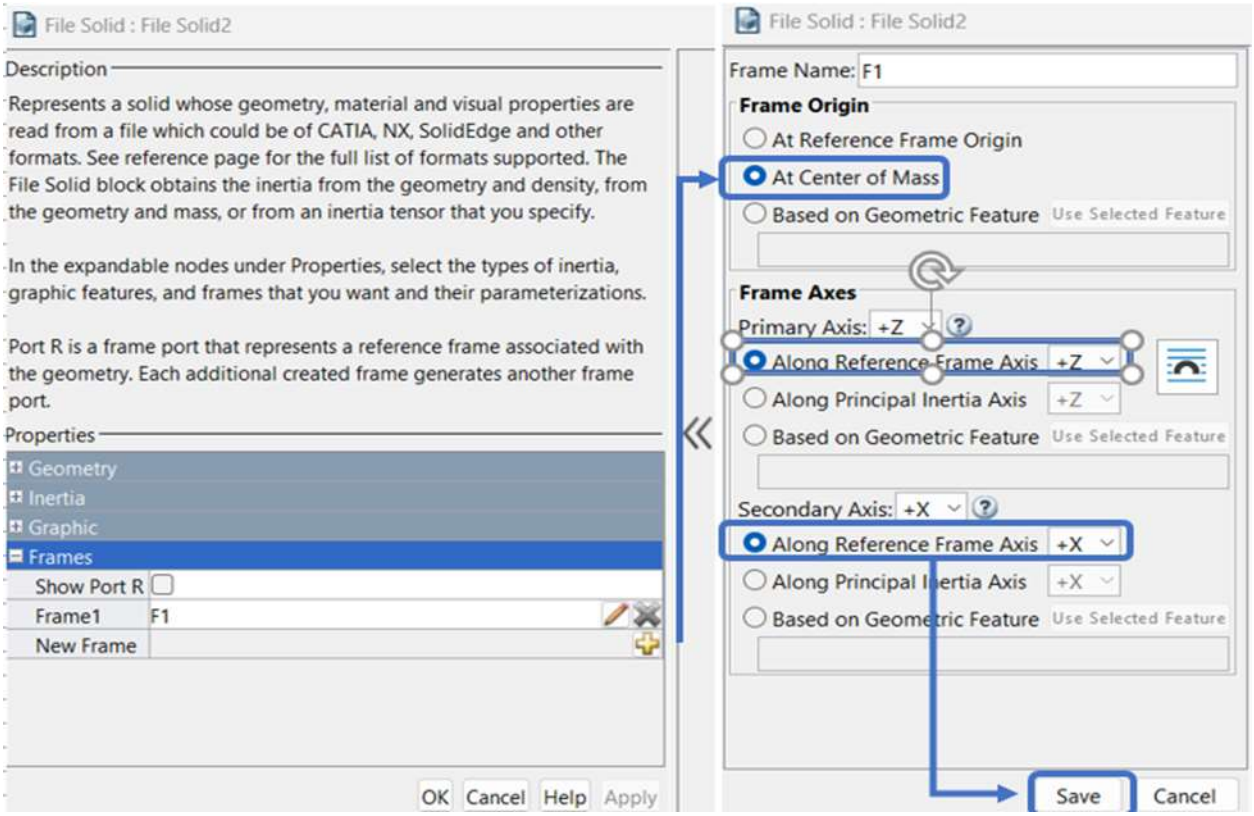


Nota. La figura 56 representa el cambio de en el bloque fire en el apartado de inertia

Tercero: Se realiza un nuevo centro de pieza el cual modificamos el “Frames” lo primero que se hizo fue desactivar el origen de centro de coordenadas por defecto que trae el archivo, posteriormente, se seleccionó el origen de ejes coordenadas teniendo en cuenta el centro de masa de elemento y seleccionado los ejes axiales, para nuestro caso se seleccionó como se muestra en la siguiente imagen

Figura 57

Configuración Configuración de File Solid MUSLO Izquierdo



Nota. La figura 57 representa el cambio de en el bloque Fire solid en el icono frames.

para que quede guardados los cambios realizados al block file solid se debe dar click al icono “Apply” al finalizar su configuración de lo contrario no se guardara ningún cambio realizado al block

BLOQUE FIRE SOLID CADERA

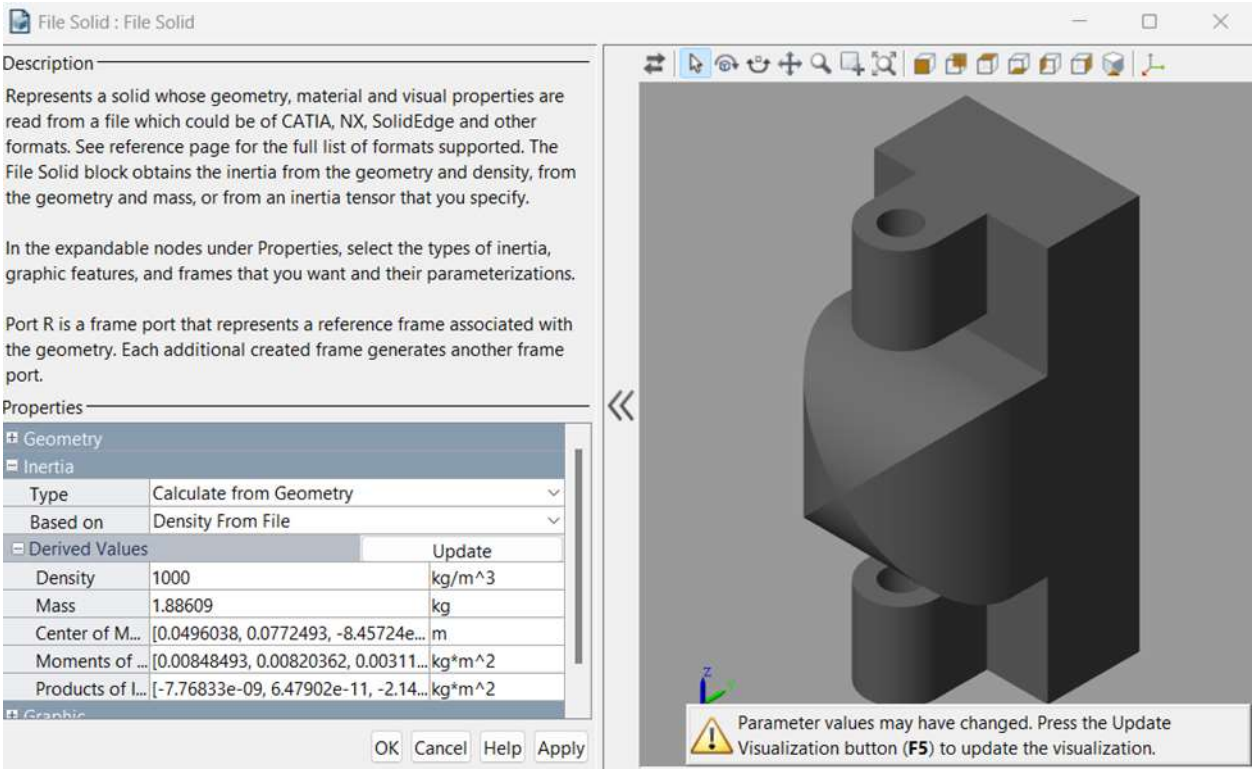
Primero: Se confirmó el nombre del archivo del solido como demuestra en la siguiente imagen en el recuadro rojo se ubicó el archivo en la carpeta donde estaba guardado y se le dio aceptar con eso terminamos el apartado de geometry

Segundo: Se dirigió al apartado de inertia ya que en el espacio de “Export” no se realiza ninguna modificación; en inertia en el apartado de “Type” se selecciona “Calculare from Geometry” y en “Based on” se selecciona “Density from File” con el fin que a la hora de simular no nos arroje un

error correspondiente a la densidad del solido en la Figura observa como quedo configurado tanto “Export”, “Inertia” como “Graphic”:

Figura 58

Configuración de File solid Cadera

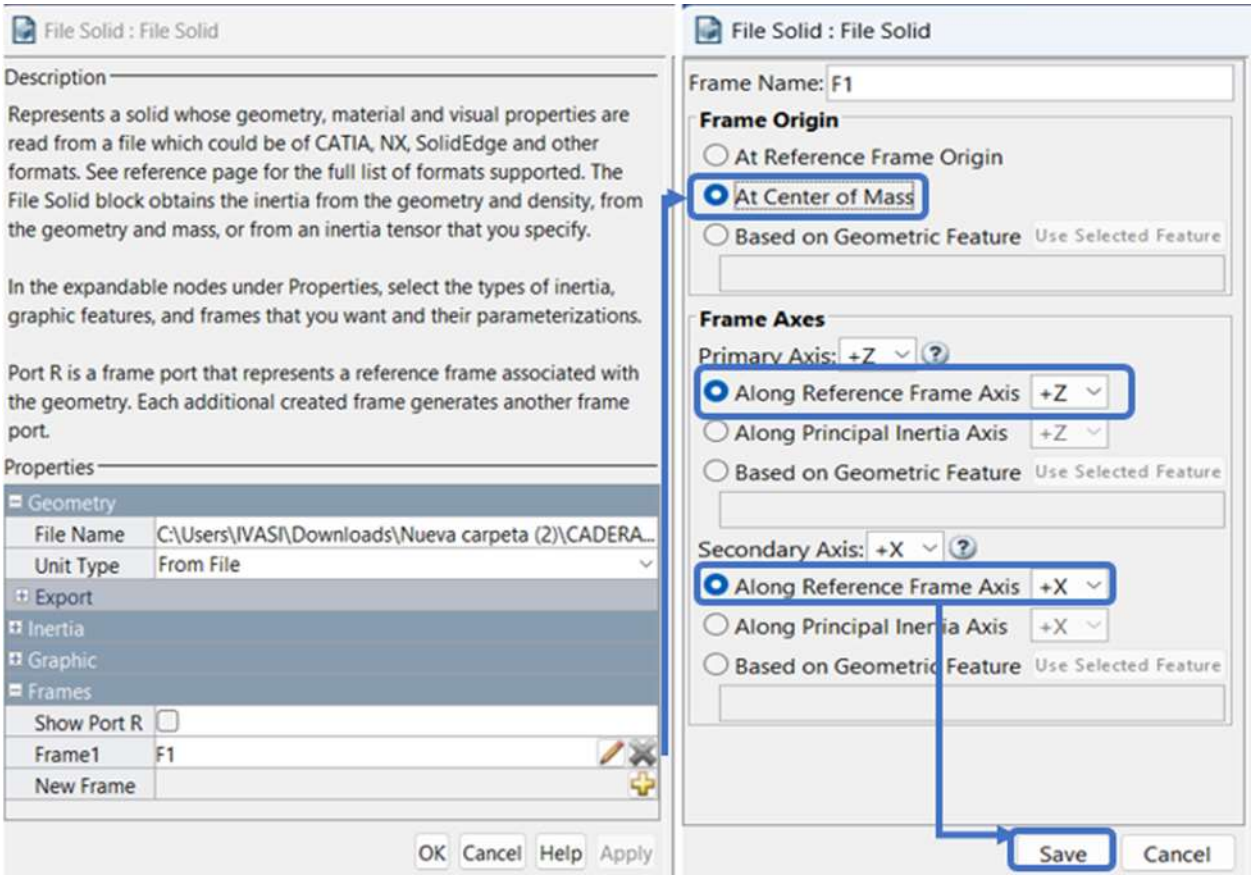


Nota. La figura 58 representa la configuración del fire solid en el apartado de inertia.

Tercero: Se realiza un nuevo centro de pieza el cual modificamos el “Frames” lo primero que se hizo fue desactivar el origen de centro de coordenadas por defecto que trae el archivo, posteriormente, se seleccionó el origen de ejes coordenadas teniendo en cuenta el centro de masa de elemento y seleccionado los ejes axiales, para nuestro caso se seleccionó como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 59

Configuración de file solid frarme de la cadera



Nota. La figura 59 muestra la configuración del file solid para el icono frames en la cadera.

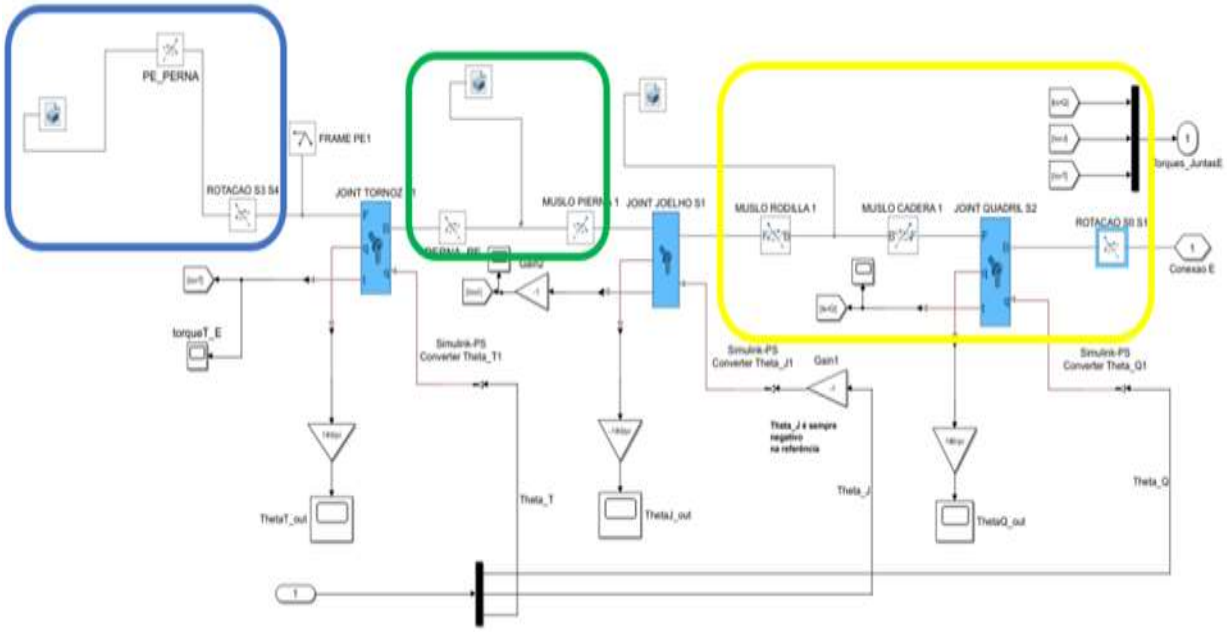
para que quede guardados los cambios realizados al block file solid se debe dar click al icono “Apply” al finalizar su configuración de lo contrario no se guardara ningún cambio realizado al block

ANEXO 3.

CAMBIO DE POSICIÓN DE LOS SOLIDOS PARA LA PIERNA IZQUIERDA

Figura 60

Configuración de transformada rígida Pierna Izquierdo



Nota. Los recuadros que están agrupados en la figura 60 representa cada grupo de Transformación rígida, el color azul representa el pie, el color verde presenta la pierna, finalmente el color amarillo que representa la unión del muslo, las transformadas rígida mantiene una relación espacial fija entre dos marcos durante la simulación.

La relación espacial puede incluir una traslación y una rotación, en el caso del modelo este block es el encargado relacionar las uniones de nuestros sólidos en la simulación, es decir, visualmente se carga de tener las piezas espacialmente unidas una a las otras en el tiempo de la simulación.

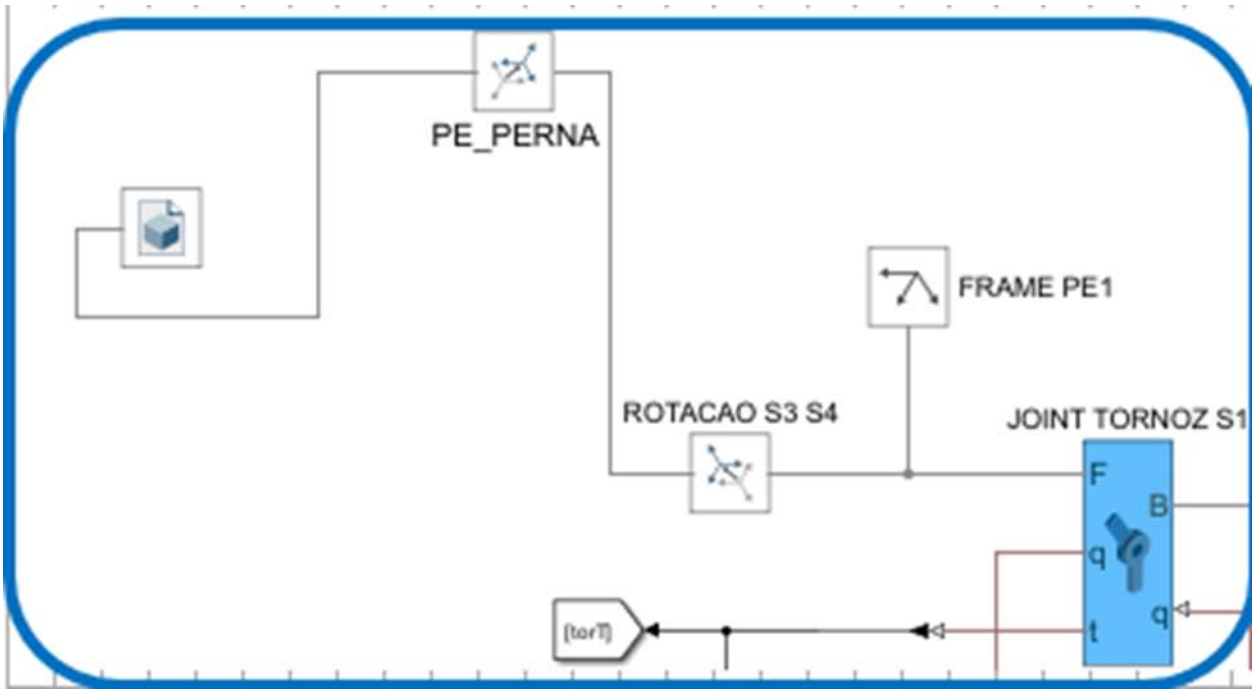
Este bloque cumple un papel importante para poder tener una simulación más precisa, ya que, con el bloque configuramos la posición del movimiento, la posición de la pieza, la cual se modifica según el modelo geométrico usado para la simulación, este icono tiene en cuenta los parámetros geométricos configurados anteriormente y como este solido debe está relacionado con el movimiento de marcha humana en el plano sagital.

Ahora se mostrarla como se configuro cada bloque para el conjunto de la pierna derecha:

SOLIDO PIE.

Figura 61

Configuración de transformada rígida Pie Izquierdo

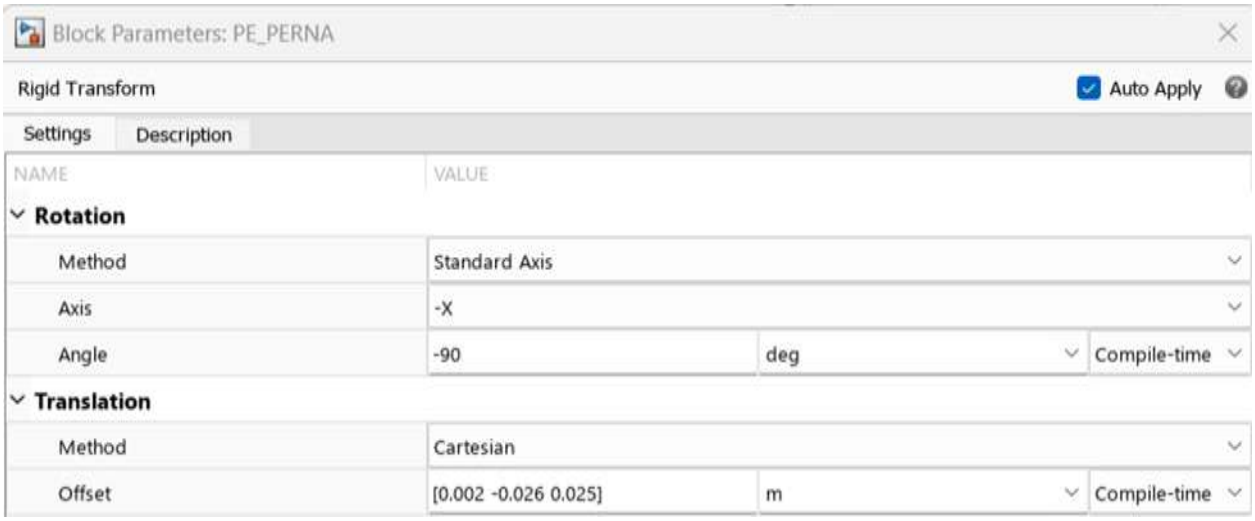


Nota. El la Figura 61 se muestra dos transformadas rígidas

La primera llamada “PE_PERNA” que hace referencia a la posición de la unión entre el pie y la pierna en este caso se mueve espacialmente el pie, por otro lado, tenemos la ROTACION S3 S4 que hace referencia el movimiento que hay en la parte del pie para el proyecto se modificó respectivamente para satisfacer la unión del diseño se configuraron “PE_PERNA” y “ROTACION S3 S4” como se muestra en la siguiente figura 62 y figura 63 respectivamente:

Figura 62

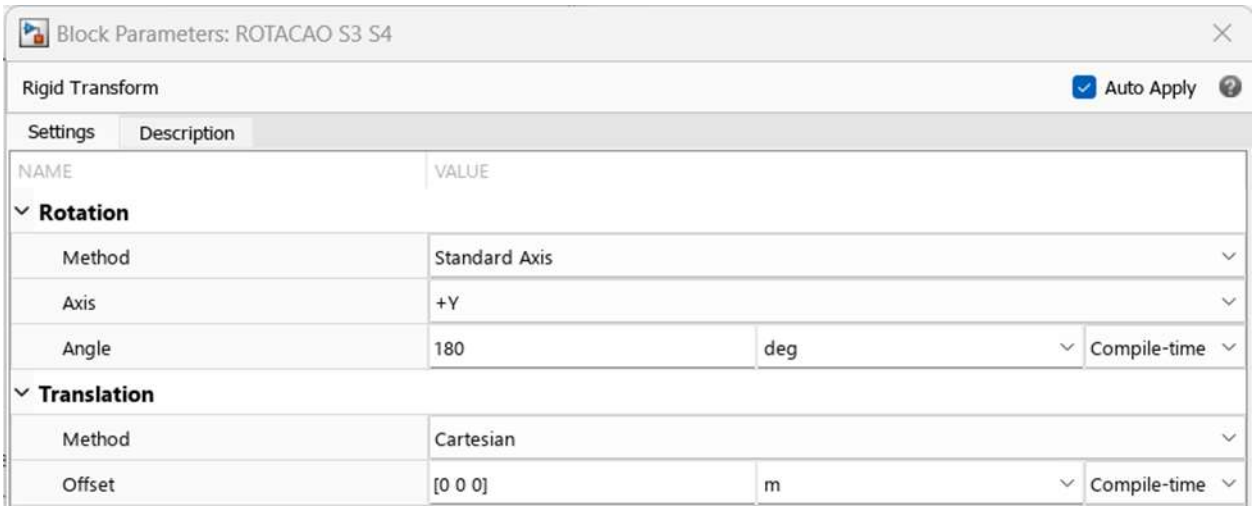
Configuración de transformada rígida PE_PERNA



Nota. La Figura 62 Configuración de transformada rígida PE_PERNA

Figura 63

Configuración de transformada rígida ROTACION S3 S4

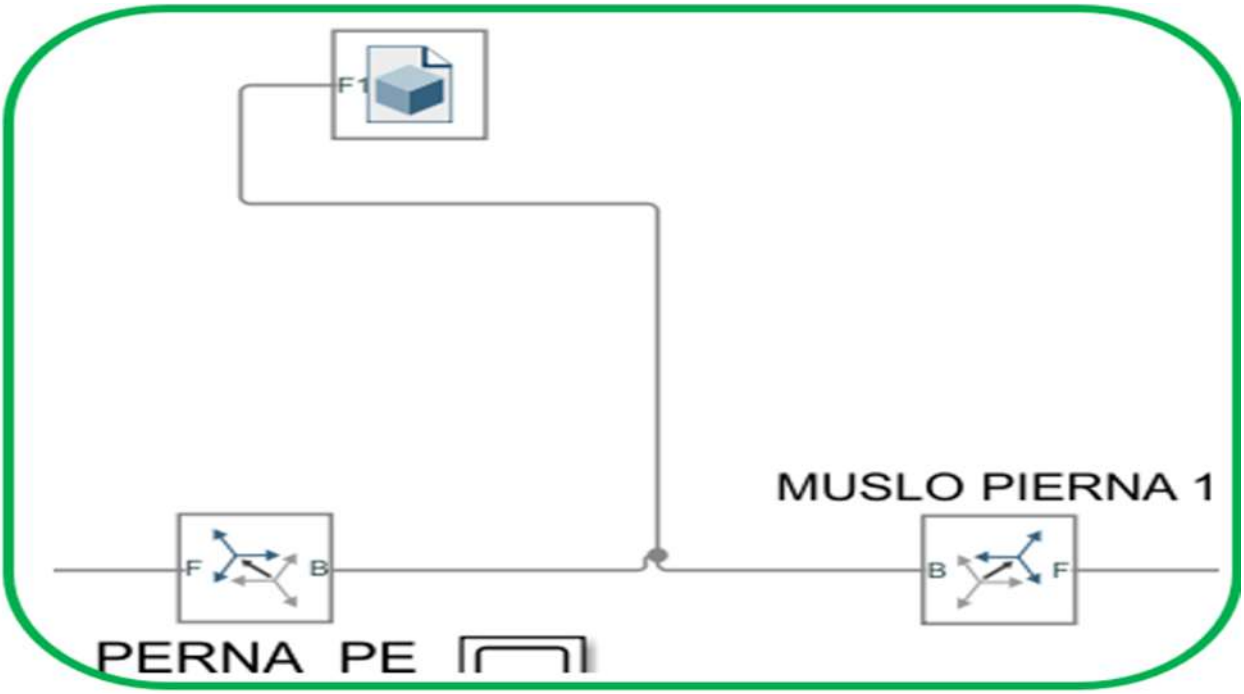


Nota. La figura 63 representa la configuración de transformada rígida ROTACION S3 S4

SOLIDO PIERNA IZQUIERDA

Figura 64

Configuración de transformada rígida pierna Izquierdo

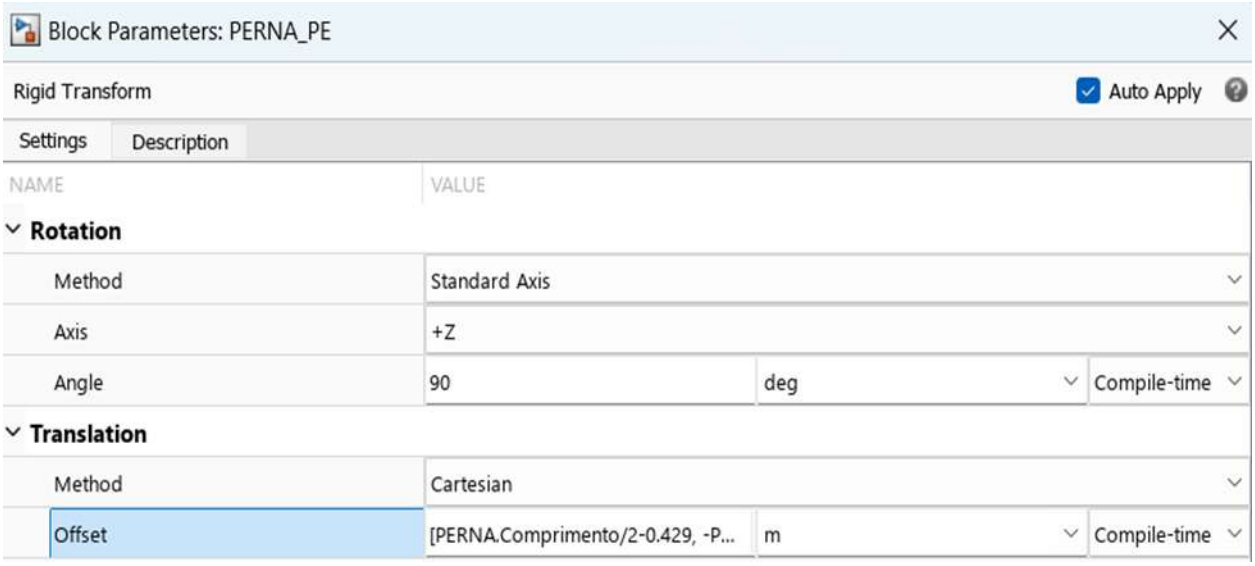


Nota. En la Figura 64 se representan dos bloques de transformaciones rígidas para el sólido PERNA.

la primera transformada rígida que es llamada “PERNA_PE” que hace referencia a la unió de pie con pierna tomando como referencia el sólido de la pierna, por otro lado, se tienen a la transformada rígida llamada MUSLO PIERNA que hacer referencia a la unión entre en la pierna con el muslo teniendo referencia el sólido de la pierna en la figura 65 y figura 66 se representan como se ubican tanto la translación como la rotación que tiene el sólido PIERNA que cumple el diseño propuesto.

Figura 65

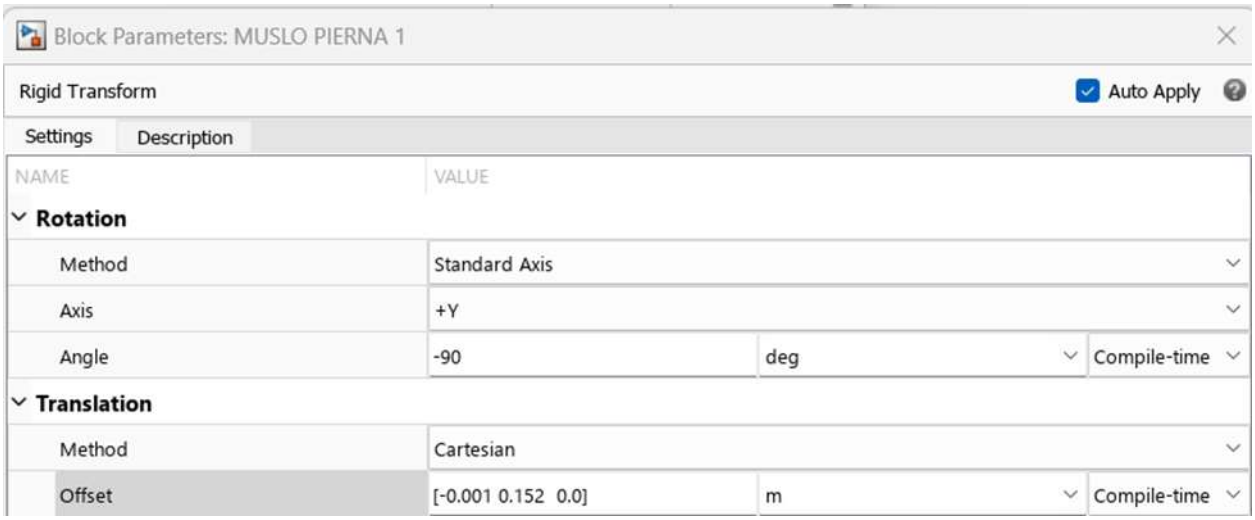
Configuración de transformada rígida PERNA_PE



Nota. la Figura 65 Configuración de transformada rígida “PERNA_PE”.

Figura 66

Configuración de transformada rígida MUSLO PIERNA Izquierdo

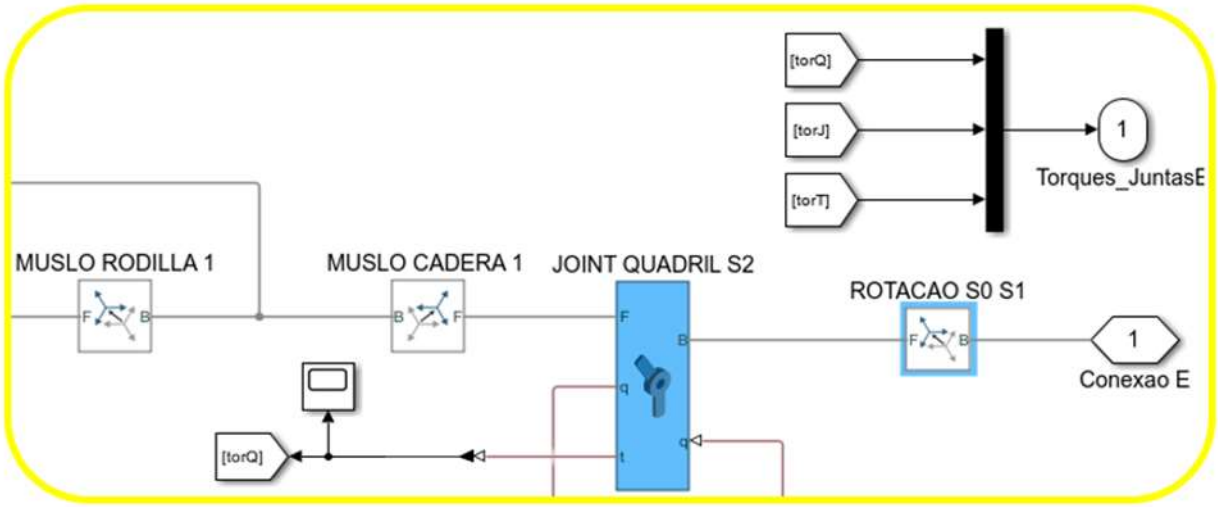


Nota. Figura 66 Configuración de transformada rígida “MUSLO PIERNA 1”

SOLIDO MUSLO IZQUIERDO

Figura 67

Configuración de transformada rígida MUSLO Izquierdo

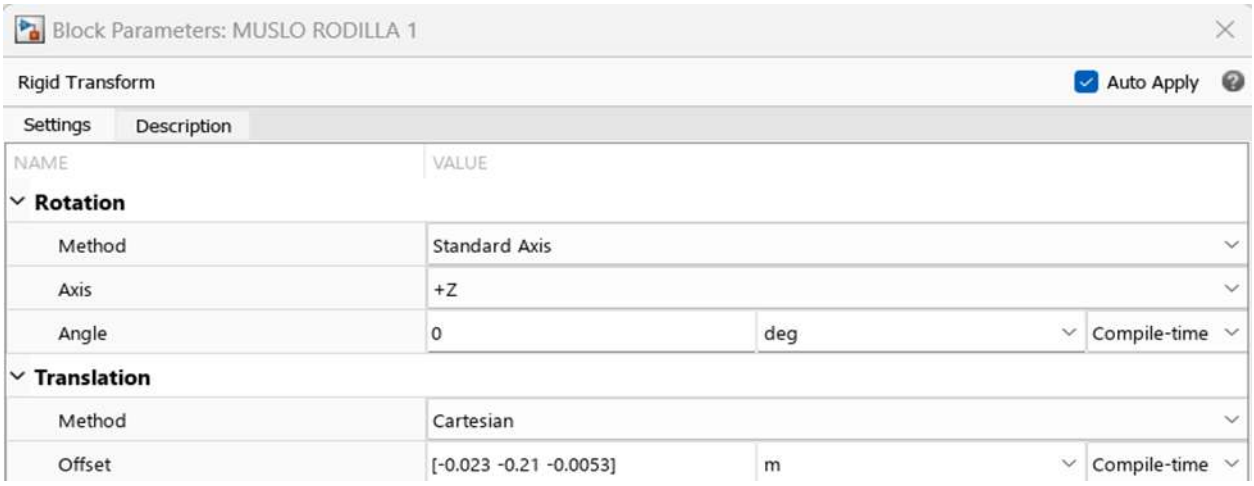


Nota. En la Figura 67 se representan tres bloques de transformación rígida llamados "MUSLO RODILLA" que hace referencia a la unió de la pierna con el muslo tomando como referencia el sólido del muslo.

Se tienen a la transformada rígida llamada "MUSLO CADERA" que hacer referencia a la unión entre en la muslo con el cadera, por último la transformada rígida llamada "ROTACION S0 S1" la cual hace referencia al rotación que hay entre la unión en la cadera y el muslo , en las siguientes figuras 68, figura 69, figura 70 se representa como se ubicó tanto la translación como la rotación que tiene el sólido MUSLO, que cumple el diseño propuesto, se configuraron la rotación y la traslación de la siguiente manera:

Figura 68

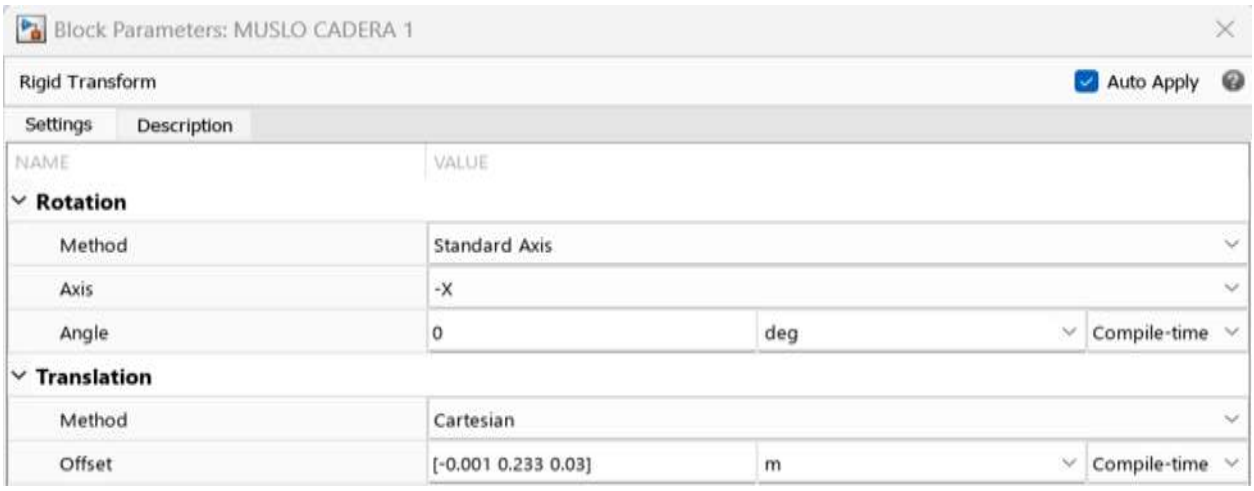
Configuración de transformada rígida MUSLO RODILLA Izquierda



Nota. La Figura 68 representa la Configuración de transformada rígida "MUSLO CADERA"

Figura 69

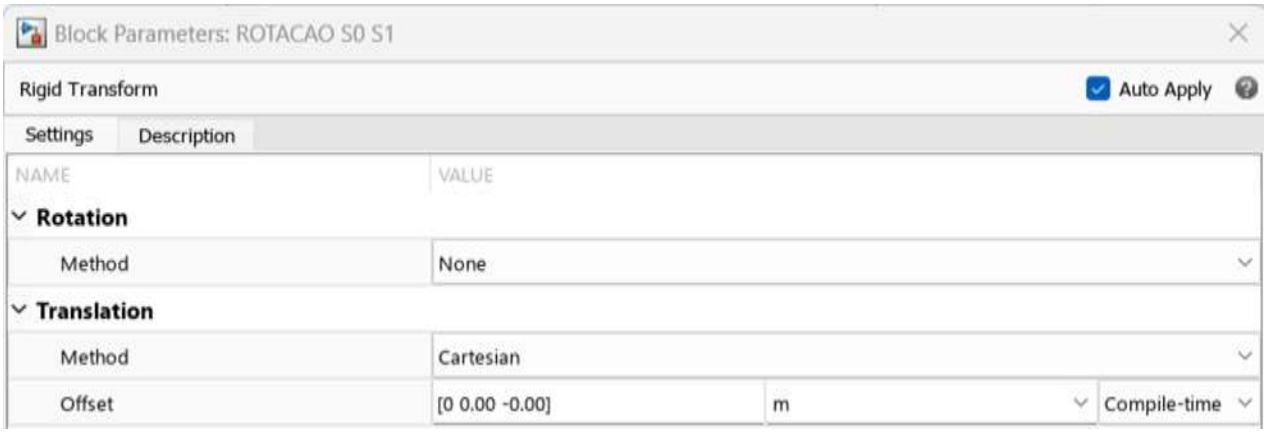
Configuración de transformada rígida MUSLO CADERA Izquierda



Nota. La Figura 69 representa la Configuración de transformada rígida "MUSLO CADERA"

Figura 70

Configuración de transformada rígida ROTACION S0 S1 Izquierda



Nota. La Figura 70 representa la Configuración de transformada rígida “ROTACION S0 S1”