

**UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA**

**Escuela de Ingenierías**

**Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica**



**Desarrollo de una plataforma de evaluación para robots humanoides**

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el  
estudiante:

**Diego de Jesús Gutiérrez Reyes**

**165096**

**Ingeniería Mecatrónica**

**Dr. José Luis Vázquez González**

San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2024

**Jurado:**

- Dr. Jorge Rodríguez Asomoza.
- Dr. César Martínez Torres.
- Dr. José Luis Vázquez González.

**Dedicatoria:**

A Dios, por darme la salud, motivación e inspiración en cada paso de mi vida.

A mis padres Marcelino y Catalina, que me forjaron como la persona que soy en la actualidad, por todos los esfuerzos que hicieron para que luche y persiga mis sueños, aun cuando eso supuso alejarme de ellos, todo lo que he logrado se los debo a ustedes.

A mi hermano Pablo, quien me ha apoyado en todo lo que necesito, que se ha preocupado por mí siempre, y que veo como mi modelo a seguir. A mi cuñada Nancy, que solo ha procurado mi bienestar y ha representado una hermana mayor para mí

Al Dr. José Luis Vázquez González, por guiarme y darme herramienta para mi desarrollo académico.

**Agradecimientos:**

Primeramente, agradezco a mis padres, mi hermano y cuñada, que, en conjunto, siempre me han brindado su apoyo para luchar y cumplir cada uno de mis sueños y objetivos, me han dado el cariño que me impulsa a seguir adelante y luchar contra las adversidades, gracias por su amor, comprensión y apoyo en mis estudios.

Agradezco a cada profesor, por darme el conocimiento y las herramientas necesarias para mi desarrollo académico y profesional, cada uno ha contribuido de una manera única.

Gracias a mis amigos, David, Caro, Daniela, Yurema, Madai, Mario, Aldo, Fabian, Yuliana, Hiram, Juanra, Gabriel y muchos otros, con quienes he compartido multitud de experiencias, historias y momentos que llevaré en el corazón, a su lado la vida ha sido mucho más alegre y emocionante, sin ustedes estos años no hubieran sido lo mismo.

A mi comunidad de Twitch, Tomnyan, Deanelll, Nery, Tumau y demás miembros, quienes han representado un apoyo y convivencia única en los últimos años, permitiéndome compartir aprendizajes y consejos.

A Duki y Paulo Londra, que su música ha representado un pilar fundamental desde que la descubrí, inspirándome a seguir luchando por mis sueños y que ha hecho de momentos difíciles más amenos, y los momentos felices los han hecho inolvidables.

# Índice

## Contenido

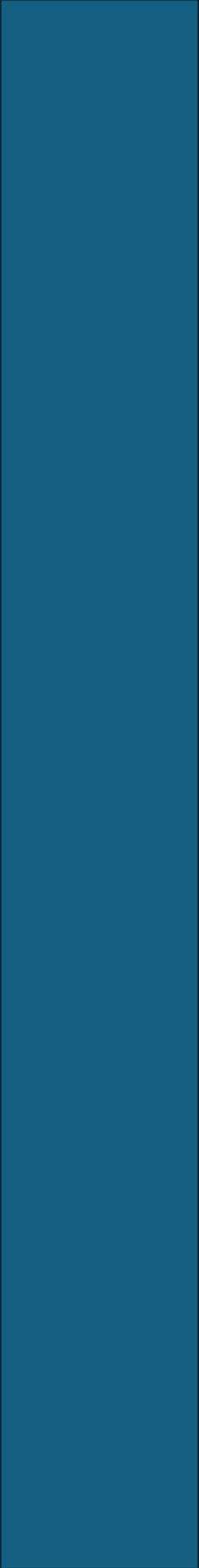
<b>Abstract:</b> .....	5
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	7
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	7
1.1.1: <i>Las revoluciones industriales y su aporte al avance tecnológico de la humanidad</i> .....	7
1.1.2: <i>Historia de la Robótica</i> .....	8
1.1.3: <i>Clasificación de los robots: sus generaciones, funciones y modelos.</i> .....	10
1.1.4: <i>Los robots humanoides y su evolución</i> .....	13
1.1.5: <i>Los robots humanoides y su empleo en el ámbito académico</i> .....	14
<b>1.2. Justificación.</b> .....	16
<b>1.3. Hipótesis.</b> .....	16
<b>1.4. Objetivos.</b> .....	17
<b>Capítulo 2. Marco Teórico</b> .....	18
<b>2.1: El robot Bioloid y Roboplus.</b> .....	19
<b>2.2. Funcionamiento de SolidWorks.</b> .....	23
<b>2.3. Funcionamiento de Matlab y Simulink.</b> .....	27
<b>2.4. Plugin de conexión entre SolidWorks y Simulink.</b> .....	34
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	36
<b>3.1. Generación del modelo CAD del Bioloid</b> .....	37
<b>3.2. Vinculación a Simulink</b> .....	39
<b>3.3. Uso de Simulink para el análisis y simulación del sistema.</b> .....	40
3.3.1: <i>Diagrama de bloques de los brazos.</i> .....	41
3.3.2: <i>Diagrama de bloques de las piernas.</i> .....	42
3.3.3: <i>Proceso de simulación</i> .....	43
<b>Capítulo 4. Creación de Movimientos.</b> .....	49
<b>4.1. Generación de movimientos simples</b> .....	49
4.1.1: <i>Levantamiento brazo derecho.</i> .....	49
4.1.2: <i>Golpe</i> .....	49
4.1.3: <i>Guardia.</i> .....	50
4.1.4 <i>Pose de Victoria</i> .....	50
4.1.5: <i>Equilibrio de pies</i> .....	51

4.1.6: <i>Pararse en un pie</i> .....	51
<b>4.2. Generación de movimientos avanzados</b> .....	52
4.2.1: <i>Desplante lateral</i> .....	52
4.2.2: <i>Posición de la Grulla</i> .....	52
4.2.3: <i>Ballet</i> .....	53
4.2.4: <i>Guardia y patada</i> .....	54
4.2.5: <i>Inicio de flexión</i> .....	55
<b>Capítulo 5. Resultados</b> .....	57
<b>5.1. Librería de movimientos simples</b> .....	57
5.1.1: <i>Levantamiento brazo derecho</i> .....	57
5.1.2: <i>Golpe</i> .....	58
5.1.3: <i>Guardia</i> .....	59
5.1.4 <i>Pose de Victoria</i> .....	60
5.1.5: <i>Equilibrio de pies</i> .....	61
5.1.6: <i>Pararse en un pie</i> .....	62
<b>5.2. Librería de movimientos avanzados</b> .....	63
5.2.1: <i>Desplante lateral</i> .....	63
5.2.2: <i>Posición de la “Grulla”</i> .....	64
5.2.3: <i>Ballet</i> .....	65
5.2.4: <i>Guardia y patada</i> .....	66
5.2.5: <i>Inicio de flexión</i> .....	67
<b>5.3. Comparación de movimientos entre el robot virtual y el robot físico</b> .....	68
<b>Capítulo 6. Conclusiones</b> .....	70
<b>6.1. Recomendaciones</b> .....	71
<b>Capítulo 7. Bibliografía</b> .....	72
<b>Anexos</b> .....	77
Anexo A. Tabla de las piezas del robot Bioloid simuladas en SolidWorks. ....	77
Anexo B. Vista isométrica del modelo CAD. ....	82
Anexo C. Enlace a la carpeta con todos los movimientos. ....	83

## **Abstract:**

Los robots humanoides han evolucionado de forma exponencial en los últimos años, sin embargo, el acceso a estos no es tan sencillo, por lo que la simulación de estos se ha convertido en un paso importante en el estudio y desarrollo de sistemas robóticos. El fin de esta tesis es modelar y controlar el robot Bioloid GP mediante el empleo de los softwares SolidWorks y Matlab respectivamente, enfocándose construir un gemelo digital mediante un modelado en Simscape, el cual representa las partes más importantes del robot y emula los movimientos que el robot físico puede realizar.

Los resultados demuestran la eficacia de las técnicas de simulado en los sistemas robóticos, permitiendo que más usuarios puedan tener acceso a esta de una forma sencilla, gratuita y aplicada.



# CAPÍTULO I

# Introducción

- 1.1 Antecedentes.
- 1.2 Justificación.
- 1.3 Hipótesis.
- 1.4 Objetivos.

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

#### *1.1.1: Las revoluciones industriales y su aporte al avance tecnológico de la humanidad.*

A medida que la humanidad se desarrolla cada vez más, surgen nuevos problemas que le afligen, al tiempo en que los ya existentes crecen, ante esto, la ingeniería también se desarrolla, buscando dar solución a los problemas con los que nos enfrentamos en la actualidad, tales como el cambio climático, la crisis energética o la escasez de agua, estas soluciones se presentan al desarrollar proyectos que ataquen directamente a la problemática, como lo son la disminución de las emisiones de dióxido de carbono, el uso y mejora de las energías renovables (fotovoltaica, eólica, mareomotriz, entre otras), o la implementación de sistemas de recolección y filtración de agua respectivamente.

Así mismo, la ingeniería busca el desarrollo y mejoramiento de los procesos que la humanidad ha creado, con la finalidad de que sean más sencillos, seguros y eficientes, esto puede verse de manera clara en las cuatro revoluciones industriales que han sucedido en los últimos 200 años, y que han permitido un avance tecnológico sin precedentes.

Durante la primera revolución industrial se ubica entre 1740 y 1850, se obtuvo el primer gran progreso industrial, al entrar en juego mecanismos como las máquinas de vapor y la mecánica en diversas industrias, destacando la textil.

La segunda revolución se ubica entre los años de 1870 y 1914, es en este periodo que entran en juego las producciones en cadena, gracias al desarrollo de la energía eléctrica, además, en este período la ciencia y la tecnología se involucraron de una manera más directa, lo que llevó a la creación y obtención de diferentes recursos naturales, como el petróleo, que permitió el inicio de la industria automotriz.

La tercera revolución, ubicada en la década de los 70's hasta los años 2000, se sustenta en 3 pilares fundamentales, el aprovechamiento de las energías renovables, la transición a maquinarias programables y la aparición de la electrónica, en búsqueda de mejores líneas de producción capaces de cumplir con las demandas de ese momento, se impulsó el mejoramiento del software y hardware, esto permitió la creación del diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), la aparición del internet, la generación de maquinaria programable que sustituya la mano de obra en procesos de alto riesgo y la disminución de los tamaños en los procesos y productos.

La cuarta revolución industrial es en la que nos encontramos actualmente, conocida también como Industria 4.0, se describe como el conjunto de transformaciones tecnológicas y científicas que cambian la economía y el estilo de vida actual, si bien es imposible describir del todo sus características porque aún no finaliza, es posible visualizar el camino que está tomando, dentro de esta destacan la aparición de los sistemas cibernéticos, la hiperconectividad, la “Big Data” y el internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés), todo esto ha dado paso a la generación de inteligencias artificiales, la realidad virtual, la impresión 3D y 4D, la aparición de sistemas de fabricación flexibles y la implementación de robots y la automatización en tareas cada vez más cotidianas del ser humano.

### 1.1.2: Historia de la Robótica

Durante la tercera revolución industrial comenzó el estudio y desarrollo de la robótica, la cual se define como “la técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos” (RAE, 2023), describiéndola desde un punto de vista más ingenieril, es posible definir a la robótica como la rama de la ingeniería que se ocupa del diseño, la operación, manufacturación, estudio y aplicación de sistemas autómatas o robots con la finalidad de realizar una tarea en específico.

La palabra *robot* se acuñó a Karol Capek, en su obra de teatro titulada “Rossum’s universal Robots”, traducida como “Los robots universales de Rossum”, y publicada en 1920, deriva del término checo “robota” que significa “trabajo”, empleando el término a un “trabajo forzado” en el rubro de la esclavitud al existir un amo y un esclavo.

Si bien el término robot no se empleaba hasta hace poco más de un siglo, la realidad es que la humanidad ha desarrollado mecanismos autónomos desde hace siglos, existiendo pruebas de esto en la antigua Etiopía sobre el año 1300 a.C., donde se construyó una estatua del rey Memon, que emite sonidos cuando está expuestas a los rayos solares. En China en el año 500 a.C. donde *King-su Tse* crea urracas voladoras y un caballo capaz de dar saltos, en la propia China y el tesoro de *ChinShin Hueng Ti*, donde se aplican mecanismos de muñecos que se mueven de forma independiente.

Avanzando hasta la Edad Media, los autómatas del hombre de hierro de Alberto Magno y la cabeza parlante de Roger Bacon, en el siglo XIII. Leonardo Da Vinci, el inventor más importante del milenio pasado también realizó bocetos de autómatas, como un león mecánico para el rey Luis XII de Francia, la creación de su caballero con armadura en 1495, o su propia máquina de

cálculo en el año de 1500. En el año de 1662 se inaugura el teatro de autómatas Takedo en Osaka, Japón.

La robótica daría un salto importante cuando se establece el cálculo automático, pues abre paso a la computación actual, el cálculo, en conjunto con la creación de algoritmos lógicos y el desarrollo de modelos matemáticos aplicados en mecánica sustenta la robótica moderna, este desarrollo se da entre los siglos XVII y XIX.

Es en el siglo XX en el que comienzan a desarrollarse los conceptos de robots que se emplean en la actualidad, un claro ejemplo de ellos el primer brazo articulado para pintura de spray, creado por H. Roselund y W. Pollard en 1938, esto generó una nueva visión de la producción industrial; otro avance importante ocurre en Inglaterra en el año de 1953, puesto que se diseña y construye el primer robot móvil autónomo, llamado ELSIE (Electro-Light-Sensitive Internal-External), robot capaz de seguir una fuente de luz sin asistencia externa, y tan solo 3 años después se emplea el álgebra matricial para describir y representar la geometría espacial de un robot, permitiéndole tener una mejor comprensión de su entorno.

Es en la década de los 60's cuando diversas empresas como General Motors CO., American Machine y Foundry Co., Trallfa y Kawasaki comienzan a incorporar brazos robóticos manipuladores en las líneas de producción, implementándolos en procesos como pintura o soldadura. Con la llegada de la tercera revolución industrial en los 70's, ocurrieron dos hechos importantes en el desarrollo de la robótica, la primera es la implementación de las comunicaciones entre los autómatas, así como de los sistemas de control, permitiendo el intercambio de información y la toma de decisiones de los robots; el segundo hecho importante es la reducción en los tamaños y costos de los robots, que se hace posible gracias a la aplicación de microprocesadores.

En los últimos 20 años del siglo XX, se incorporan sensores de todo tipo en los robots para mejorar la precisión y eficiencia en los procesos, y expandirlos a otras áreas de la vida humana, como la medicina, la educación, la exploración terrestre y espacial, las comunicaciones y la vida doméstica del ser humano.

La llegada de la industria 4.0 representa la cúspide del desarrollo de la robótica, puesto que su estudio y empleo en diferentes campos ha crecido de manera exponencial, esto se comprueba con los robots industriales instalados en el mundo, pues en 2021 se registraron más de 3.5 millones de unidades operando (Revista de Robots, 2023), un número extremadamente gigante con

las 700 mil unidades registradas en 1995, o las escasas 3500 unidades presentes en la mitad de los años 70's. Robots de diferentes tipos como el Da Vinci en medicina, el Perseverance explorando Marte (Figura 1.1), o el Atlas de la empresa Boston Dynamics son ejemplos claros del potencial que la robótica tiene en la actualidad.



Figura 1.1. Robot Perseverance en la superficie de Marte.

Nota. *Robot Perseverance* [Fotografía]. por BBC News Mundo, 2021, BBC News Mundo (<https://www.bbc.com/mundo/noticias-56120171>).

### 1.1.3: Clasificación de los robots: sus generaciones, funciones y modelos.

Como se mencionó previamente, la historia de la robótica abarca ya varios siglos, y dado las características propias de cada robot, así como la época en la que fueron diseñados, se hace necesaria la clasificación de estas máquinas para su estudio y diseño, las clasificaciones más aceptadas son de acuerdo con su generación cronológica, nivel de inteligencia o movilidad, existiendo otras clasificaciones como el nivel de control, el tipo de programación o su sector de aplicación (Conde, 2008).

La clasificación cronológica de los robots se da por generaciones, existiendo un total de 5 etapas:

- Primera Generación: son aquellos capaces de realizar tareas simples, como tomar y mover objetos, sin embargo, se encuentran sumamente limitados por sus movimientos.
- Segunda Generación: los robots de esta generación mejoraron su control de movimiento gracias a secuencias numéricas programadas, esto permitió la realización de movimientos más complejos.
- Tercera Generación: la tercera generación se caracteriza por la incorporación de sensores en los robots, que corresponde a las

décadas de los 80's y 90's, el uso de sensores permite crear robots más inteligentes puesto que ahora poseen cierta percepción de su entorno, es en esta generación donde también se incorporan los lenguajes de programación para crear un mejor sistema de control, puesto que ahora se pueden usar computadoras para el control de los robots.

- Cuarta Generación: es la generación donde se introducen los robots inteligentes, puesto que poseen la capacidad de analizar e interpretar su entorno en tiempo real, esto junto a los modelos de conductas creados, permite que los robots de esta generación sean más autosuficientes.
- Quinta generación: se trata de la generación actual, puesto que aún se encuentra en desarrollo, el objetivo de esta generación es el diseño de robots que basen su acción en modelos de conductuales complicados y previamente establecidos, de modo que imiten el comportamiento de los seres humanos y sean completamente autónomos.

La clasificación de los robots por su inteligencia se tiene por la Asociación de Robots Industriales Japonesa (JIRA, por sus siglas en inglés), para esta clasificación existen un total de 6 niveles, los cuales varían dependiendo de cómo el robot analiza su entorno y actúa conforme al resultado del análisis, la clasificación es la siguiente:

- Dispositivos de manejo manual: donde los robots requieren de un operador humano para su funcionamiento.
- Robots de secuencia arreglada: en este tipo de robots existe una secuencia previamente cargada al robot, lo que le hará cumplir la tarea que tiene programada, se requiere el uso de un operador para su programación, pero no para su funcionamiento.
- Robots de secuencia variable: la secuencia que posee el robot puede ser modificada de manera sencilla por el usuario, esto expande las posibilidades del robot, al poder realizar más de una tarea.
- Robots generadores: donde el operador humano conduce al robot durante todo el transcurso de la tarea.

- Robos de control numérico: el operador se encarga de alimentar la programación del movimiento del robot, de modo que se enseña manualmente la tarea-
- Robots inteligentes: los cuales procesan su entorno y son capaces de interpretarlo e interactuar con los cambios que puedan presentarse.

La última clasificación de los robots es la del sector de aplicación, esta clasificación abarca una amplia variedad de tipos, pero los 5 más comunes son los siguientes:

- Brazos robóticos: poseen una capacidad reducida en la versatilidad de tareas debido a su propia estructura, su principal uso es a nivel industrial donde realizan tareas como bin picking, soldadura, pick and place, escaneo y control de calidad, paletizado o aplicación de pintura.
- Vehículo de guiado automático (AGV por sus siglas en inglés): se tratan de vehículos a los cuales se les programa una ruta, permitiendo así que se muevan por la ruta trazada para transportar objetos de una localización a otra.
- Robots móviles autónomos (AMR por sus siglas en inglés): capaces de moverse y tomar decisiones por sí mismos gracias a la implementación de sensores que interactúan con el medio de forma constante.
- Cobots: denominación empleada para los robots que estarán en constante trabajo con un ser humano, de modo que el robot cumpla tareas peligrosas o repetitivas.
- Humanoides: nacidos en un principio como una rama de los AMR, los robots humanoides se construyen con la finalidad de emular la forma del ser humano, de modo que son robots bípedos, a los que se les incluye capacidades como caminar, pararse, saltar, hablar y bailar, uno de los primeros robots de este tipo fue el robot ASIMO de Honda (Figura 1.2).



Figura 1.2. Robot ASIMO de la empresa Honda saludando.  
Nota. *Robot Asimo*, [Fotografía], por Kote Puerto, 2011, Xataka,  
(<https://www.xataka.com/robotica-e-ia/honda-nos-presenta-un-nuevo-asimo-mas-autonomo-y-habilidoso>).

#### 1.1.4: Los robots humanoides y su evolución.

Uno de los principales campos de investigación de robots en la ingeniería y la industria son los robots humanoides, como previamente se mencionó, estos buscan emular la forma y comportamiento de una persona, incluyéndoles, además de las características físicas, sistemas de visión artificial, toma de decisiones, sintetizadores de voz y hasta pantallas para expresiones faciales. El objetivo del desarrollo de este tipo de robots recae en varios aspectos, uno de ellos siendo la necesidad de la comprensión biomecánica de los seres humanos, otra es el desarrollo tecnológico de órtesis y prótesis, y una tercera en la incorporación de robots humanoides en la automatización de los procesos, de modo que sean capaces de cumplir con tareas inherentes del ser humano; los mayores retos que se enfrentan en el desarrollo de estos robots son la locomoción bípeda, puesto que mantener el equilibrio es sumamente complicado y requiere de un amplio análisis estructural, las interacciones sociales en conjunto con la aplicación de la inteligencia artificial resulta en la solución al otro gran obstáculo, que es la incorporación de patrones e interacciones sociales.

El empleo de los robots humanoides se expande a varias áreas del ser humano, dentro de las cuales destacan la exploración, el uso en labores domésticas, en comercios y en las propias industrias de producción, para lograr que se incorporen en dichas áreas es necesario seguir con la mejora de esto hasta alcanzar un nivel de desarrollo avanzado, como lo han hecho otros robots de esta clasificación, tales como el robot ASIMO (Figura 2), que fue presentado en el año 2000, que es capaz de servir bebidas y su propósito original era ayudar a personas con problemas de movilidad, si bien el proyecto se abandonó en 2011, en su momento fue el robot más avanzado del mundo. El robot Pepper es otro robot humanoide desarrollado por Softbank Robotics en 2014, dado que cuenta con la capacidad de hablar, se le asignó la tarea de ser el recepcionista de visitantes, de modo que las guiara por ciertos sectores de la fábrica, su producción paró en 2021 y fue pieza clave en el

impulso de la disciplina STEM. Boston Dynamics se encuentra desarrollando los robots Atlas, con la capacidad de dar saltos, volteretas y rutinas sumamente complejas, se emplea en la remoción de escombros, derribo de puertas, o la conducción de vehículos.

Los dos robots humanoides más avanzados en la actualidad son Sophia (Figura 1.3) y Ameca, la primera fue desarrollada por Hanson Robotics y es capaz de adaptarse, aprender y colaborar con los seres de forma satisfactoria, el objetivo de su desarrollo es la ayuda en residencias de personas mayores o en multitudes ante una calamidad, su avanzada capacidad le llevó a ser reconocida como una ciudadana saudí en 2017 (Buriticá, 2018), siendo así el primer robot que posee una nacionalidad. El otro robot avanzado es Ameca, diseñado en 2021 por Engineered Arts, con el propósito de interactuar con seres humanos y ayudar en tareas cotidianas, ambos robots cuentan con sistemas de reconocimiento facial, expresiones faciales, incorporación de inteligencia artificial, articulaciones avanzadas y la capacidad de mantener conversaciones cortas.



Figura 1.3. Robot humanoide Sophia.

Nota. *Robot Humanoide Sophia*, [Fotografía], por Sandra Viñas, 2021, Business Insider, (<https://www.businessinsider.es/robot-humanoide-sophia-producira-masa-final-ano-797491>).

### 1.1.5: Los robots humanoides y su empleo en el ámbito académico

Robots humanoides menos desarrollados se emplean en niveles educativos, especialmente en niveles medio superior, superior y de posgrado, el uso de estos robots recae en el aprendizaje general que engloba a un robot. La finalidad de estudiarlos recae en la importancia de conocer la complejidad que un sistema de este tipo presenta, hablando estructural, electrónica y mecánicamente, de conocer conceptos como cinemática directa e inversa que se emplean para el movimiento de los robots, y/o los distintos lenguajes de programación que existen para los diversos robots que se han creado.

Robots de este tipo son los populares Nao y Bioloid, el primero es un robot humanoide programable desarrollado por Aldebaran Robotics, dependiendo

de las versiones, Nao (Figura 1.4), cuenta con 14, 21 o hasta 25 grados de libertad (DOF por sus siglas en inglés), además de incluir cámaras HD, sensores táctiles, sensores de posición, micrófonos, sensores de aceleración, giroscopios, transmisores y receptores; es programable en diversos lenguajes como C++, Java o Python (Aldebaran, 2023).



Figura 1.4. Robot NAO V6 estándar.

Nota. *Robot Nao V6* [Fotografía], por Aldebarán, 2023, Aldebarán United Robotics Group (<https://www.aldebaran.com/es/nao>).

Por su parte el robot Bioloid (Figura 1.5) es un robot desarrollado por la empresa ROBOTIS, esta serie de robots se centra en la educación e investigación robótica, son ampliamente conocidos por su modularidad y la versatilidad a la hora de estudiar diferentes aspectos de la robótica, como la programación, la cinemática y dinámica, distribución de fuerza y comunicaciones.

Algunas de las características principales que los destacan son las siguientes:

1. Modularidad: puesto que los robots están contruidos con componentes principales y secundarios, lo que les permite ser fácilmente ensamblados y reconfigurados.
2. Programación: estos robots son programables a través de su software Roboplus y otras plataformas diferentes, lo que da paso al control de sus motores para ejecutar movimiento y secuencias distintas.
3. Conectividad: los robots Bioloid cuentas con opciones para su conectividad, esta va desde la conexión por puertos USB, Bluetooth o mediante Wi-Fi.



Figura 1.5. Robot Bioloid GP.  
Nota, *Bioloid GP* [Fotografía], por Robotis, 2024, Robotis,  
(<https://emanual.robotis.com/docs/en/edu/bioloid/gp/>)

## 1.2. Justificación.

El robot Bioloid se trata de un robot humanoide enfocado en el aprendizaje y estudio de la cinemática y dinámica de robots, sin embargo, su precio ronda entre los 1,300 y 2,300 dólares en el mercado, este valor varía dependiendo del sitio web de compra, el país de envío y recepción, así como del modelo del robot (GP o Premium), por este motivo, se opta el desarrollo de una herramienta computacional que facilite el estudio de robots humanoides, esto para realizar el análisis de los sistemas de control, sin la necesidad de comprar el robot, o bien, en caso de tenerlo, sin afectar la integridad del equipo.

## 1.3. Hipótesis.

El uso de una plataforma de evaluación diseñada para la simulación de robots humanoides contribuirá en el mejoramiento y desarrollo de sistemas robóticos, al permitir un acceso sencillo y económico, además de estudios precisos al emular las capacidades y características de un robot físico.

#### **1.4. Objetivos.**

- Crear un diagrama de bloques en Simulink del robot Bioloid GP, a partir de su modelo CAD.
- Implementar una librería de movimientos simples del robot simulado a partir de la configuración del diagrama de bloques.
- Crear secuencias de movimientos donde se ejecuten múltiples movimientos durante la simulación.



## CAPÍTULO II

# Marco Teórico

- 2.1 El robot Bioloid y Roboplus.
- 2.2 Funcionamiento de Solid Works.
- 2.3 Funcionamiento de Matlab y Simulink.
- 2.4 Plugin de conexión entre SolidWorks y Simulink.

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

## Capítulo 2. Marco Teórico

### 2.1: El robot Bioloid y Roboplus.

El robot Bioloid es un robot humanoide cuya estructura está compuesta por marcos de aluminio resistentes y ligeros, lo que le permite soportar golpes sin tener un peso excesivo que resulte perjudicial para los servomotores de la cadera y las piernas.

El robot puede ejecutar una amplia gama de movimientos, dentro de los cuales destacan los movimientos básicos como caminar o girar, pero también es capaz de realizar movimientos y rutinas de un alto grado de complejidad, tal es el caso de movimientos y modos de combate, la capacidad de jugar fútbol, acostarse, levantarse, ponerse de cabeza, y subir y bajar escalones. Todos estos movimientos se ejecutan gracias a la combinación de 18 servomotores, 8 de tipo AX-12A y 10 de tipo AX-18A, consta además de otros componentes como un panel de control CM-530, una batería, un sensor giroscópico, un control RC-100B, cable Mini USB y de carga, así como todas las piezas del robot, cables, tornillos y accesorios necesarios para armar el robot, para una lista más detallada de todas las piezas, se recomienda observar el manual del robot Bioloid (Robotis, 2024).

El robot Bioloid posee un total de 18 motores de base, sin embargo, es importante destacar que la versión del robot empleado en la presente investigación únicamente contiene 16 servomotores, por lo que los respectivos análisis se harán con 16 ejes de movimientos, distribuidos en brazos, torso y las piernas, el diagrama articular del robot se muestra en la Figura 2.1, en esta se observa como cada brazo está compuesto por 3 servomotores, los dos primeros servos de cada brazo comprenden el equivalente humano del hombro, mientras que los servomotores 5 y 6 representan el movimiento del codo. Los servomotores 7 y 8 representan un movimiento lateral de la cintura, sin embargo, estos servos son los que nuestro modelo no posee, por lo que no serán considerados en las operaciones de movimiento. Los servos del 9 al 14 representan las piernas y rodillas, siendo estas las que poseen una mayor cantidad de servomotores, puesto que también se incluye los servos del 15 al 18, los cuales conforman la rotación de los pies del Bioloid, como se observa, los servos con numeración impar representan el lado izquierdo, mientras que los de numeración par en el lado derecho.

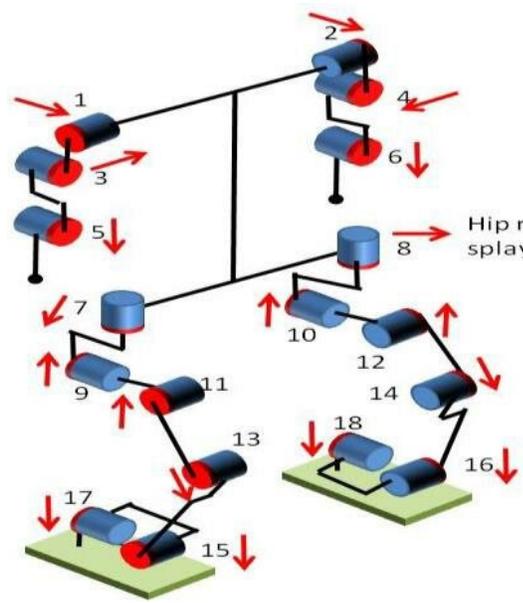


Figura 2.1. Diagrama articular del Bioloid con 18 servos.

Nota, Diagrama articular del Bioloid [Video], por Leticia González, 2022, Youtube, [https://www.youtube.com/watch?v=DrFnnvF2gFM]

Gracias al diagrama articular es posible visualizar que el robot se compone de 4 cadenas cinemáticas, cada una correspondiente a cada una de las articulaciones, así mismo, las cadenas cinemáticas de los brazos son prácticamente iguales, únicamente variando la dirección del primer servomotor, por su parte, las cadenas cinemáticas de las piernas son idénticas.

Las cadenas de los brazos se componen de 3 ejes de rotación, el primero girando en dirección frontal a la vista del robot, mientras que los otros dos se encuentran alineados con el lateral del robot, los dos primeros servomotores se encargan de emular el movimiento del hombro humano, mientras que el tercero emula un movimiento del codo.

Por su parte, las cadenas de las piernas cuentan con 5 ejes de rotación cada una, estos ejes se encuentran en la misma disposición, el primer servomotor de cada pierna se encuentra alineado lateralmente con el robot, permitiendo mover la pierna de forma lateral, los siguientes 3 eslabones están alineados con la parte frontal del robot, y permiten el mover la pierna hacia adelante, así como flexionar la zona de la rodilla y el tobillo, mientras que el quinto y último servomotor de cada cadena se alinea nuevamente de forma lateral y permite el movimiento lateral del pie, por la propia disposición de los dos últimos servomotores de cada pierna, puede entenderse como un movimiento esférico del pie, producto de la cercanía de los dos últimos ejes de rotación.

El software empleado para la manipulación del robot por defecto es Roboplus el cual fue desarrollado por la propia empresa Robotis, las especificaciones mínimas para que el programa funcione se enlistan a continuación:

- CPU 32 bit [x86] o 64-bit [64x].
- RAM mayor a 512Mb.
- Disco duro disponible de 500Mb.

En Roboplus, en la pestaña de “Expert” y opción “Roboplus Motion” es posible conectar el robot con una computadora, la detección vía USB se realiza de modo automático, al iniciar el programa se desplegará un menú (Figura 2.2), en el cual es necesario seleccionar la opción *Roboplus Motion*, esta nos permitirá controlar los servomotores del robot.



Figura 2.2. Menú principal de Roboplus.

Realizada la conexión se podrá observar la conexión de los servomotores, esto se observa en la Figura 2.3, donde a la izquierda están todos los servomotores por defecto, mientras que a la derecha se muestran únicamente los servomotores detectados. En este menú también es posible visualizar otras opciones como las secuencias preprogramadas en el robot, la velocidad de movimiento de los motores, así como la posibilidad de encender y apagar cada motor de manera individual, el resto de las opciones del menú se observan con detenimiento en la Figura 2.4.

Editor básico de posición    Utilidad de postura    Editar toda la página

<Posición del Paso>			<Posición del Robot>		
	Valor			Valor	
ID[1]	341	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[1]	341	
ID[2]	681	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[2]	681	
ID[3]	572	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[3]	572	
ID[4]	450	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[4]	450	
ID[5]	763	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[5]	763	
ID[6]	259	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[6]	259	
ID[7]	512	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[9]	515	
ID[8]	512	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[10]	507	
ID[9]	515	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[11]	741	
ID[10]	507	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[12]	281	
ID[11]	741	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[13]	857	
ID[12]	281	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[14]	165	
ID[13]	857	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[15]	684	
ID[14]	165	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[16]	343	
ID[15]	684	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[17]	515	
ID[16]	343	<input checked="" type="checkbox"/>	ID[18]	507	
ID[17]	515	<input checked="" type="checkbox"/>			
ID[18]	507	<input checked="" type="checkbox"/>			

Figura 2.3. Listado y detección de las posiciones de los servos.

[CM-530] X

	Nombre	Siguiente	Salir
1	CAMINAR IZQ P	2	0
2	CAMINAR IZQ P	3	0
3	CAMINAR DER P	4	0
4	CAMINAR DER P	6	0
5		0	0
6	GiroIzq	7	0
7	GiroDer	1	0
8	Escalon1	0	0
9	Escalon1.1	0	0
10		0	0
11	escalon2.0	0	0
12		0	0
13		0	0
14		0	0
15		0	0
16		0	0
17		0	0
18		0	0
19		0	0
20		0	0
21		0	0
22		0	0
23		0	0
24		0	0

	Pausa	Tiempo
PASO 0	0	1
PASO 1	0	1
PASO 2	0	1
PASO 3	0	1
PASO 4	0	1
PASO 5	0	1
PASO 6	0	1

**Parámetros de página**

Tiempo de: 1

Velocidad: 0,5

Control de la fuerza: 32

Tiempo de ejecución  
 $(7.000\text{seg} / 0.5) \times 1$   
 = 0min 14.000seg

**Dureza de las**

	Nivel
ID[1]	5
ID[2]	5
ID[3]	5
ID[4]	5
ID[5]	5
ID[6]	5
ID[7]	5
ID[8]	5
ID[9]	5
ID[10]	5

Figura 2.4. Menú de Roboplus sin los servomotores.

## 2.2. Funcionamiento de SolidWorks.

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), utilizado para el modelado mecánico en 2D y 3D, el software es desarrollado por *SolidWorks Corporation*, derivada de *Dassault Systemes*.

SolidWorks no se reduce únicamente a la generación de piezas, puesto que dentro de sus productos abarca una gran cantidad de dominios de distintas áreas de la ingeniería, dentro de los cuales destacan, además del diseño, la gestión de productos, manufacturación, planificación de recursos, fabricación, marketing y simulaciones de distintos fenómenos.

En cuestión de diseño y de ingeniería, este software de diseño aporta distintas herramientas, dentro de las cuales están el modelo CAD 3D, el diseño de planos, herramientas de esquemas y sistemas eléctricos en 2D y 3D, y el diseño y manufacturación de piezas metálicas, estructuras y modelos.

Al abrir el programa de diseño CAD de SolidWorks se abre un menú (Figura 2.5) que nos permite crear una pieza(*part*), un ensamble (*assembly*) o un plano (*drawing*), la primera opción permite la creación de piezas, la opción *ensamble* permite importar diferentes piezas creadas y crear acotaciones para unirlos en un mecanismo, mientras que la opción *drawing*, es la que permite generar un plano 2D, ya sea de una pieza o de un ensamble, con la creación de este plano se estipula las medidas y dimensiones del modelo CAD.

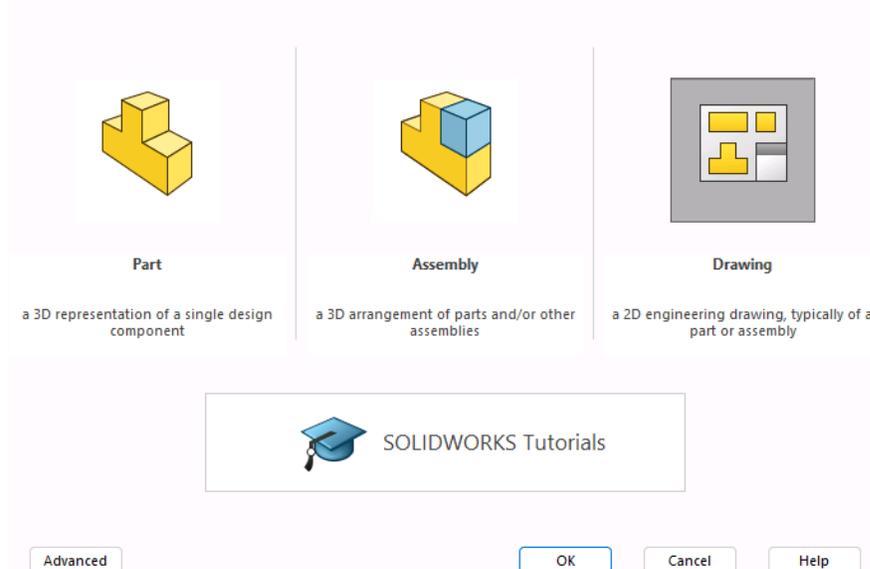


Figura 2.5. Menú de creación de un nuevo archivo en SolidWorks.

Al seleccionar la opción *part* se abre una gran cantidad menús, y a su vez, cada menú posee una gran cantidad de opciones, cada menú está especializado para cumplir tareas específicas, el primer menú a destacar es el árbol de operaciones, en este se define el espacio de la pieza, puesto que se encuentran los 3 ejes del espacio geométrico, teniendo el plano frontal, superior y derecho, además se define el origen y el material por el cual está constituido la pieza, el árbol de operaciones así como los planos en el espacio se muestran en la Figura 2.6, los planos permiten definir el inicio de la pieza o ensamble a diseñar.

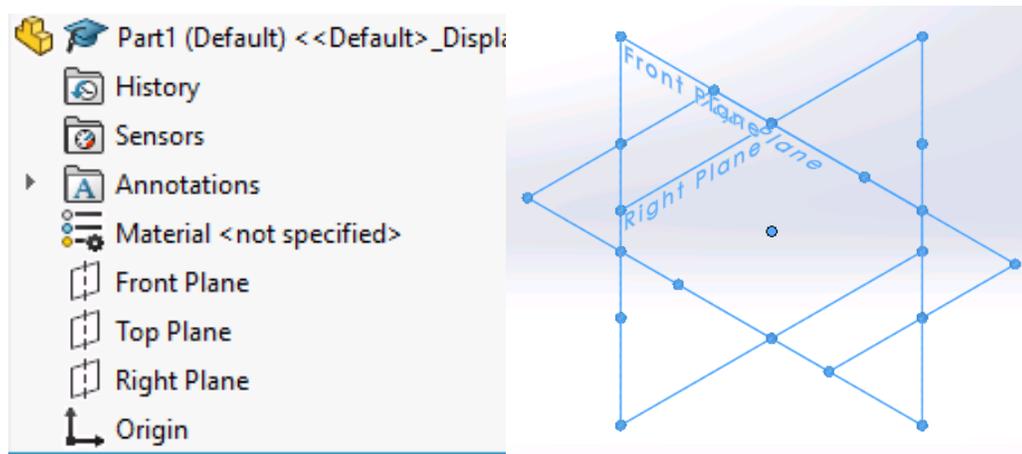


Figura 2.6. Árbol de operaciones (izquierda) y planos en el espacio de trabajo (derecha).

Dentro del menú de trabajo, otra opción importante antes de comenzar a diseñar es la definición de las medidas, las cuales involucra la definición de las unidades de distancia, peso y tiempo, se incluyen 4 opciones distintas predeterminadas, o bien, es posible definir las manualmente junto a otras unidades de medida, las 4 configuraciones predeterminadas son las siguientes:

- MKS = Metros, Kilogramos y Segundos.
- CGS = Centímetros, Gramos y Segundos.
- MMGS = Milímetros, Gramos y Segundos.
- IPS = Pulgadas, Libras y Segundos.

Aunque existen una gran cantidad de menús para distintas herramientas, los dos principales son *Features* y *Sketch*, el menú *Sketch* (Figura 2.7) nos permite crear y trabajar sobre un sketch, el cual se trata de un conjunto de líneas, formas y geometrías básicas que se utilizan como base para crear modelos tridimensionales, el sketch únicamente se trata de un dibujo bidimensional que permite definir la forma y dimensiones básicas de un objeto. Dentro de las opciones que tiene este menú se destacan las principales:

- a) Sketch: es la opción base, se usa para crear un sketch en uno de los ejes, o en una pared construida, al activarla se comenzará con la definición de las líneas y geometrías.
- b) Smart Dimension: esta opción permite definir las medidas que tendrá una línea.
- c) Line: permite crear una línea recta.
- d) Corner Rectangle: permite crear un rectángulo de forma directa.
- e) Straight Slot: crea de forma directa una ranura con semicírculos en los extremos.
- f) Circle: crea un círculo.
- g) Centerpoint Arc: crea un círculo fraccionado.
- h) Polygon: permite crear un polígono de mínimo 6 lados, con posibilidad de extenderlos.
- i) Trim Entities: es la opción de tijeras, permite recortar una fracción de línea que está interceptada por otro.
- j) Convert Entities: a partir de línea previamente definida, da la posibilidad de replicarla con un tamaño diferente.
- k) Mirror entities: copia una serie de líneas o figuras respecto a otra línea.

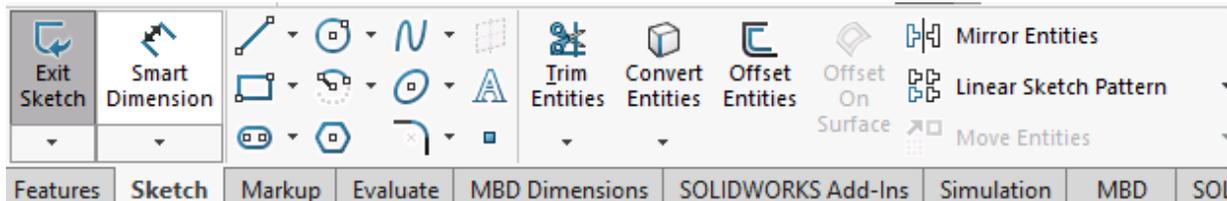


Figura 2.7. Opciones del menú Sketch.

El segundo menú importante es el de *Features* (Figura 2.8), el cual permite la creación de los modelos 3D a partir de un sketch, dentro de las opciones más destacables se encuentran las siguientes:

- a) Extruded Boss/Base: es la creación de un sólido, la figura se ve definida por el sketch.
- b) Revolved Boss/Base: crea un círculo en una línea de apoyo y su medida depende de los trazos del sketch.
- c) Swept Boss/Base: una opción avanzada que permite crear un tubo a partir de una línea de referencia.
- d) Extruded Cut: crea una extrusión del tamaño del sketch.
- e) Hole Wizard: crea una extrusión con parámetros ajustados a tornillo y otras herramientas.
- f) Revolved Cut: se trata de una herramienta que, a partir de una figura y un eje, toma la forma de la figura y realiza un corte concéntrico al eje seleccionado.

- g) Fillet: es una herramienta de redondeos para los bordes de los modelos.
- h) Reference Geometry: permite la creación de planos de apoyo para la creación de sketches.

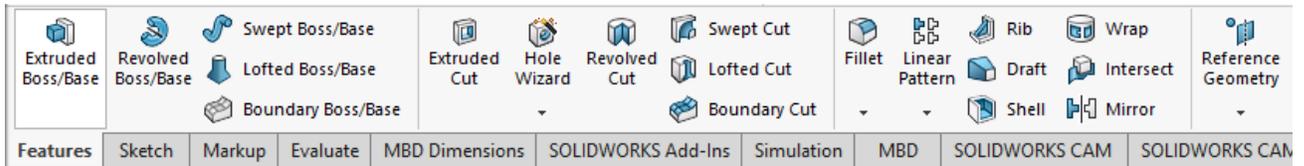


Figura 2.8. Menú Features de SolidWorks.

Estos son los dos principales menús que se emplean al hacer una pieza, por su parte, si en lugar de seleccionar construir una pieza, se ha seleccionado la opción de ensamble, el menú features desaparecerá y tendremos el menú *Assembly* en su lugar, dentro de la configuración del ensamble podremos importar todas las piezas que hemos creado, con la finalidad de construir las restricciones necesarias para que el modelo 3D cumpla con las características deseadas, las opciones más empleadas e importantes se enlistan a continuación y se muestran en la Figura 2.9.

- a) Insert Components: permite la adición de componentes en el ensamble, al colocarla es posible seleccionar la orientación de esta.
- b) Mate: es la creación de restricciones, estas pueden ser del tipo coincidente, paralelo, perpendicular, tangente, perpendicular, de distancia o de un ángulo, con estas restricciones podremos establecer la posición de una pieza respecto al ensamble en general.
- c) Linear/Circular Component Pattern: permite la generación de múltiples piezas del mismo tipo, ya sea en línea recta o circular, permite la inserción de muchas piezas a la vez, en lugar de añadirlas individualmente.
- d) New Motion Study: permite simular un movimiento del ensamble, de modo que se visualiza la interacción entre todas las piezas.

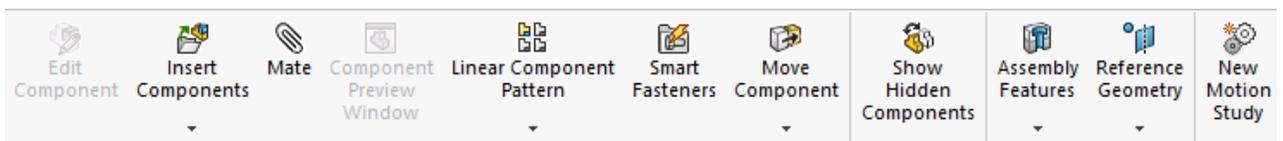


Figura 2.9. Menú *Assembly* de la configuración de un ensamble.

### 2.3. Funcionamiento de Matlab y Simulink.

Matlab es un entorno de programación y lenguaje de programación de alto nivel, es ampliamente utilizado en las ramas de la ingeniería y las ciencias aplicadas, la empresa tras de este software es *Mathworks*.

Este software brinda una gran cantidad de aplicaciones, algunas de las más importantes radican en el análisis numérico, dado que ofrece funciones y herramientas de alto lenguaje matemático, el cual permite realizar cálculos de álgebra lineal, cálculo, estadísticas y/o procesamiento de señales. Otro de sus recae en la visualización y presentación de datos, puesto que su entorno permite crear diagramas 2D y 3D. La programación es una tercera aplicación destacada, dado que permite la creación de scripts y funciones, las cuales permiten la automatización de procesos y tareas que conllevan cálculos sumamente complejos. El desarrollo de aplicaciones también es posible mediante el uso de Matlab, puesto que proporciona las opciones para crear herramientas interactivas e interfaces gráficas de usuarios (GUIs), por último, la simulación y modelado es otro punto fuerte de aplicación para este software, dados que permite desarrollar modelos matemáticos, simular sistemas de varios tipos, y analizar el comportamiento de estos bajo distintas condiciones programadas.

Todas estas aplicaciones son posibles gracias a los múltiples add-ons que posee, cada uno destinado a ciertas necesidades, dentro de estos destacan programas de modelaje como la paquetería *Simscape* los de generación de datos y códigos como *Filter Design HDL Coder*, de procesamiento de señales e imágenes como *Audio Toolbox* o *Image Processing Toolbox*, de sistemas de control, comunicaciones inalámbricas como el *5G Toolbox*, de robótica y ROS como *Robotics SystemToolbox* o *ROS toolbox*, pero uno de los más empelados es el toolbox *Simulink*, el cual se trata de un entorno de diagrama de bloques para simulación Multidominio y diseño basado en modelos (Mathworks, 2024), este software proporciona al usuario un entorno gráfico, en el cual se pueden crear diagramas de bloques personalizables que permitan modelar y simular sistemas, este entorno se aprecia en la Figura 2.10.

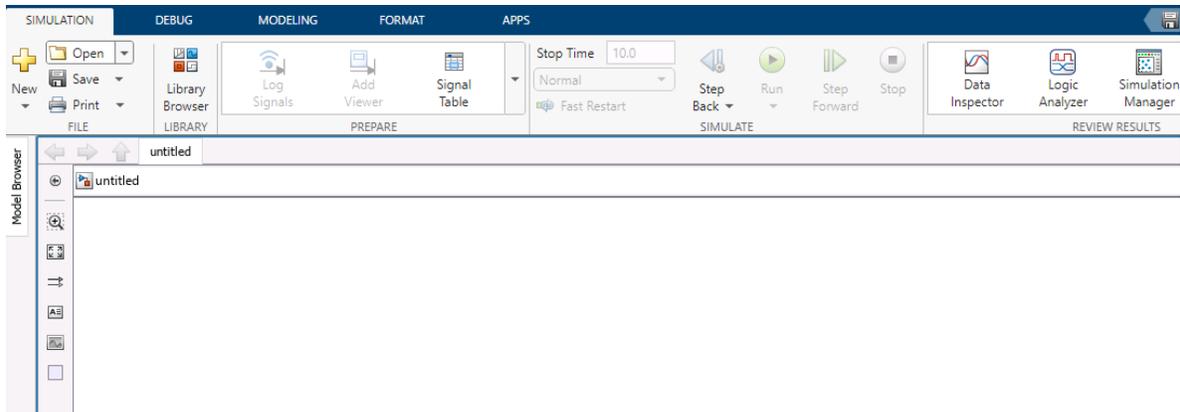


Figura 2.10. Entorno de trabajo de Simulink.

La principal herramienta que se maneja en Simulink es *Library Browser*, al abrirla, se nos desplegará un submenú con la biblioteca de todos los bloques que podemos incorporar en el diagrama, la cantidad de bloques es inmensa, puesto que existen bloques para distintas aplicaciones, tales como las comunicaciones, sistemas de control, UAV, animación 3D, HDL e incluso aeroespaciales.

Dentro de esta amplia gama de bloques, destacan los referidos al área de mecanismos y sólidos, biblioteca denominada como *Simscape*, puesto que cada pieza o elemento se crea a partir de un sólido, existen diversos bloques que permiten la inserción de sólidos en el diagrama, dentro de los cuales destacan el *brick*, *cylindrical*, *extruded*, *revolved*, entre otros más, cada uno de estos bloques crean sólidos con diferentes formas y cada uno posee un menú correspondiente de acuerdo a las opciones que el bloque permite, por ejemplo, el sólido *extruded* posee una opción para aumentar el número de lados que el sólido tendrá, mientras el bloque *brick* no la posee (Figura 2.11), independientemente de las diferencias entre estos, el propósito es el mismo, puesto que generan un sólido al cual se le añaden físicas.

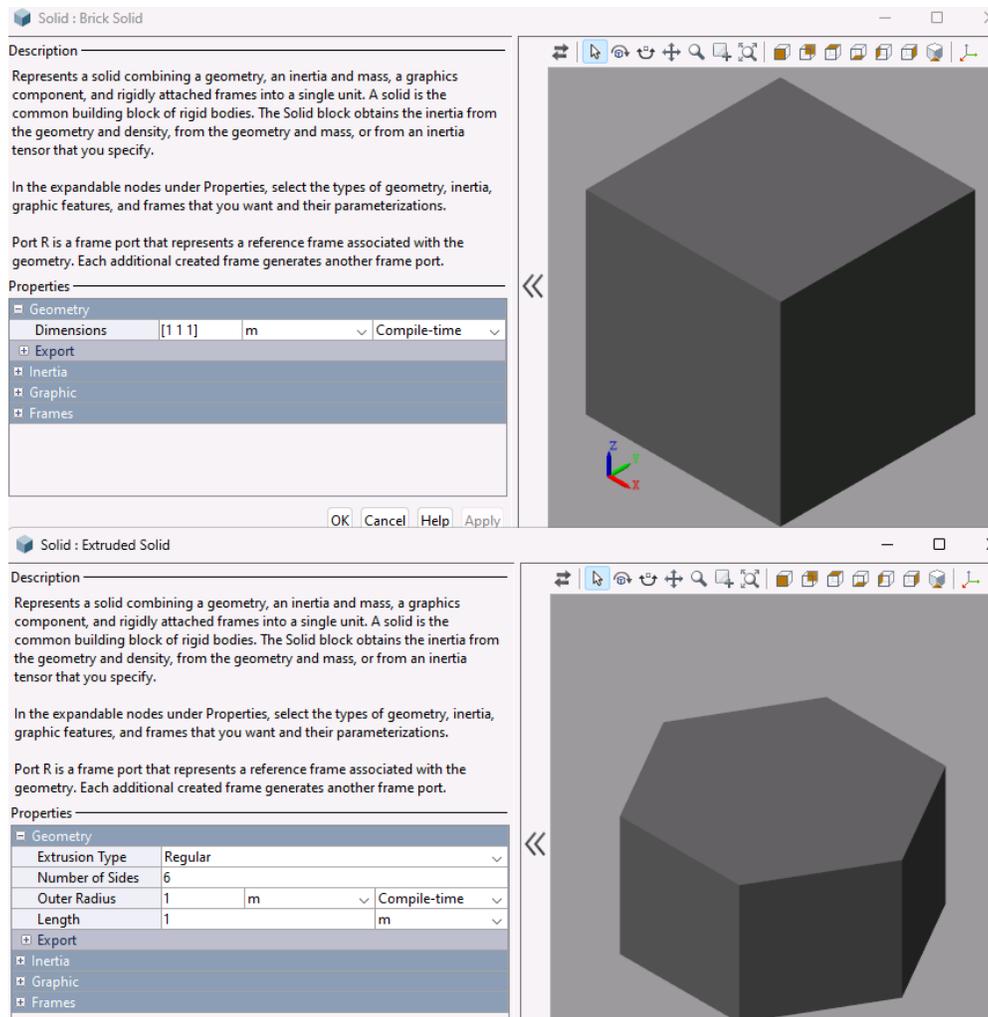


Figura 2.11. Sólido *Brick* (arriba) y sólido *Extruded* (abajo).

Los bloques anteriores son los que permiten la generación de objetos en el diagrama, sin embargo, para que estos puedan existir de forma correcta es necesario crearles puntos de referencia en el mundo para ello se emplean los siguientes bloques:

- a) **World Frame:** representa el marco de referencia del modelo, sus ejes son ortogonales y es inercial.
- b) **Mechanism Configuration:** especifica los parámetros de gravedad y simulación del mecanismo.
- c) **Solver Configuration:** especifica los parámetros para que el modelo comience la simulación.
- d) **Rigid Transform:** especifica y mantiene la relación espacial entre los fotogramas, esta relación espacial incluye la traslación y rotación.

Estos bloques se observan en la Figura 2.12, en conjunto, estos 4 bloques permiten la construcción del entorno virtual en el cual se desarrollará nuestra simulación, es importante destacar que el bloque *Rigid Transform* no es único en el diagrama, sino que, al proporcionar las relaciones espaciales, suele existir uno por cada sólido que interactúa en el mecanismo.

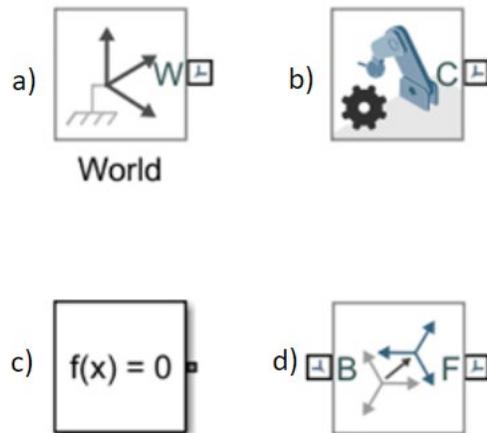


Figura 2.12. Bloques de referencia para el entorno.

Otro tipo especial de bloques necesarios en la simulación de mecanismos son el grupo *Joint* (Figura 2.13), en los modelos cinemáticos, este bloque representa las restricciones cinemáticas que determinan el movimiento de los cuerpos entre sí, un bloque de este tipo es capaz de conectar dos cuerpos, es esta conexión la que determina los grados de libertad máximo que pueden existir, pudiendo tener como máximo 6, puesto que existen 3 traslacionales y 3 rotacionales, dicho de otro modo, las *Joint* permiten el movimiento y giro entre dos cuerpos. Existen varios tipos de bloques en este grupo, dentro de los cuales destacan el cartesiano, el cilíndrico, el planar, el prismático, el rectangular y la revolución, cada uno posee un número específico de traslaciones y rotaciones.

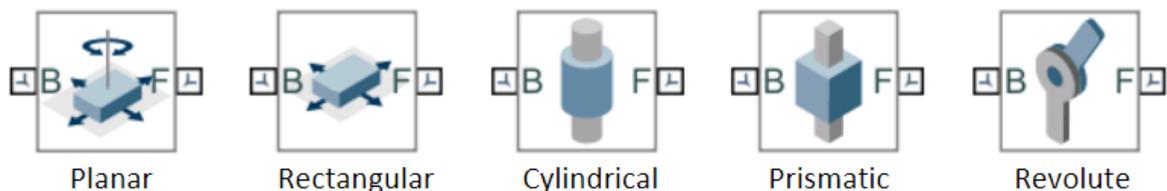


Figura 2.13. Joints más comunes.

Otra configuración importante que aparece en forma de bloque es el de *subsystem*, el cual se trata de un sistema dentro del sistema general, esta opción se da porque permite simplificar la creación, estudio y análisis del diagrama de bloques, dado que se pueden agrupar una cantidad indefinida de bloques y meterlos dentro de un subsistema, el cual generará un único

bloque (Figura 2.14), que al seleccionarlo, nos abrirá el subsistema, observando los bloques que en este se encuentren, así como sus entrada, conexiones y salidas.

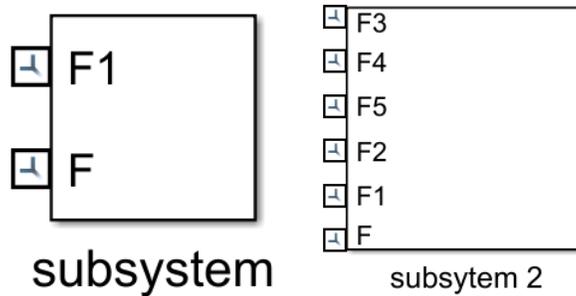


Figura 2.14. Subsistema con 2 entrada (izquierda) y subsistema con 6 entrada (derecha).

Gracias a las múltiples librerías con las que cuenta MATLAB, puede simular un entorno de señales, de modo que estas se generan adecuándose a los parámetros que el usuario requiera, pueden modularse diferentes tipos de señales, siendo el más común la señal sinusoidal, a la cual se le configuran parámetros como la amplitud, la inclinación (*bias* en inglés), la frecuencia y la fase de la señal, los parámetros de dicho bloque se observan en la Figura 2.15.

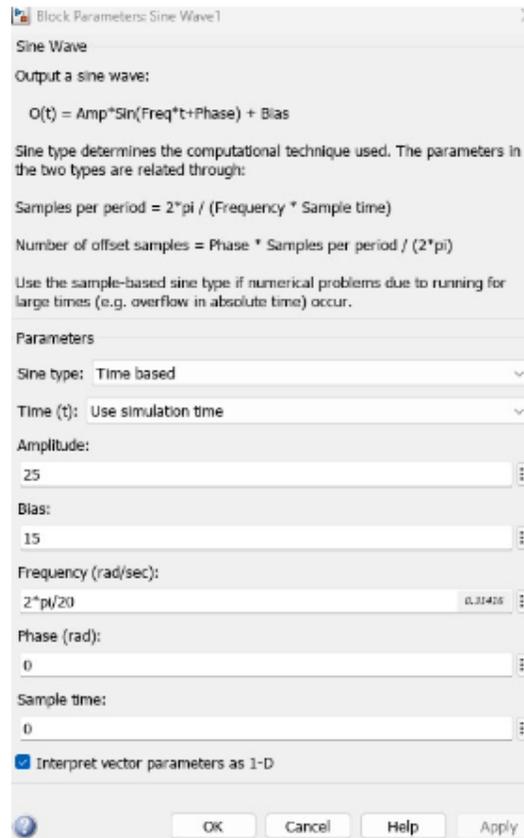


Figura 2.15. Configuración del bloque “Onda Sinusoidal”.

Adicional a la señal sinusoidal, también es posible crear delays para estas, esto se logra mediante el bloque “Transport Delay” (Figura 2.16)., el cual deja pasar la señal de entrada una vez que se ha completado el tiempo asignado que debe transcurrir en la simulación de Simulink.

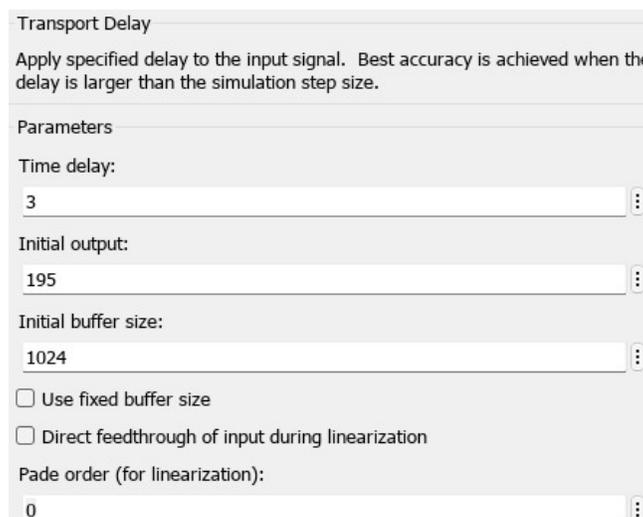


Figura 2.16. Configuración del bloque “Transport Delay”.

Estas señales que se envían son variables de Simulink, sin embargo, las Revolute emplean variables físicas, por lo que para ingresar las señales es necesario hacer la transformación del tipo de variable, esto se realiza gracias a los bloques “PS-Simulink” y “Simulink-PS”, los cuales transforman la información de variables físicas a Simulink y de Simulink a variables físicas respectivamente, a ambos bloques se les requieren asignar el tipo de variable que entrará, estos bloques se observan en la Figura 2.17.

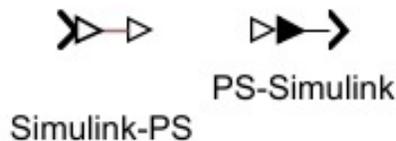


Figura 2.17. Bloques de transformación de variables.

Un último bloque indispensable en la generación de simulaciones mecánicas son las colisiones, denominadas “Contacto espacial” (Figura 2.18), estas permiten establecer el contacto entre dos cuerpos del diagrama de bloque, de forma que si durante la simulación estos llegar a chocar, Matlab simulará los movimientos derivados de esta colisión a partir de los parámetros físicos establecidos para ambas piezas, así como para el entorno.

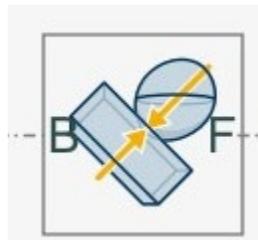


Figura 2.18. Bloque de colisión entre cuerpos.

Finalmente, es necesario establecer el entorno de trabajo de Simscape, el cual toma los datos del diagrama de bloques de Simulink y crea el modelo 3D, en este entorno (Figura 2.19), contamos con un diagrama de árbol de los distintos bloques, subsistemas y frames que forman nuestro diagrama de bloques, así mismo, el modelo 3D se ve representado y en la parte inferior tenemos la barra de duración de la simulación, la que nos permite incrementar o reducir la velocidad del video, retroceder, avanzar o pausar la simulación. En la parte superior encontramos opciones para visualizar el modelo desde distintos ángulos, así como desde distintos ejes, opciones para cambiar la perspectiva en la que el modelo se ve, opciones para observar el movimiento desde múltiples vistas, y una última opción para grabar un video desde una de las perspectivas.

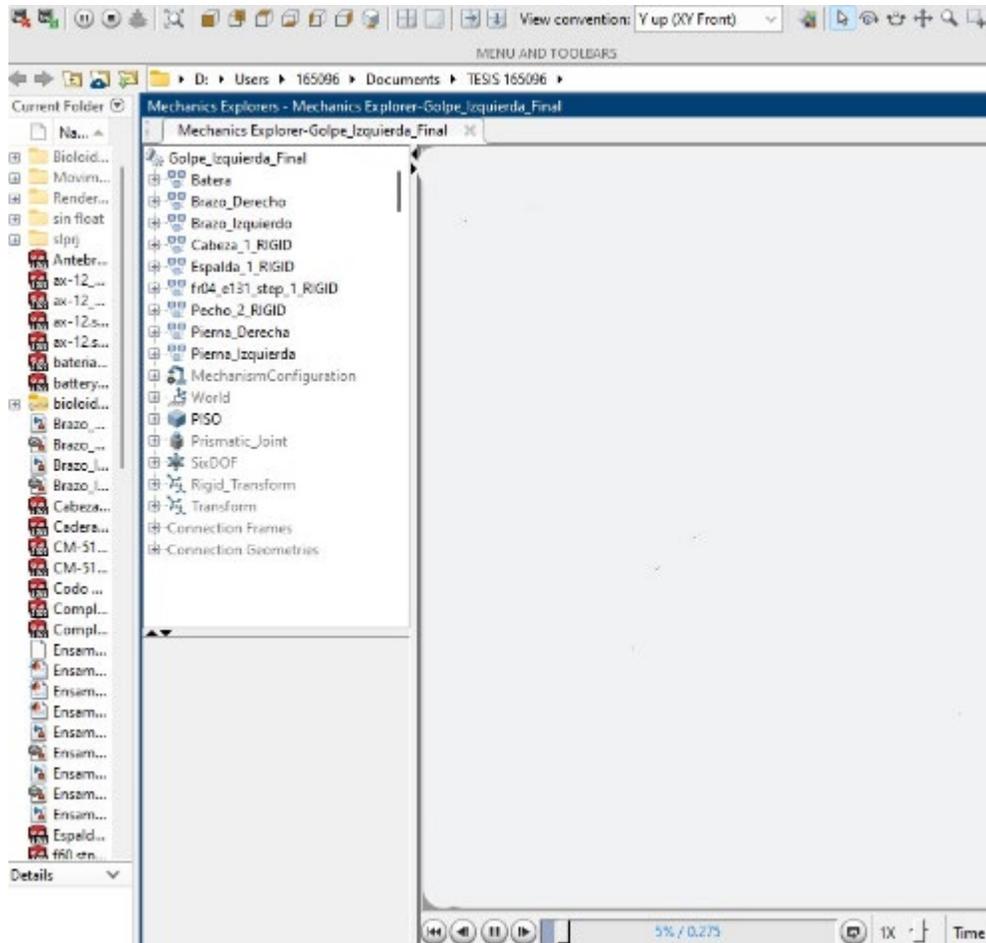


Figura 2.19. Entorno de trabajo de Mechanics Explorer.

## 2.4. Plugin de conexión entre SolidWorks y Simulink.

Si bien SolidWorks y Matlab se tratan de dos softwares independientes, se han desarrollado herramientas para su vinculación, la más destacada es el plugin “Simscape Multibody Link”, el cual se trata de un complemento que puede instalarse en aplicaciones CAD para la exportación de modelos de ensamblaje a Simscape Multibody, esta herramienta permite, a partir de un ensamblaje, generar un archivo XML, que contendrá la geometría corporal para su análisis en Matlab, además de SolidWorks, este plugin se puede emplear con Autodesk y PTC Creo.

La instalación del plugin en Matlab se realiza como cualquier otro, únicamente requiriendo tener los archivos de instalación, ejecutar Matlab como administrador, agregar los archivos descargados en la ruta de Matlab y registrar Matlab como un servidor de automatización. Por su parte, en SolidWorks, se habilita el complemento y se añade a la barra de

herramientas, si la instalación ha sido correcta se podrá hacer uso de ella (Figura 2.20).

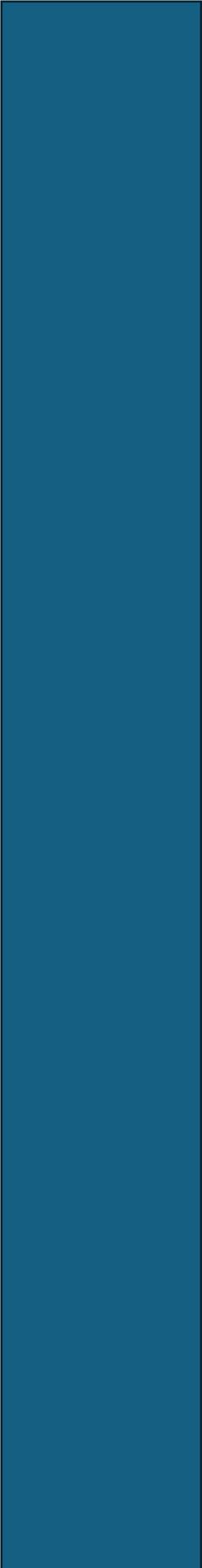


Figura 2.21. Simscape Multibody instalado en SolidWorks.

Instalado el plugin en SolidWorks, se hace uso de esta herramienta en el ensamble que deseamos exportar, esto creará un archivo XML, el cual se deberá de abrir en Matlab con el siguiente comando:

```
Simimport("nombre_del_archivo")
```

Esto creará el modelo Simscape Multibody, el cual se podrá manipular desde Simulink.



## CAPÍTULO III

# Metodología

3.1 Generación del modelo CAD del Bioloid.

3.2 Vinculación a Simulink.

3.3 Uso de Simulink para el análisis y simulación de sistemas.

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

## Capítulo 3. Metodología.

### 3.1. Generación del modelo CAD del Bioloid.

El modelo CAD del robot no fue diseñado desde cero, sino que se empleó un modelo previamente existente, este se obtuvo de parte del usuario Limor Schweitzer, en el sitio web GrabCad Community (Schweitzer, 2013), el usuario publicó cada una de las piezas más importantes para la creación del robot, las piezas CAD diseñadas corresponden a las piezas de aluminio que dan la estructura al robot, así como los correspondientes servomotores, el procesador y la batería del robot, en la Figura 3.1 se aprecian las vistas del robot.

Las piezas descartadas corresponden a los tornillos, tuercas y botones que se emplean para la unión de las piezas y el uso del procesador, se analizó la posibilidad de utilizar dichas piezas para así obtener un modelo más exacto del robot, sin embargo, la decisión se descartó, puesto que estas piezas se emplean para el ensamblado del robot en el caso de tornillos y tuercas, así como para el control de este en el caso del panel de control con todos sus botones y puertos. El simular estas piezas únicamente se obtendría un diagrama de bloques de una dimensión descomunal que dificultará el entendimiento y manipulación del diagrama al momento de crear y ejecutar los distintos movimientos, puesto que cada una de estas piezas tendría su propio bloque y conexiones con las piezas principales de robot, sin embargo, no poseerían una función dentro del propio diagrama, esto derivado de que su función en el robot físico se ve reemplazada por las conexiones que pueden realizarse en el modelo CAD y posteriormente las restricciones de movimientos en Simulink, por su parte, la justificación del panel de control recae en que en la simulación no se requerirá de variar el modo del robot, cargarle programas, conectarlo a la red eléctrica o a encenderlo, por lo que su ausencia no dará problemas en la manipulación del mismo.

Las piezas empleadas para la creación del modelo CAD llevan el mismo nombre que Robotis les ha asignado, por lo que al conocer la lista de piezas se puede ubicar cada una de ellas, aún con ello, se opta por crear un listado de piezas donde, además de su nombre técnico, se añade la parte del cuerpo humano que simula, esto con la finalidad de ubicarla de manera más directa y entender la importancia de cada pieza de manera individual, esta información se aprecia de mejor modo en el Anexo A, así mismo una vista isométrica del robot se aprecia de mejor modo en el Anexo B.

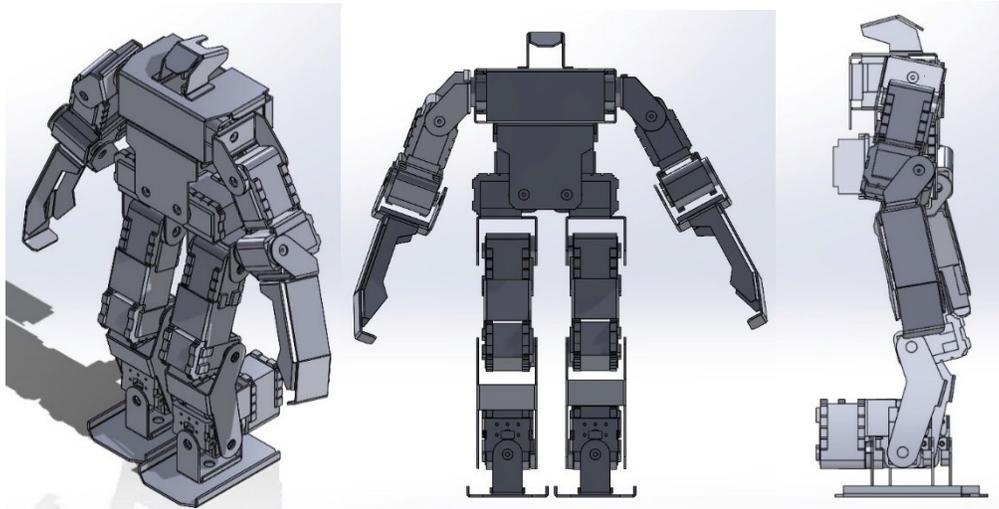


Figura 3.1. Vista isométrica (izquierda), frontal (medio) y lateral (derecha) del robot Bioloid en SolidWorks.

Una diferencia importante entre el robot simulado y el robot físico es que las piezas tienen rendijas en diferentes piezas, para reducir el peso del robot y ahorrar material en la construcción de las piezas, estas rendijas se encuentran en lugares específicos donde no afectan la estructura y estabilidad del robot.

El peso del robot con estas rendijas, y de acuerdo con la propia empresa Robotis, el robot tiene un peso de 1.6Kg (Robotis, 2024), las piezas que se emplean son de aluminio ligero, el cual puede abarcar las series 6000 o 7000 de aluminio. Con la finalidad de que la simulación sea lo más precisa posible, se opta por hacer una comparativa entre el peso total del robot físico, con el peso del robot simulado, por lo que a la simulación se les agregan materiales a las piezas, a los servomotores se les agrega el plástico Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS por sus siglas en inglés), mientras que las piezas estructurales se les agrega aluminio 6061, tras esto, se ejecuta un análisis de propiedades de masa y se obtiene la información mostrada en la Figura 3.2, en esta se destaca el peso del robot, el cual es de 1537.01 gramos, aproximadamente 63 gramos menos que el peso real, esta diferencia en los pesos se atribuye al peso de las demás piezas que no se incluyen en la simulación, como son los cables, tornillos y tuercas, puesto que en el kit del robot se incluyen más de 300 tornillos de diferentes tipos.

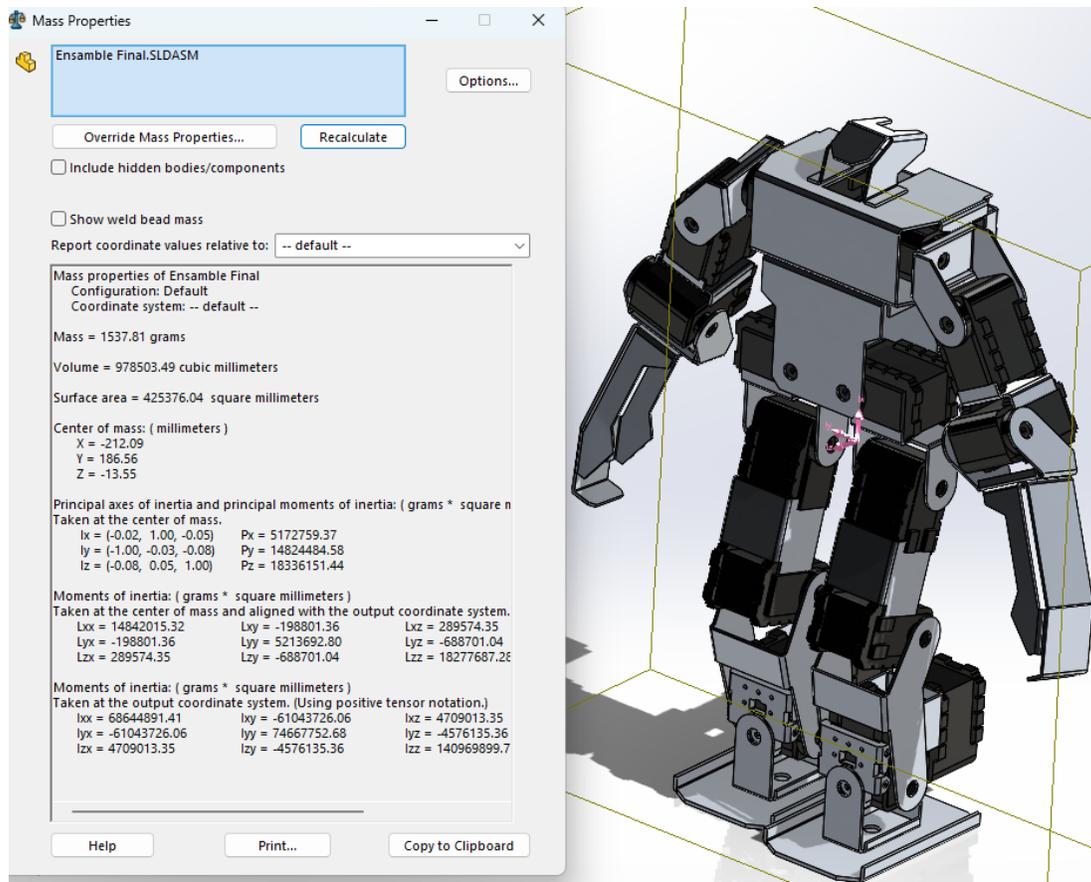


Figura 3.2. Robot simulado con los materiales agregados y el análisis de propiedades de masa.

A pesar de los distintos pesos entre ambos modelos, la diferencia es mínima, además de que el análisis a realizar se hará mediante posiciones de los servomotores y no por el torque de los mismo, por lo que es posible ignorar dichas diferencias, dado que en la simulación en Matlab no existirá una diferencia importante que afecte el uso del modelo de Simscape.

Con el modelo creado y simulado, se hace uso de la herramienta “Simscape Multibody Link” para obtener el archivo “Ensamble Final.xml”

### 3.2. Vinculación a Simulink

Para crear el modelo en Simulink se inicia Matlab y se escribe el siguiente comando:

Smimport ("Ensamble Final.xml")

El cual permite la generación del archivo de Simulink, el diagrama de bloques consta de 78 bloques diferentes, distribuidos de diferentes formas, para simplificar la vista se hace uso de la herramienta “Subsistemas” con lo cual



que ajustar los parámetros de los bloques Revolute de forma manual, con la finalidad de que se adapten al modelo original, ejemplo de esto es la Figura 3.4, donde el valor del ángulo inicial se puso de forma manual en 180°, otros parámetros configurables de la pieza abarcan desde la configuración de la posición inicial de la pieza, la velocidad inicial, las mecánicas internas, los límites de movimiento, el motivo de movimiento que puede ser por torque o computado por el sistema, así como las opciones de que el movimiento se haga automático, o bien, se realice mediante valores de entradas dados por el usuario.

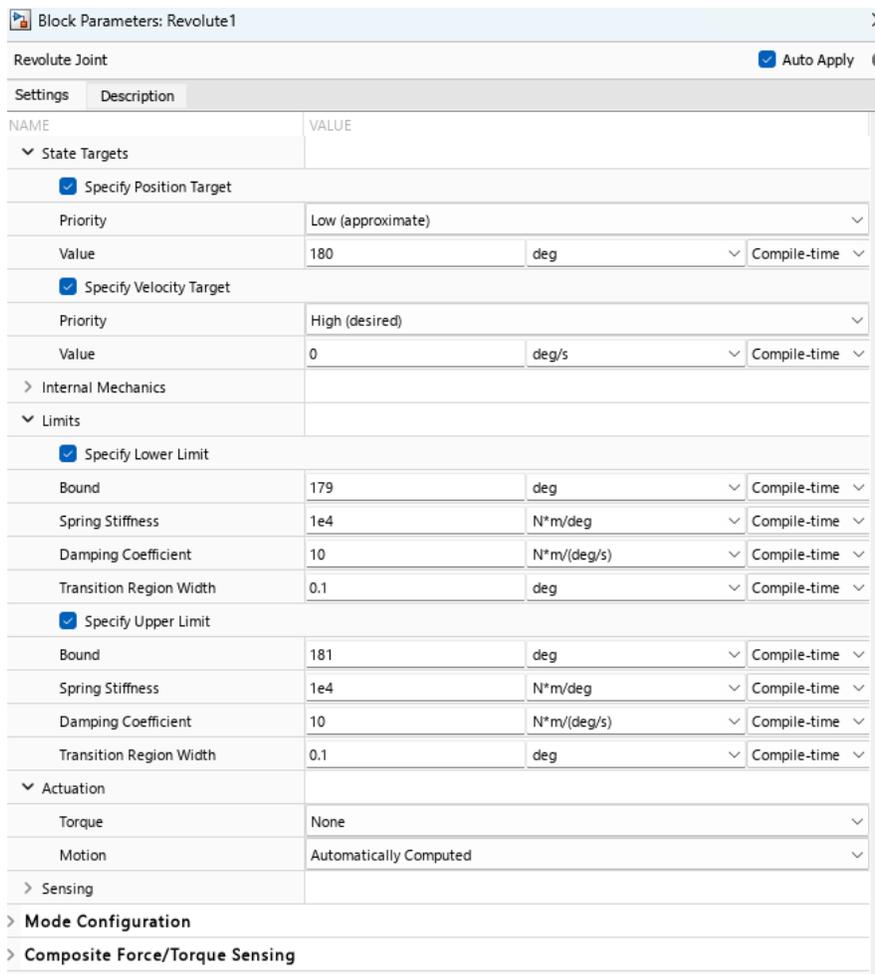


Figura 3.4. Menú de parámetros de un bloque “Revolute”.

### 3.3.1: Diagrama de bloques de los brazos.

La cadena cinemática del brazo consta de 4 piezas, 3 servomotores y 3 Revolute, un bloque Revolute correspondiente para cada uno de los servomotores, lo que le permite girar y dar movimiento a la cadena cinemática, dado que ambos brazos son idénticos, ambas cadenas cinemáticas también lo son, y el orden de estas se componen por un servomotor, la pieza denominada “Brazo”, un segundo servomotor, la pieza

“Codo”, el tercer y último servomotor, y al final la segunda pieza “Brazo” que conecta el servomotor con el “Antebrazo”, esta estructura se observa en la Figura 3.5.

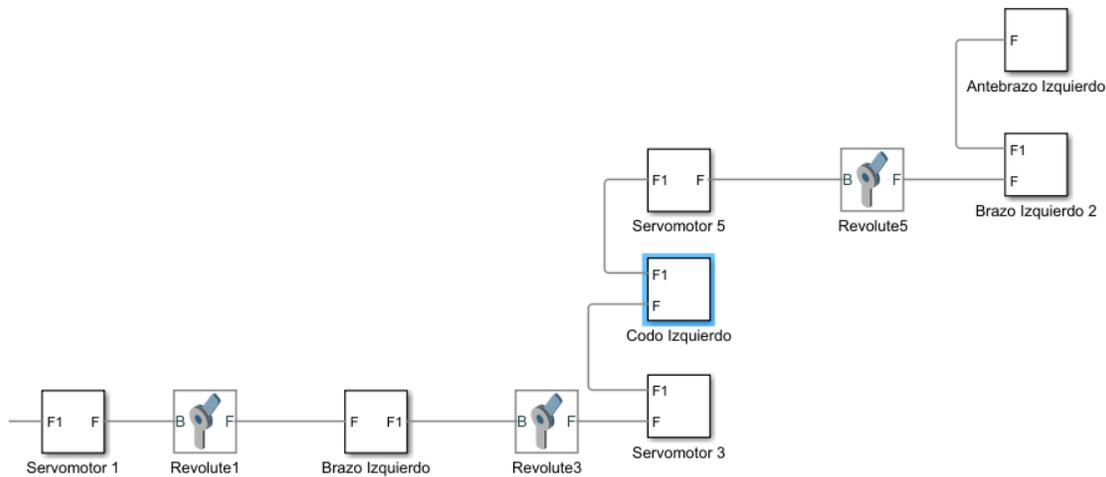


Figura 3.5. Diagrama de bloques del brazo izquierdo.

Con la cadena cinemática creada como diagrama de bloque, se requiere controlar el movimiento de cada una de las articulaciones, para lograr esto se puede controlar el movimiento por la acción de un torque, o bien

### 3.3.2: Diagrama de bloques de las piernas.

Por su parte, la cadena cinemática de la pierna lleva una estructura similar a la del brazo, en la cual se inicia con un servomotor, que conecta el “torso” con la “cadera”, después hay otro servomotor que conecta la “cadera” con el “muslo”, un tercer servomotor cuya función es conectar el “muslo” y la “pierna”, aquí se presenta la diferencia con el brazo, puesto que hay un cuarto servomotor que conecta con la “pantorrilla” y con la “placa gris”, el camino de la placa nos lleva directamente con el “tobillo”, mientras que la “pantorrilla” se conecta con el quinto y último servomotor, el cual se reincorpora al “tobillo”, esta división se hace por la forma en que está ensamblado el Bioloid GP, finalmente, la cadena termina con el eslabón “Pie”, esta descripción se observa en la Figura 3.6.

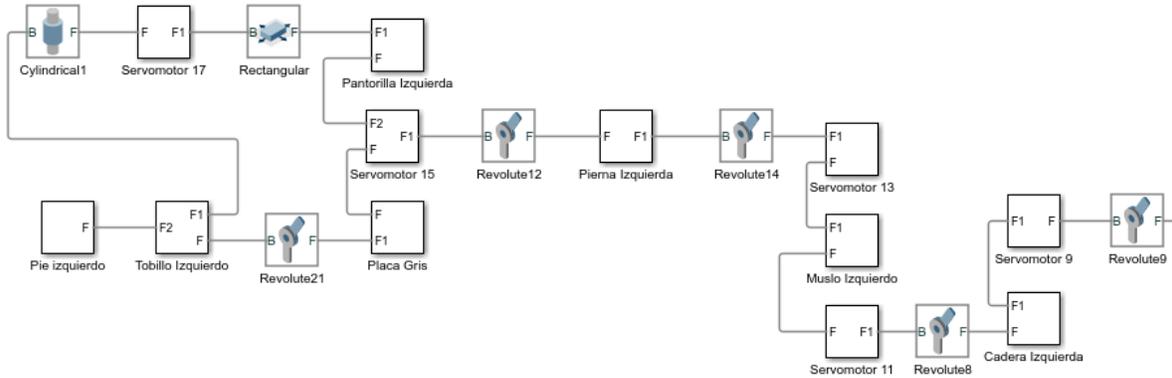


Figura 3.6. Diagrama de bloques de la pierna izquierda.

### 3.3.3: Proceso de simulación

Tras realizar unas modificaciones en las posiciones iniciales de ciertas piezas con la finalidad de que se encuentren bien orientadas, se procede a correr la simulación en la opción “Run” del menú “Simulate”, para obtener el modelo del robot en Matlab.

Para lograr un control de las articulaciones existen 2 métodos diferentes, el primero de ellos es por torque, y el segundo por movimiento, estas configuraciones corresponden al menú “Motion” de las Revolute Join, puesto que permite controlar como será el movimiento de esa articulación, así como la forma en que le dará esa información, de modo que se compute automáticamente o se provea el valor por una entrada.

En el desarrollo de esta tesis se hará uso de la segunda opción, de modo que el torque se calculará de forma automática, y se dará una señal de entrada que genere el movimiento de cada una de las articulaciones del robot, se resalta que cada articulación requiere una señal propia, puesto que es la combinación de diferentes valores y tiempos, la que permite la ejecución de secuencias de movimientos.

Con la finalidad de introducir la señal a la revolución, se hace uso de los bloques “Simulink-PS Converter”, el cual permite ingresar la señal a la articulación, en este bloque es necesario definir que la unidad de señal de entrada serán los grados. Posteriormente se agrega un bloque de señal sinusoidal, la configuración de esta señal será la que nos permita obtener el movimiento de la articulación, para ellos es necesario inicializar el valor de la opción “Bias” en el mismo valor que la posición inicial del bloque Revolute, esto con la finalidad de que la posición inicial del robot, sea la misma en la cual se iniciará el movimiento que se ejecutará, por su parte, la opción

“Amplitud” indica el valor de la variable, que en este caso, al emplear grados, indicará los grados que se mueve en ambos sentidos, este valor es el equiparable al valor de los servomotores en el robot físico; por último la opción “frecuencia” es que la que permite definir qué tan rápido se ejecutará el movimiento, puesto que en caso de que se haga a una velocidad excesiva, el movimiento se repetirá hasta que el tiempo de la simulación termine, para configurar la duración del movimiento de mejor modo se emplea la ecuación:

$$f = \frac{2\pi}{n}$$

Donde  $n$  define la velocidad del movimiento,  $f$  es la frecuencia del movimiento y denominaremos  $T$  al tiempo de la simulación en Simulink, así mismo, es importante definir que un “ciclo” es la ejecución de un movimiento de una articulación, que termina cuando el movimiento ha regresado a la posición inicial, luego de haber pasado por las posiciones  $+A$  y  $-A$ , por su parte, un medio ciclo ocurre cuando el movimiento llega a  $\pm A$  y retorna a la posición inicial, mientras que en un cuarto de ciclo, el movimiento solo llega a la posición indicada, es importante definir estos conceptos, puesto que con ellos es que será posible entender la programación de cada movimiento del robot, para calcular de forma correcta el número de ciclos que se realizarán durante todo el tiempo de simulación, se tienen los siguientes casos:

- Si  $n$  es igual  $T$ , el movimiento ejecutará un ciclo.
- Si  $n$  es diferente de  $T$ , el movimiento ejecutará  $T/n$  ciclos durante la simulación.

En caso de que un movimiento se requiere ejecutar después de otro (que no se ejecuten al mismo tiempo), es necesario incluir un delay, el cual tendrá como valor inicial el valor en grados de la posición inicial del robot, mientras que el valor del delay corresponderá al momento, en el tiempo de la ejecución de Simulink, que se requiere que inicie, de modo que, si tenemos un delay de 3 segundos, esta se ejecutará a los 3 segundos de haber iniciado la simulación en Simulink y Simscape.

Por último, es necesario implementar una base donde el robot ejecutará los movimientos, esto se hace creando un plano, añadiéndolo al sistema de colisiones, y posicionándolo por debajo de los pies del robot, además, para evitar una caída al vacío del robot, se emplea el bloque “Spatial Contact”, el cual va a permitir crear colisiones entre el suelo y todas las piezas del robot Bioloid GP, excluyendo la cabeza, las partes de la batería y la espalda, esta decisión de no incluirlas se debe a que son piezas que difícilmente

impactarán con el suelo, además de que no incluirlas permite mejorar ligeramente la simulación en términos computacionales.

Tras estos añadidos, los diagramas de bloques finales se muestran en las siguientes Figuras:

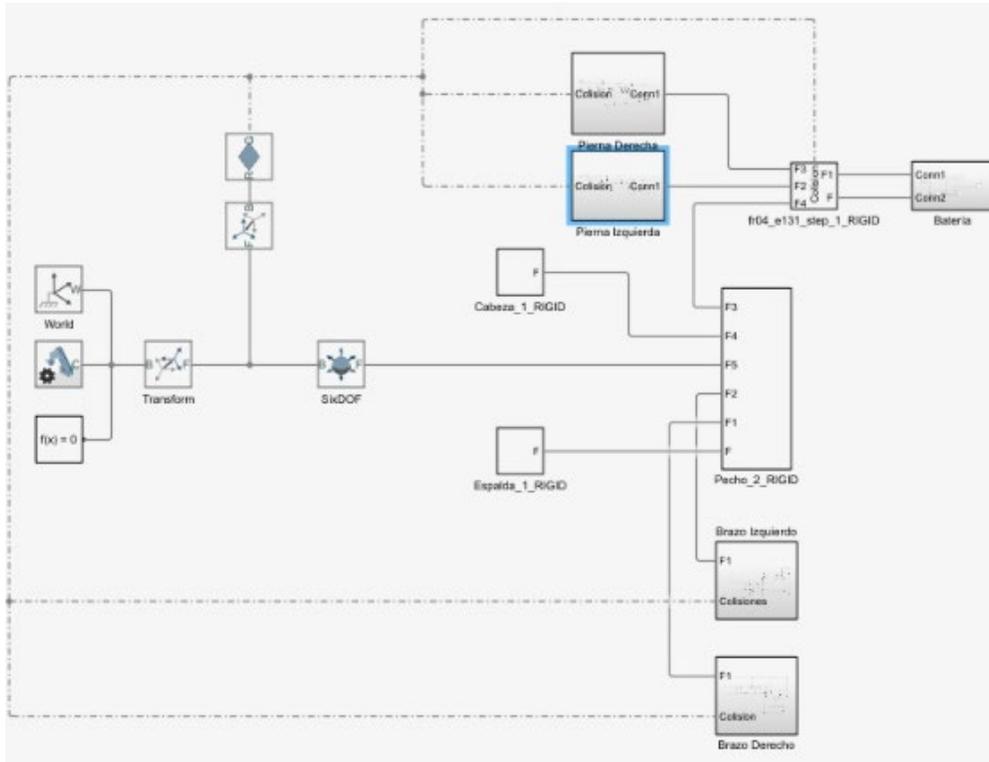


Figura 3.7. Diagrama de bloques final del robot Bioloid GP.

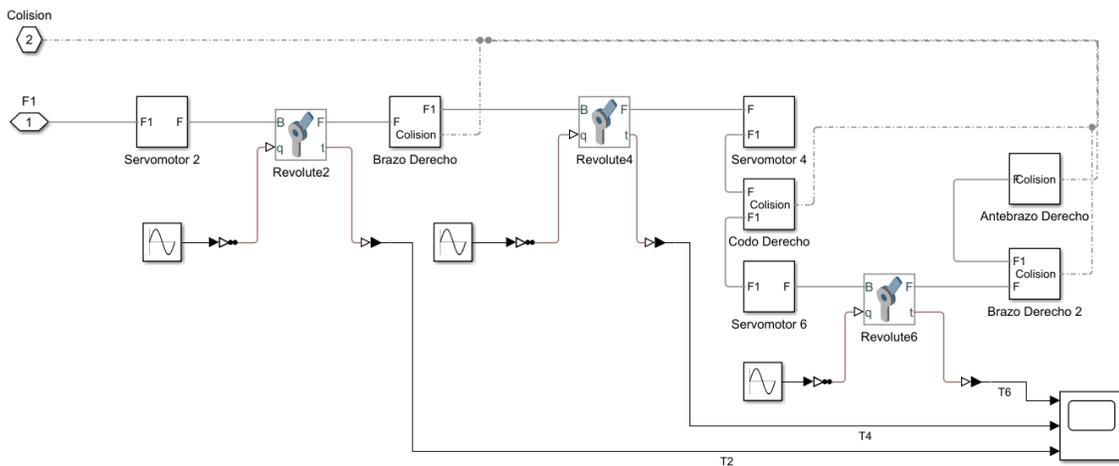


Figura 3.8. Diagrama final del brazo derecho.

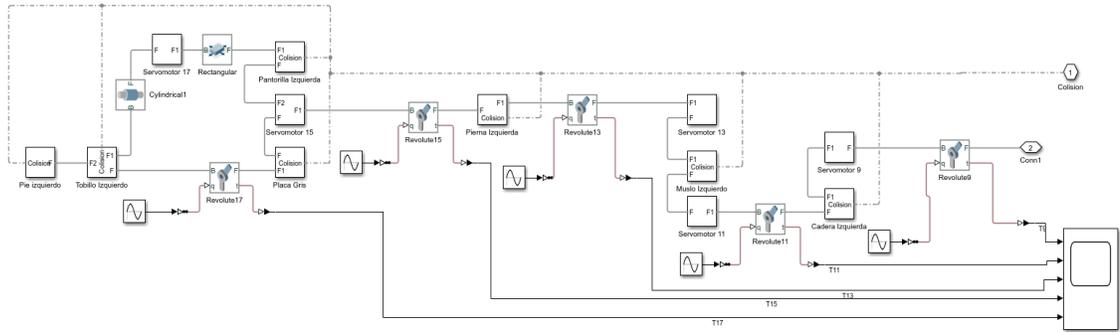


Figura 3.9. Diagrama final de la pierna izquierda.

Los diagramas del brazo izquierdo y la pierna derecha se omiten, al ser prácticamente idénticos a sus contrapartes. En la Figura 35 se observa la posición inicial del robot, a partir de esta se iniciarán la mayoría de los movimientos.

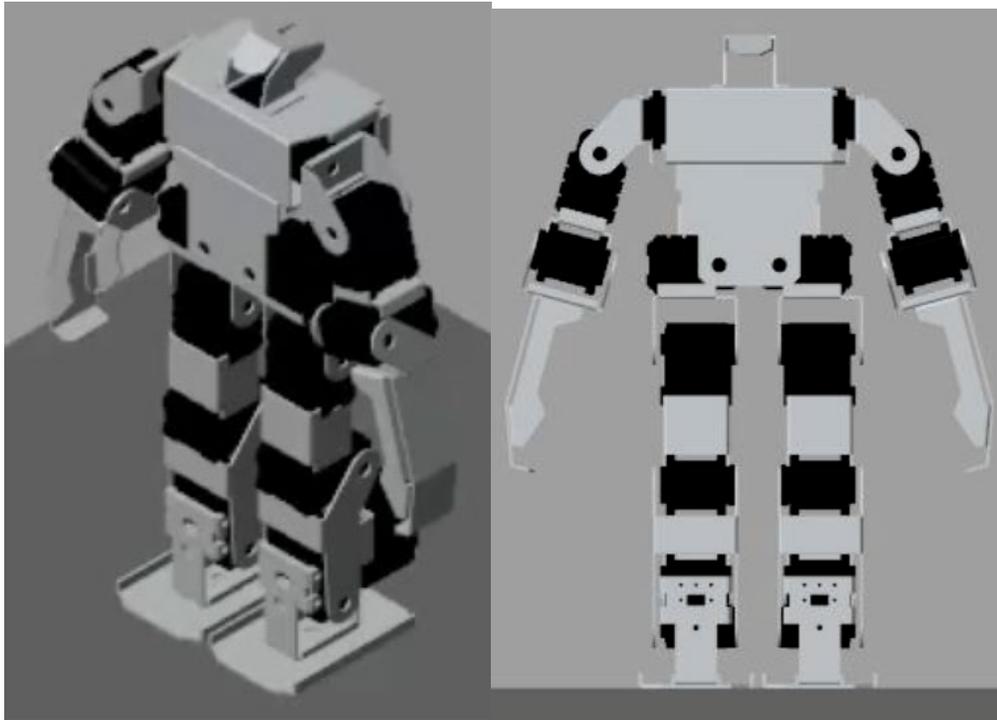
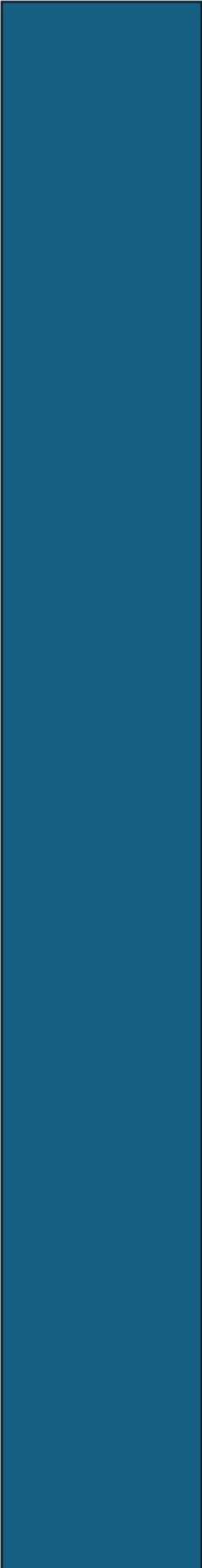


Figura 3.10. Posición inicial del Bioloid GP simulado.

Los valores correspondientes a esta posición inicial se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los servomotores en la posición inicial del robot.

# de Servomotor	Subsistema	Bias
1	Brazo Izquierdo	180
3		195
5		180
2	Brazo Derecho	0
4		15
6		0
9	Pierna Izquierda	90
11		-90
13		180
15		-90
17		90
10	Pierna Derecha	-90
12		-90
14		0
16		-90
18		90



## CAPÍTULO IV

# Creación de movimientos

4.1 Generación de movimientos simples

4.2 Generación de movimientos avanzados

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

## Capítulo 4. Creación de Movimientos.

### 4.1. Generación de movimientos simples.

Los movimientos simples son aquellos en los que únicamente se emplea una cadena cinemática (un brazo o una pierna), o bien, donde se emplean 2 cadenas cinemáticas, pero se limite el uso de servomotores a 6. Se tratan de movimientos que tiene como fin ejemplificar el funcionamiento de cada uno de los bloques, identificar los distintos servomotores y analizar la cinemática del robot, por lo que estos movimientos se limitan a llevar al robot a una pose específica.

La biblioteca de movimientos básicos se compone de 6 movimientos, cada uno se describe a continuación:

#### 4.1.1: Levantamiento brazo derecho.

El primer movimiento involucra exclusivamente al brazo derecho, en este se controlan los 3 servomotores de dicha extremidad, permitiendo visualizar el funcionamiento de cada articulación, el movimiento simula un saludo, o una flexión del bíceps, los valores para los servomotores 2, 4 y 6 se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de los servomotores para levantar el brazo derecho.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia
5 segundos	2	Brazo Derecho	-90	0	$2\pi/10$
	4		90	15	$2\pi/10$
	6		-90	0	$2\pi/10$

#### 4.1.2: Golpe

El movimiento del golpe emplea exclusivamente al brazo izquierdo, este movimiento permite analizar las distintas velocidades que pueden tomar las articulaciones, así como ejemplificar el funcionamiento del bloque delay, de modo que un movimiento no se ejecute hasta cierto punto de la simulación, los valores correspondientes para los servomotores 1,3 y 5 se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 2. Valores de los servomotores para levantar el brazo derecho.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
5 segundos	1	Brazo Izquierdo	90	140	$2\pi/10$	0
	3		40	220	$2\pi/5$	0
	5		-80	330	$2\pi/5$	2.5

#### 4.1.3: Guardia.

La posición de Guardia involucra el movimiento de los 6 servomotores de los brazos, así como el uso del bloque delay en el servomotor 6, el movimiento consiste en ubicar los brazos en una posición de guardia de un arte marcial, el brazo izquierdo se encuentra por delante para cubrir mayor área del cuerpo, mientras que el derecho está más atrás, preparando un golpe. En la Tabla 4 se enlistan los valores configurados para cada articulación:

Tabla 4. Valores de los servomotores para la posición Guardia.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
5 segundos	1	Brazo Izquierdo	30	180	$2\pi/20$	0
	3		-20	195	$2\pi/10$	3
	5		120	180	$2\pi/20$	0
	2	Brazo Derecho	30	0	$2\pi/20$	0
	4		0	15	$2\pi/20$	0
	6		-170	0	$2\pi/20$	0

#### 4.1.4 Pose de Victoria

Para ejecutar este movimiento se emplean ambos brazos, concretamente los primeros 4 servomotores, el movimiento consiste en levantar los brazos y dejarlos inclinados hacia adelante, así como abrirlos ligeramente, con la finalidad de que el espacio entre los brazos sea mayor al que existe entre los hombros.

Dado que únicamente son los brazos los que se emplean en este movimiento, las articulaciones de las piernas no sufren ningún cambio,

por lo tanto, las modificaciones en cada articulación se enlistan en la Tabla 5:

Tabla 5. Valores de los servomotores activos en la Pose de Victoria.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia
3 segundos	1	Brazo Izquierdo	170	180	$2\pi/6$
	3		25	200	$2\pi/6$
	2	Brazo Derecho	-170	0	$2\pi/6$
	4		25	15	$2\pi/6$

#### 4.1.5: Equilibrio de pies

Este movimiento tiene por objetivo controlar los servomotores 15 y 16 del robot, en este movimiento el pie izquierdo se inclina apoyándose en la parte trasera del mismo, mientras que el pie derecho se apoya de la parte delantera, emulando un movimiento de punta y talón en un ser humano, la pose inicial de este movimiento es diferente al resto, puesto que el robot se encuentra con una separación mayor entre sus piernas, en la Tabla 6 se enlistan los valores de las articulaciones que se mueven,

Tabla 6. Valores de los servomotores activos en la Pose de Victoria.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia
5 segundos	15	Pierna Izquierda	10	-90	$2\pi/10$
	16	Pierna Derecha	10	-90	$2\pi/10$

#### 4.1.6: Pararse en un pie

Para lograr que el robot se pare de pie es necesario inclinar el pie que sostendrá el peso, esto debido a que, al levantar la pierna, el peso del robot lo vence y provoca su caída, por ello se inclina último servomotor en dirección opuesta a la pierna al levantar, este último movimiento requiere de un delay para evitar la caída del robot, la configuración dada a las articulaciones que se moverán se enlistan a continuación:

Tabla 7. Valores de los servomotores activos en la Pose de Victoria.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia
5 segundos	9	Pierna Izquierda	10	90	$2\pi/8$
	16	Pierna Derecha	15	90	$2\pi/10$

## 4.2. Generación de movimientos avanzados.

### 4.2.1: Desplante lateral

En este primer movimiento, el robot mueve su pierna izquierda de manera diagonal hacia adelante y a la izquierda, llegando a un punto, llegada a cierta posición el robot regresa la pierna a su posición original y por la fricción el robot se mueve unos pasos hacia la izquierda, la secuencia emplea un servomotor de la pierna derecha, el cual mantiene en un pie el robot, dado que si este movimiento no se ejecuta, el robot perdería el equilibrio, por su parte, la pierna izquierda emplea los 3 primeros servomotores de la cadena cinemática, esto genera el movimiento de la pierna hacia afuera y hacia adelante al mismo tiempo, así como flexionar ligeramente la rodilla, al llegar a la posición, el robot se reincorpora, con un cambio en su posición inicial, la lista de valores de las articulaciones empleadas se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de los servomotores activos en el desplazamiento lateral.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
10 segundos	9	Pierna Izquierda	15	90	$2\pi/36$	1
	11		20	-90	$2\pi/28$	3
	13		30	180	$2\pi/20$	5
	18	Pierna Derecha	10	90	$2\pi/20$	0

### 4.2.2: Posición de la Grulla

Este movimiento busca emular esta posición del arte marcial del kung fu, nuevamente, es necesario emplear el servomotor 17 para darle equilibrio al Bioloid GP y que sea capaz de alzar la pierna derecha, la cual comenzará a moverse transcurrido un tiempo de 4 segundos, que se da para que el robot se incline lo suficiente, por su parte, los servomotores de los antebrazos comenzará moverse al inicio de la simulación, pero comenzarán a subir hasta 1 segundo transcurrida la simulación, permitiéndole al robot el tiempo suficiente para bajarlos a la par de la pierna, la configuración para esta secuencia se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de los servomotores activos para la posición de la grulla.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
10 segundos	1	Brazo Izquierdo	130	180	$2\pi/18$	1
	5		60	180	$2\pi/20$	0
	2	Brazo Derecho	-130	0	$2\pi/18$	1
	6		-60	0	$2\pi/20$	0
	17	Pierna Izquierda	-10	90	$2\pi/20$	0
	12	Pierna Derecha	-90	-90	$2\pi/12$	4
	14		90	0	$2\pi/12$	4

#### 4.2.3: Ballet

El movimiento de ballet es una secuencia que involucra el movimiento de los brazos y las piernas, en este, los brazos se alzan a una altura media y los antebrazos se cierran, mientras que la pierna izquierda sostiene al robot debido a la inclinación del último servomotor de su cadena cinemática, mientras que la pierna derecha se flexiona para atrás, la importancia del movimiento de los brazos recae en mantener el equilibrio, los valores de las articulaciones se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de los servomotores activos para la posición de ballet.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
	1		90	180	$2\pi/40$	0

10 segundos	3	Brazo Izquierdo	-20	195	$2\pi/40$	0
	5		45	180	$2\pi/40$	0
	2	Brazo Derecho	-90	0	$2\pi/40$	0
	4		-20	15	$2\pi/40$	0
	6		-45	0	$2\pi/40$	0
	17	Pierna Izquierda	-10	90	$2\pi/40$	0
	12	Pierna Derecha	90	-90	$2\pi/20$	5
	14		45	0	$2\pi/16$	6

#### 4.2.4: Guardia y patada.

El movimiento avanzado de guardia y patada combina el movimiento simple de guardia con un movimiento de la pierna, en este, la pierna derecha se estira completamente y después regresa a su posición original, la Tabla 11 ejemplifica los valores de las articulaciones para este movimiento.

Tabla 11. Valores de los servomotores activos para el movimiento de guardia y patada.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
10 segundos	1	Brazo Izquierdo	30	180	$2\pi/20$	0
	3		-20	195	$2\pi/8$	6
	5		120	180	$2\pi/20$	0
	2	Brazo Derecho	20	0	$2\pi/20$	0
	6		-170	0	$2\pi/20$	0
	17	Pierna Izquierda	-10	90	$2\pi/25$	0
	12	Pierna Derecha	-90	-90	$2\pi/12$	4

#### 4.2.5: Inicio de flexión

En este movimiento avanzado, el robot se arroja al suelo, sosteniéndose en sus dos brazos, simulando la posición inicial del ejercicio flexión, el robot se deja caer al mover su pie de una forma brusca, que le hace perder el equilibrio, pero gracias al previo movimiento de sus brazos, es capaz de sostenerse, la Tabla 12 muestra los valores asignados a las articulaciones que permiten este movimiento.

Tabla 12. Valores de los servomotores activos para llegar a la flexión.

Tiempo de la simulación (T)	# de Servomotor	Subsistema	Amplitud	Bias	Frecuencia	Delay (seg)
10 segundos	1	Brazo Izquierdo	90	180	$2\pi/40$	0
	3		-30	195	$2\pi/40$	0
	2	Brazo Derecho	-90	0	$2\pi/40$	0
	4		-30	15	$2\pi/40$	0
	15	Pierna Izquierda	60	-90	$2\pi/12$	4



## CAPÍTULO V

# Resultados

5.1 Librería de  
movimientos simples

5.2 Librería de  
movimientos avanzados

5.3 Comparación de  
movimientos entre el  
robot virtual y el robot  
físico

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

## Capítulo 5. Resultados.

Tras la configuración de los distintos movimientos y secuencias, se debe de verificar que estos realicen el movimiento esperado, para ello se ejecuta cada una de las simulaciones, las cuales varían el tiempo de compilación entre los 5 y 30 minutos, dependiendo de la complejidad del movimiento, así como del número de puntos muestreados, y las propias físicas del diagrama de bloques.

Las secuencias se presentan en forma de imágenes donde se muestran la posición inicial de la secuencia, puntos intermedios de la simulación y la posición final que se obtiene, así mismo, se destaca que algunos de los movimientos regresan a la posición original, mientras que otros terminan al llegar a la posición deseada, en el Anexo C se encuentra un enlace a los videos capturados para cada movimiento, con la finalidad de que se observe la dinámica y cinemática del robot.

### 5.1. Librería de movimientos simples.

#### 5.1.1: Levantamiento brazo derecho.

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran los frames más importantes que permiten visualizar la trayectoria del robot, estas vistas son isométrica y frontal respectivamente, y se aprecia al robot en su posición inicial, levantando su brazo, el punto máximo de altura, y el descenso de este para retornar a su posición original.

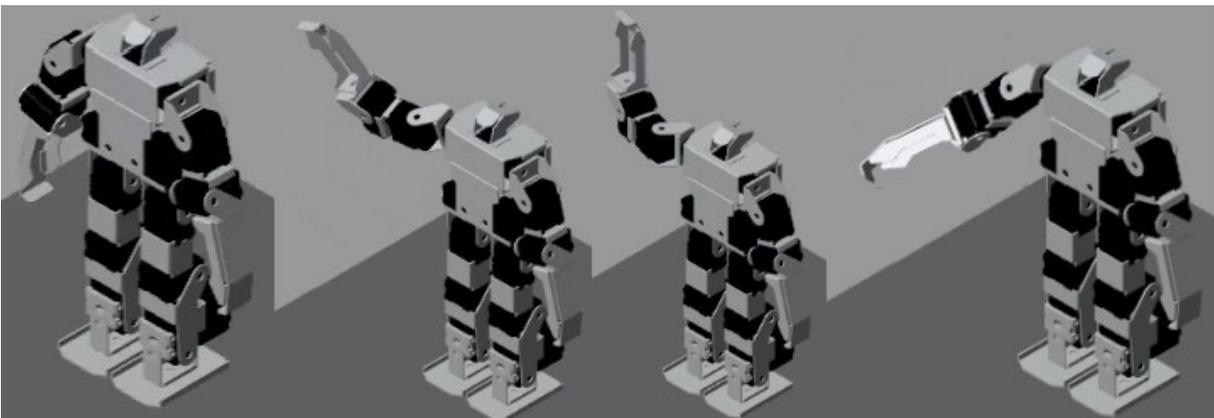


Figura 5.1. Bioid GP ejecutando la secuencia "Alzar brazo derecho" en vista isométrica.

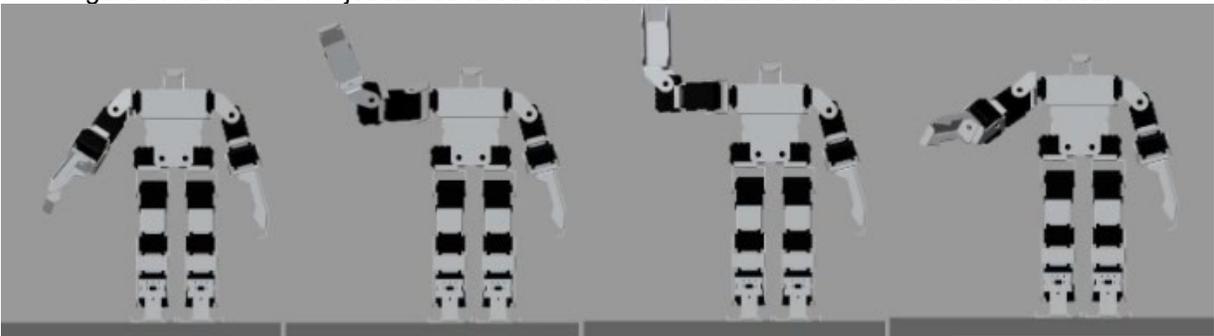


Figura 5.2. Bioid GP ejecutando la secuencia "Alzar brazo derecho" en vista Frontal.

Como se observa, el robot ejecuta la secuencia de forma correcta, generando así el primer movimiento de la biblioteca, los videos para observar el movimiento completo se encuentran en el siguiente enlace:

[Brazo Derecho Levantamiento](#)

### 5.1.2: Golpe

La secuencia del golpe involucra al brazo izquierdo, en esta la posición inicial es diferente respecto a la anterior, esto es así simular la posición inicial al lanzar un golpe, en la Figura 5.3 se observan frames de la ejecución del movimiento en vista isométrica, mientras que la Figura 5.4 contiene la visión frontal, así mismo, el enlace para visualizas el movimiento en formato de video es el siguiente:

[Golpe](#)

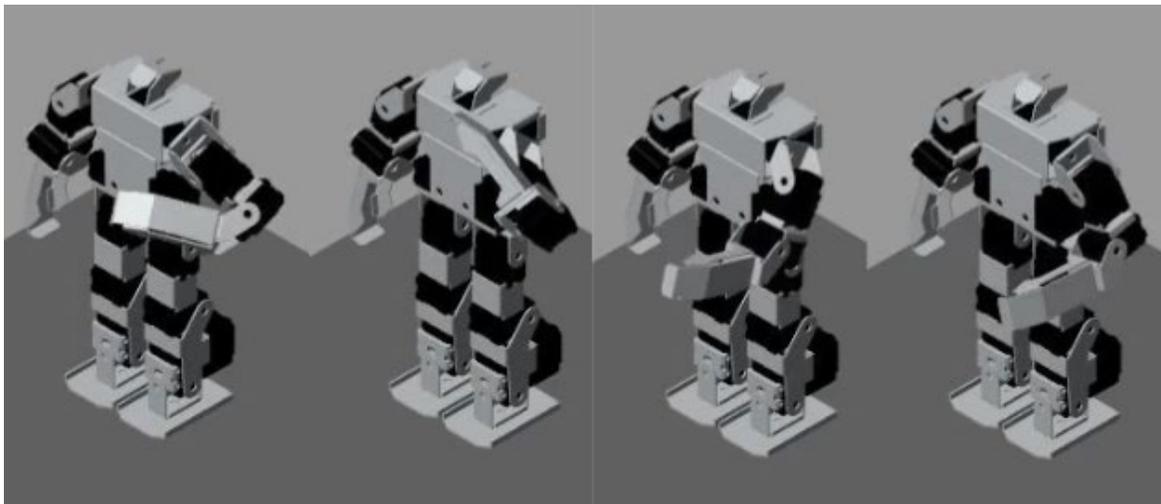


Figura 5.3. Bioid GP en la posición inicial del movimiento "Golpe".

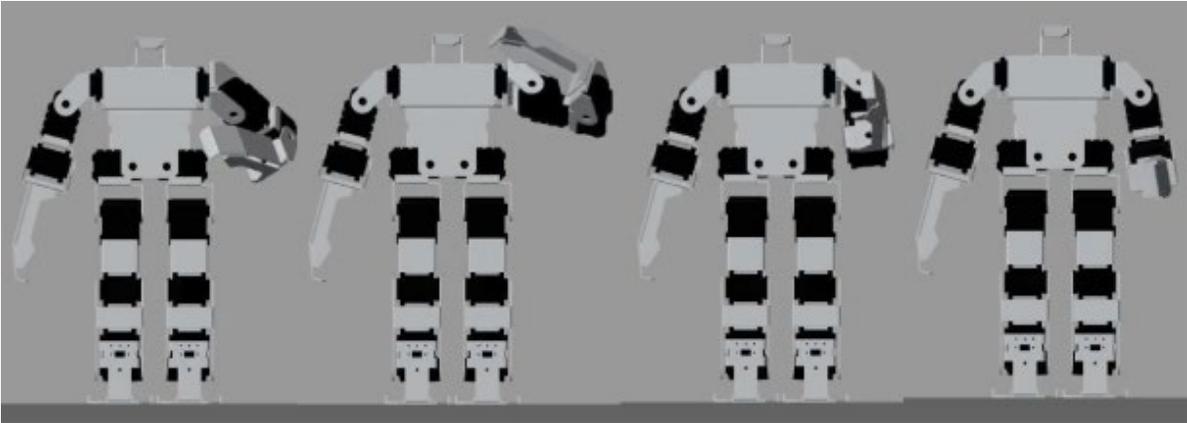


Figura 5.4. Bioloid GP ejecutando la secuencia “Golpe” en vista Frontal.

### 5.1.3: *Guardia*.

El movimiento de guardia emplea ambos brazos y se emplea un delay para uno de los movimientos de las articulaciones, la Figura 5.5 la secuencia desde una visa isométrica, mientras que la Figura 5.6 lo hace desde una vista frontal, el enlace para visualizar los videos es el siguiente:

#### [Guardia](#)

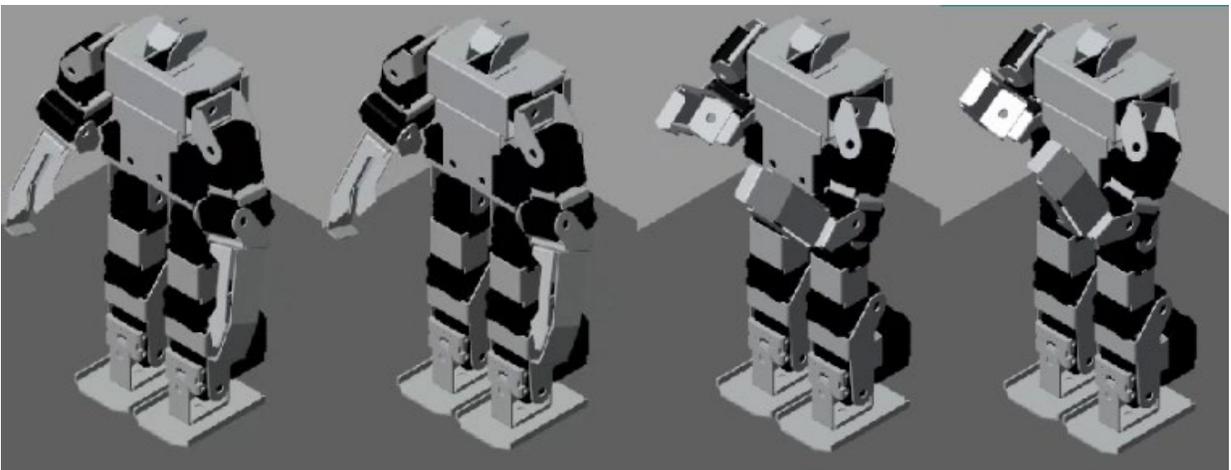


Figura 5.5. Bioloid GP en la posición inicial del movimiento “Guardia”.

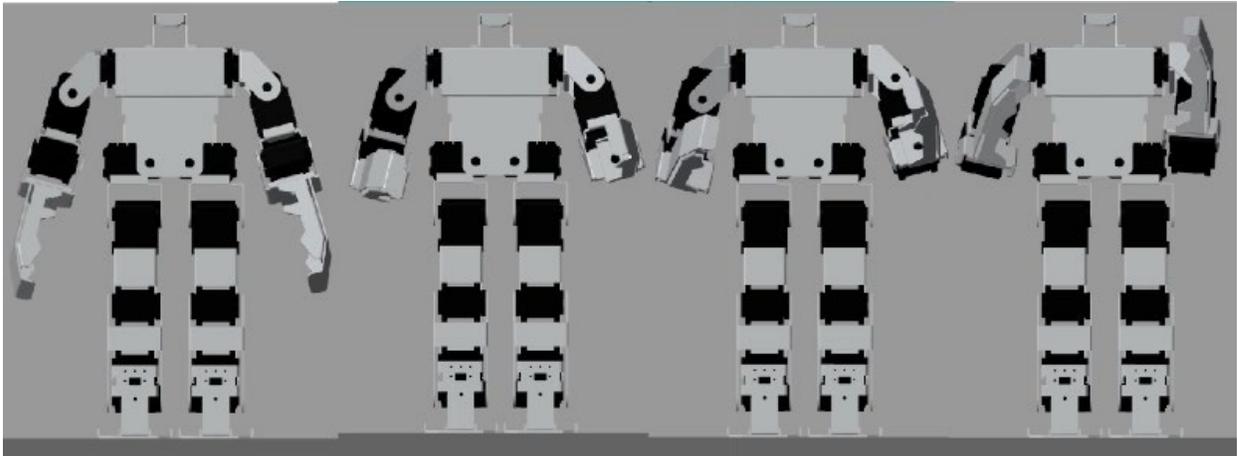


Figura 5.6. Bioloid GP ejecutando la secuencia "Guardia" en vista Frontal.

#### 5.1.4 Pose de Victoria

La pose de Victoria es el último de los movimientos que se realiza con las manos, en este se elevan los brazos y se separan ligeramente, en la Figura 5.7 se observa la trayectoria de los brazos en vista isométrica, mientras que en la Figura 5.8 se observa de frente, por su parte el acceso a los videos de las distintas vistas del movimiento es el siguiente:

#### Victoria

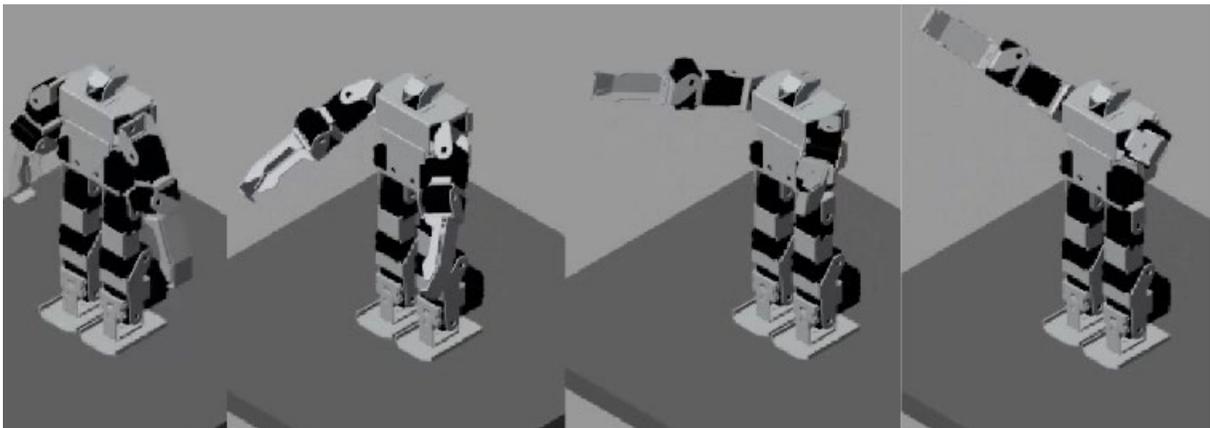


Figura 5.7. Bioloid GP ejecutando la secuencia "Victoria" en vista Isométrica.

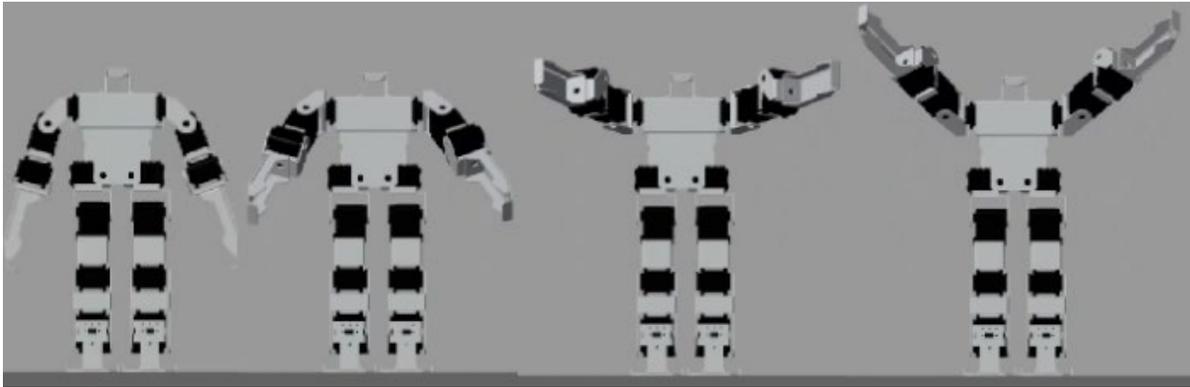


Figura 5.8. Bioid GP ejecutando la secuencia “Victoria” en vista Frontal.

### 5.1.5: Equilibrio de pies

El quinto movimiento es el primero que emplea las cadenas cinemáticas de las piernas, la finalidad de este es mostrar la interacción que existe entre el pie y el suelo en el que está el robot, analizando el comportamiento de estos cuando se intenta mover, pese a que están en contacto directo y total con el suelo, la Figura 5.9 muestra este levantamiento de los pies desde una vista lateral, mientras que la Figura 5.10 otorga una visión frontal, en la cual se aprecia la separación de las piernas, en el siguiente enlace se encuentran los videos de las distinta vistas del movimiento:

#### [Equilibrio de pies](#)

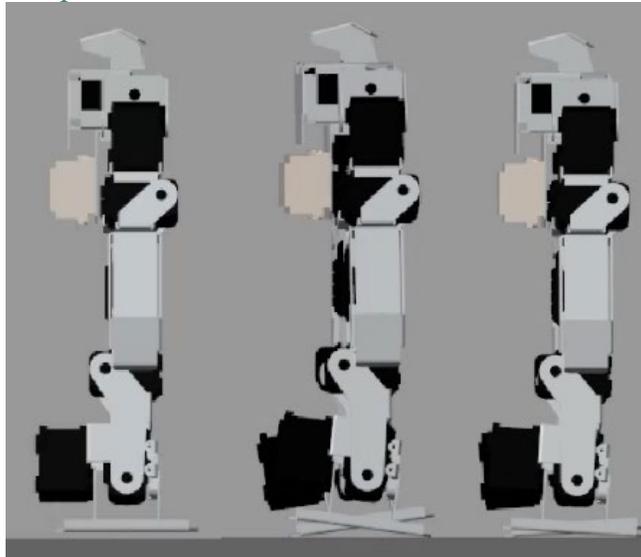


Figura 5.9. Bioid GP ejecutando la secuencia “Equilibrio de pies” en vista Lateral.

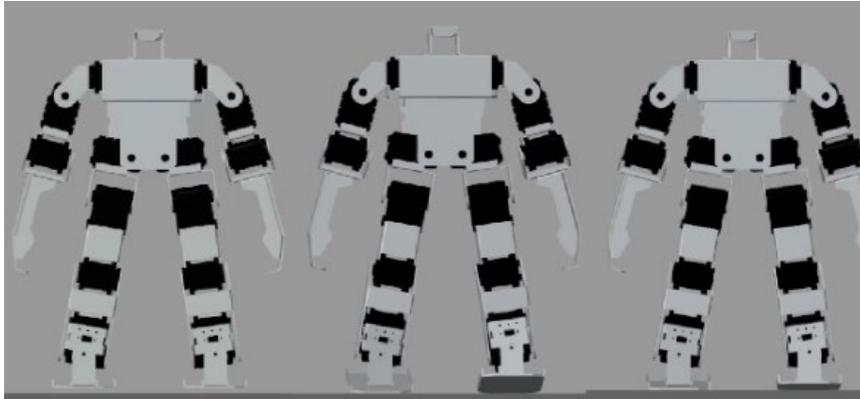


Figura 5.10. Bioid GP ejecutando la secuencia "Equilibrio de pies" en vista Frontal.

#### 5.1.6: *Pararse en un pie*

El movimiento de pararse en un pie se centra en mantener el equilibrio del robot para movimientos que requieran el desplazamiento del robot, donde el robot está inclinándose para evitar el contacto con la pierna izquierda con el suelo. Con el pie alzado, el robot procede a levantar la pierna izquierda hasta la inclinación indicada, posteriormente comienza a regresarla a su posición original, a la par el servomotor del pie de apoyo comienza a regresar, haciendo posible que el robot regrese a su posición inicial, dichos movimientos se observan en las Figuras 5.11 y 5.12, mientras que el acceso a los videos se realiza mediante el siguiente enlace:

[Pararse en un pie](#)

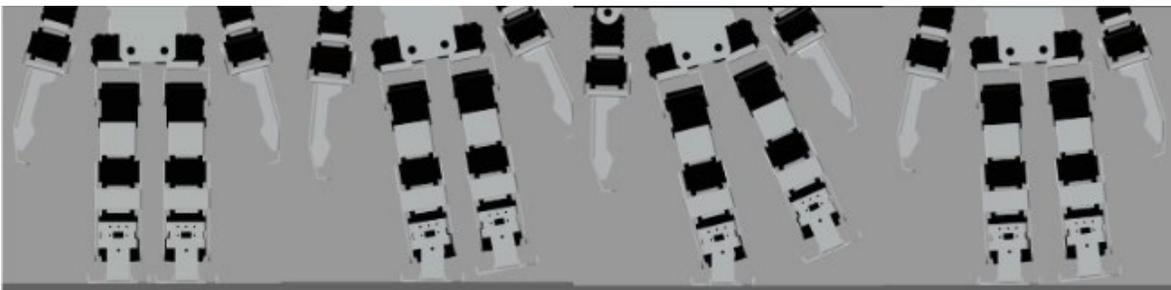


Figura 5.11. Bioid GP ejecutando la secuencia "Pararse en un pie" en vista Frontal.

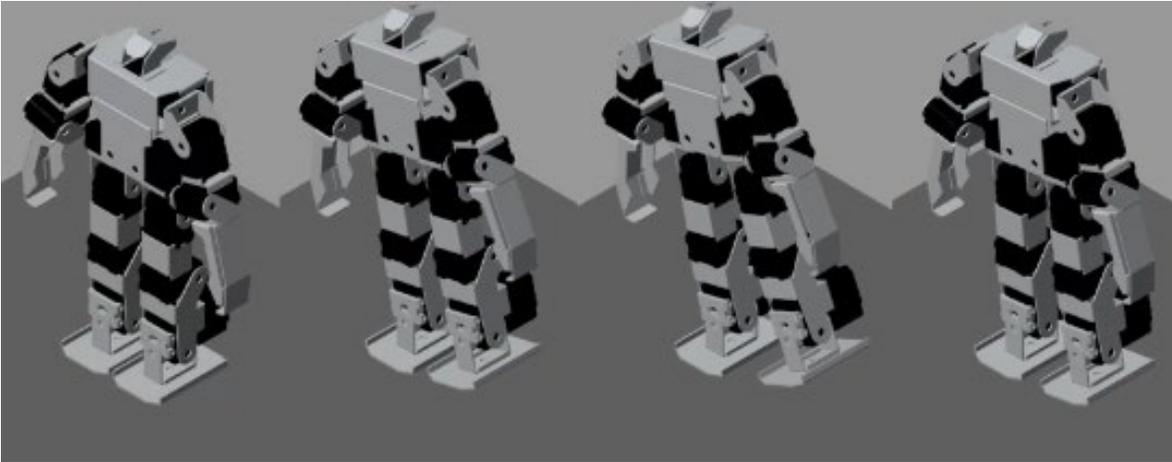


Figura 5.12. Bioloid GP ejecutando la secuencia "Pararse en un pie" en vista Isométrica.

## 5.2. Librería de movimientos avanzados.

### 5.2.1: *Desplante lateral*

El desplante lateral es el primero de los movimientos avanzados, en este el robot mueve la pierna izquierda en diagonal, hacia adelante y a la izquierda, la regresa en una posición diferente a la posición original y la fricción que se genera a partir del contacto del pie con el suelo es el que provoca el movimiento lateral, es cual provoca que el robot quede más a la izquierda y rotado a la derecha, en comparación con su posición inicial. Las Figuras 5.13 y 5.14 muestran frames de la ejecución de este movimiento en las vistas isométrica y aérea respectivamente, en ambas es posible visualizar el desplazamiento del robot, así mismo el siguiente enlace proporciona un acceso a los videos completos de este movimiento:

#### [Desplante Lateral](#)

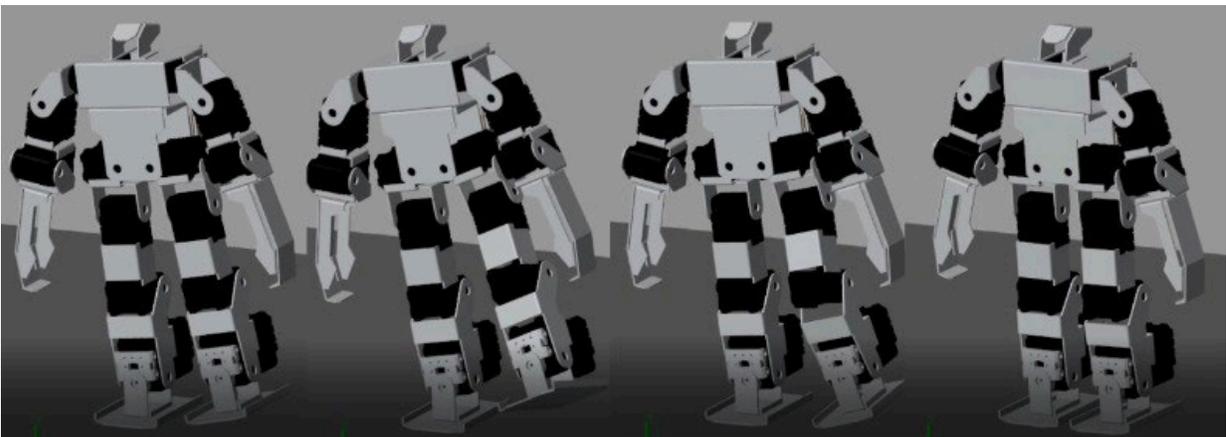


Figura 5.13. Bioloid GP ejecutando la secuencia "Desplante lateral" en vista Isométrica.

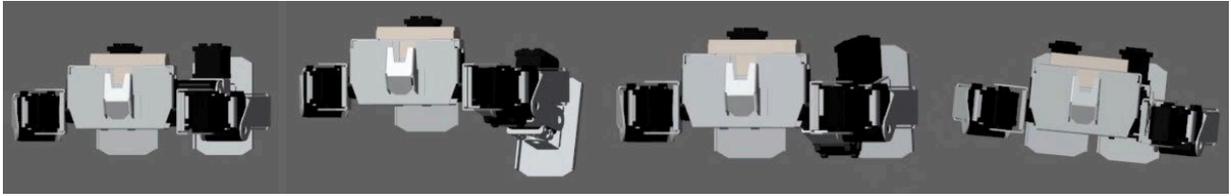


Figura 5.14. Bioloid GP ejecutando la secuencia “Desplante lateral” en vista aérea.

### 5.2.2: Posición de la “Grulla”

El movimiento de la posición de la “grulla” incorpora el movimiento de las cuatro cadenas cinemáticas, puesto que la pierna izquierda se emplea para el equilibrio del robot, la pierna derecha se flexiona, mientras que los brazos imitan la posición de artes marciales, además de funcionar como equilibrio al robot, en el movimiento observado en la Figura 5.15 de modo isométrica, y en la Figura 5.16 de forma frontal, se aprecia como el robot eleva primeramente los brazos a la par de que se inclina, mientras que la pierna derecha que es la que se flexiona se realiza unos instantes de tiempo después, esto se observa de mejor modo en los videos con diferentes vistas del movimiento, los videos se encuentran disponibles en el siguiente enlace:

#### [Posición de la Grulla](#)

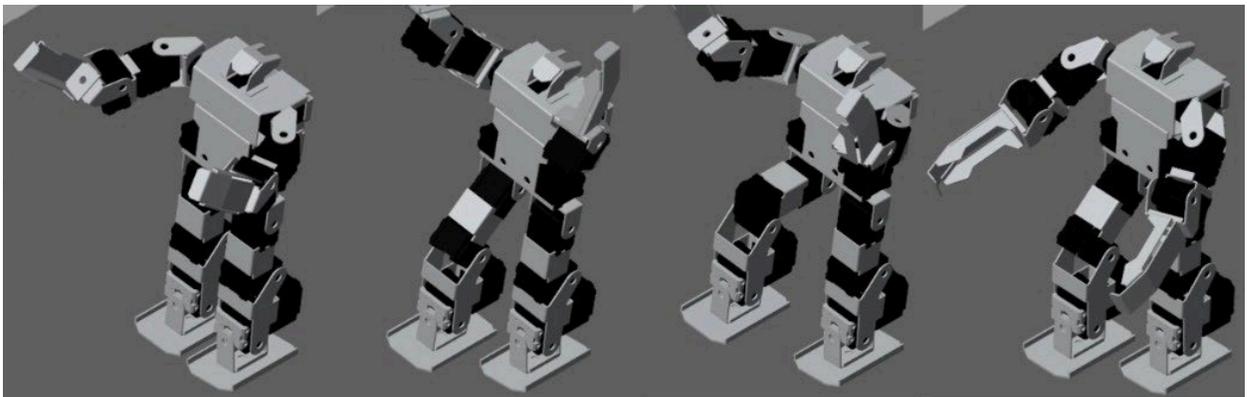


Figura 5.15. Bioloid GP ejecutando la secuencia “Posición de la Grulla” en vista Isométrica.

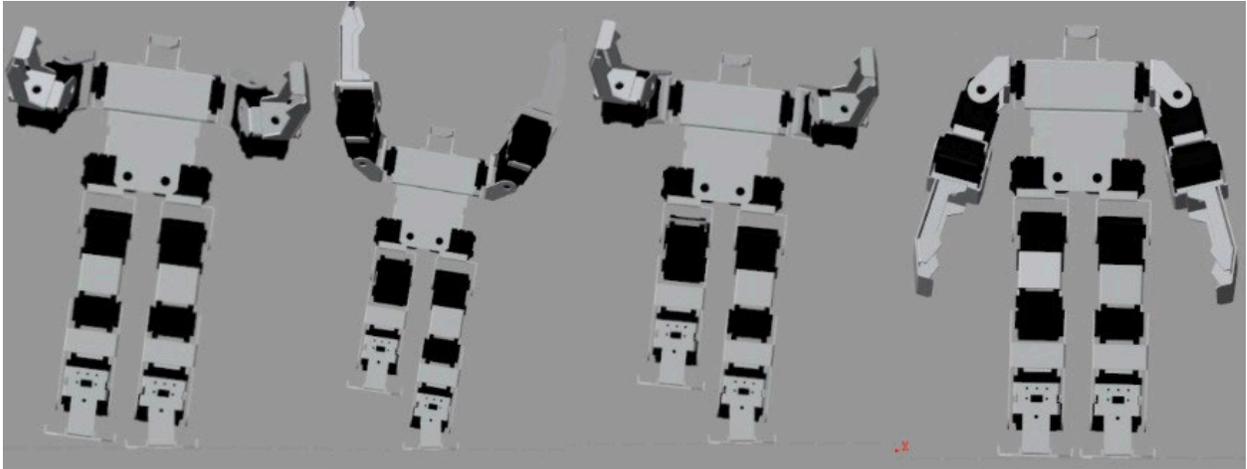


Figura 5.16. Bioid GP ejecutando la secuencia "Posición de la Grulla" en vista frontal.

### 5.2.3: Ballet

El movimiento de Ballet es otro que involucra el equilibrio y movimiento de las cuatro cadenas cinemáticas, en este, la pierna derecha hace un movimiento hacia atrás de modo que flexiona la pierna llevándola a su espalda, la función de los brazos en este movimiento es muy importante, puesto que es la que le permite al robot mantener el equilibrio, ya que en caso de no moverse el robot caería hacia atrás por el peso de la pierna, la Figura 5.17 muestra una vista isométrica del movimientos, donde se observa el movimiento completo de la pierna, por su parte, la Figura 5.18 muestra una vista aérea, la que permite apreciar la distancia que existe de la pierna hasta la espalda del robot Bioid GP, para apreciar mejor el movimiento, el siguiente enlace muestra los videos completos:

#### Ballet

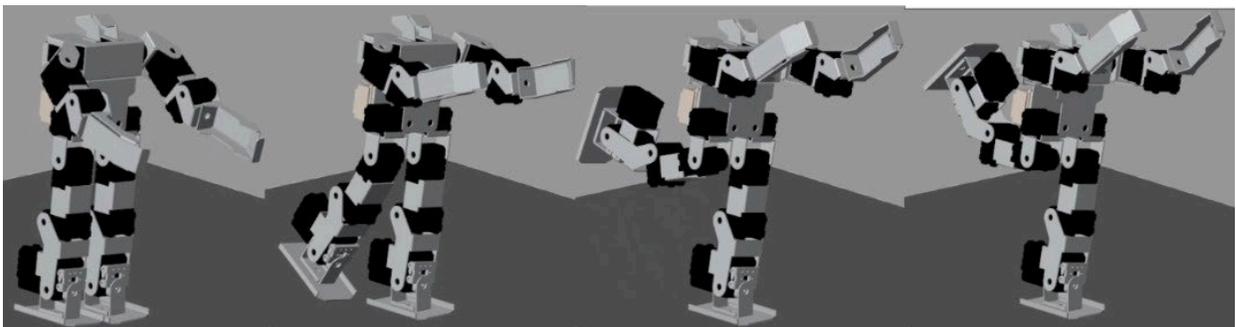


Figura 5.17. Bioid GP ejecutando la secuencia "Ballet" en vista Isométrica.

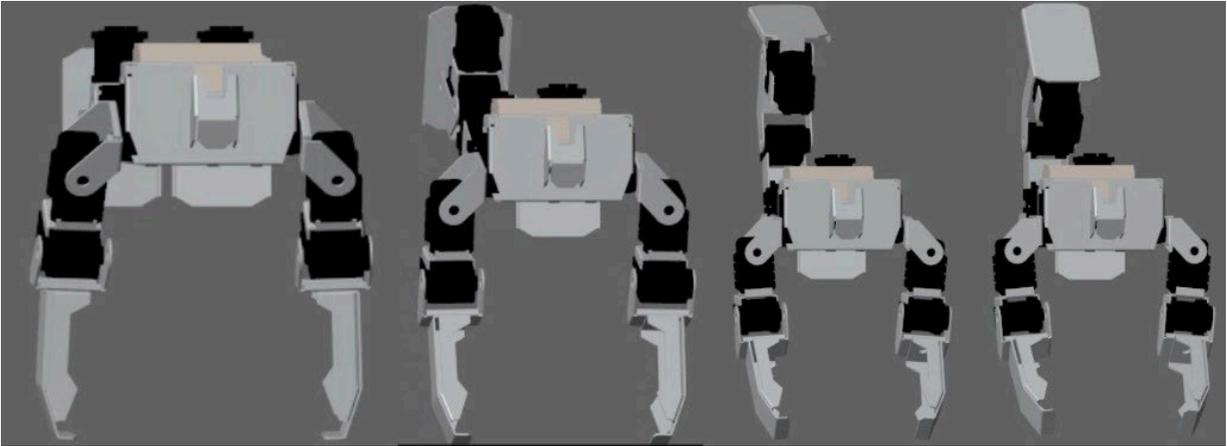


Figura 5.18. Bioloid GP ejecutando la secuencia "Ballet" en vista aérea.

#### 5.2.4: *Guardia y patada.*

La rutina de movimientos de Guardia y Patada es muy similar al de la Pose de Grulla, pero en esta ocasión los brazos repiten el movimiento simple de Guardia, mientras que la pierna se estira por completo, el equilibrio se da gracias al centro de masa del robot, el cual se ubica en su pecho y torso, lo que le permite no caerse, además, a diferencia del movimiento de Ballet, el robot no conserva esta posición al finalizar el movimiento, sino que realiza la patada y regresa a la posición original, las Figuras 5.19 y 5.20 ilustran las vistas isométricas y laterales del movimiento, donde se visualiza la extensión de la pierna durante la patada. Para visualizar este movimiento de un modo más preciso, se anexan los videos correspondientes en el siguiente enlace:

#### [Guardia y Patada](#)

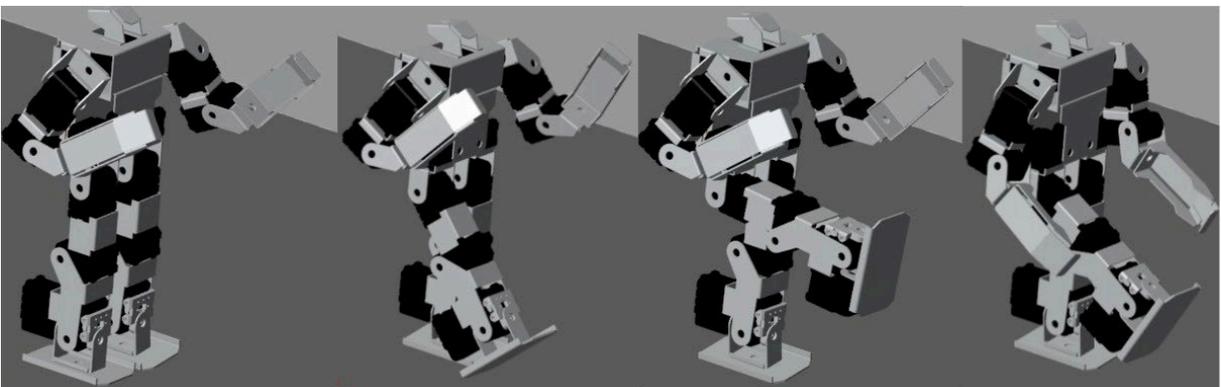


Figura 5.19. Bioloid GP ejecutando la secuencia "Guardia y Patada" en vista Isométrica.

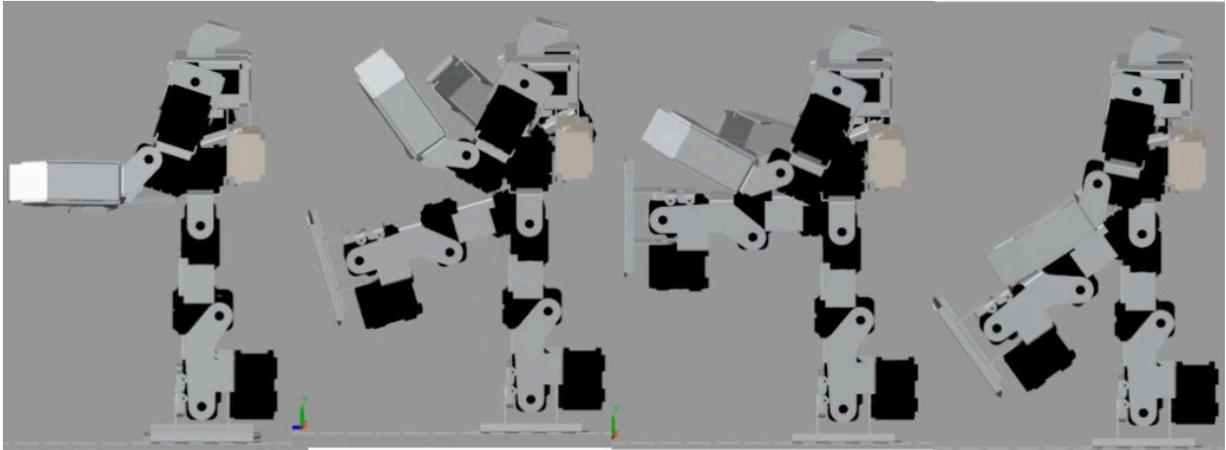


Figura 5.20. Bioid GP ejecutando la secuencia “Guardia y Patada” en vista lateral.

### 5.2.5: Inicio de flexión

El último movimiento requiere la caída voluntaria del robot, en este, el Bioid GP flexiona uno de los pies con la intención de perder el equilibrio, no sin antes mover los brazos, con los que se sostiene cuando ha caído, para que, finalmente, regrese su pie a su posición original y quede flexionado. Las figuras 5.21 y 5.22 muestran las vistas isométrica y lateral respectivamente, en ambas es posible visualizar el punto exacto en el que el robot pierde el equilibrio y comienza a caerse, así como el empleo de los brazos para sostenerse y mantener la postura. El enlace a los videos que muestran el movimiento de distintas perspectivas es el siguiente:

#### [Inicio de flexión](#)

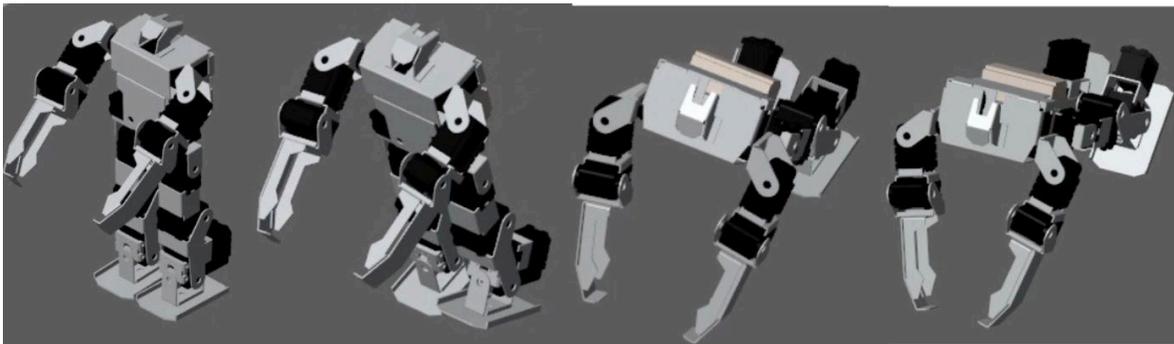


Figura 5.21. Bioid GP ejecutando la secuencia “Inicio de Flexión” en vista Isométrica.

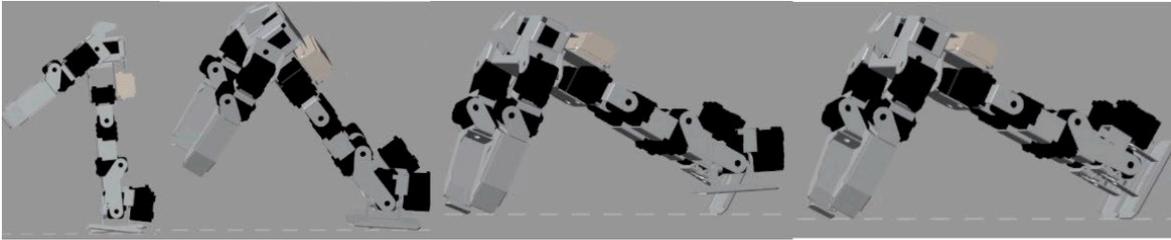


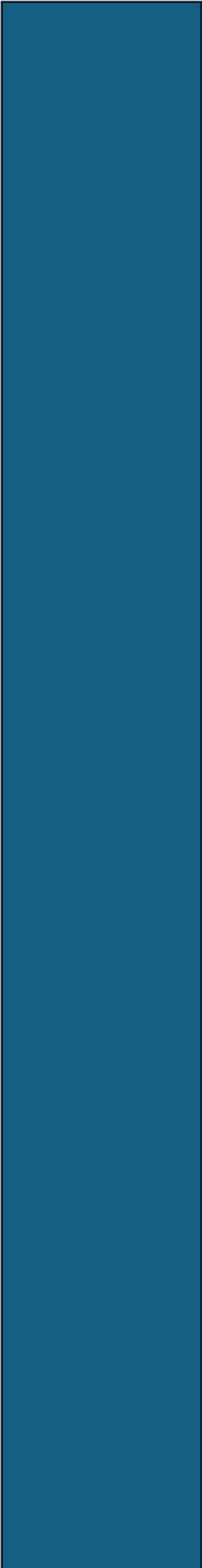
Figura 5.22. Bioloid GP ejecutando la secuencia “Inicio de Flexión” en vista lateral.

### 5.3. Comparación de movimientos entre el robot virtual y el robot físico.

Tras la creación de las librerías de movimientos que permiten entender el funcionamiento del diagrama de bloques de Simulink, se requiere verificar que los movimientos son realmente ejecutables en el robot físico, puesto que, en caso de no serlo, nuestra simulación será incorrecta, para ello se programó cada uno de los movimientos presentados en ambas librerías en el robot físico, en enlace a la carpeta que los contiene se muestra a continuación:

#### [Videos Robot Físico](#)

Con cada uno de los movimientos siendo ejecutados de forma correcta por el robot físico, es posible decir que el robot virtual funciona de forma correcta y es un gemelo virtual del robot Bioloid GP, teniendo prácticamente las mismas características que este, así como una ejecución de movimientos igual.



# CAPÍTULO VI

# Conclusiones

## 6.1 Recomendaciones

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

## Capítulo 6. Conclusiones.

En conclusión, es evidente que robot Bioloid GP simulado en el entorno de SimMechanics funciona de forma correcta, permitiendo la asignación de señales que comandan una posición específica para cada una de las articulaciones que se programaron, esto permite el movimiento de la simulación, desde una posición original hasta la posición seleccionada, a pesar de que en dicha simulación varía la velocidad de compilación, dependiendo de la complejidad del movimiento, tras un determinado tiempo estas se ejecutan de forma correcta,

La simulación permite tener una manipulación del robot notablemente más segura que al emplear el robot físico, puesto que al tener un entorno simulado donde existe una plataforma base en la cual está el robot, fuerza de gravedad y las variables como peso y densidad para cada una de las piezas, es posible visualizar la caída del robot, lo cual permite conocer que dicho valor genera una caída en el robot, el cual, si se estuviese manipulando de manera física, sufriría daños, mientras que en el entorno virtual, si bien existe la caída, no existe daño alguno. Así mismo, es importante mencionar que al realizar un movimiento muy brusco en el robot físico, el movimiento puede llevarlo a una posición irresoluble, puesto que la pieza que se mueve puede colisionar con otra y desactivar el servomotor como medida de seguridad, lo que conlleva a un reinicio del mismo, por su parte, en el entorno virtual generado, estas colisiones no se generaron, esto con la finalidad de mostrar al usuario cual es la posición que se ha programado, pero mostrando también las piezas sobrepuestas unas de otras, esto permite al usuario visualizar que existe un error en el movimiento y que requiere de introducir un valor diferente al seleccionado originalmente, valor que puede deducir a partir de la posición final en la que el robot Bioloid GP quedó, a pesar de ser una posición inexistente en el robot físico.

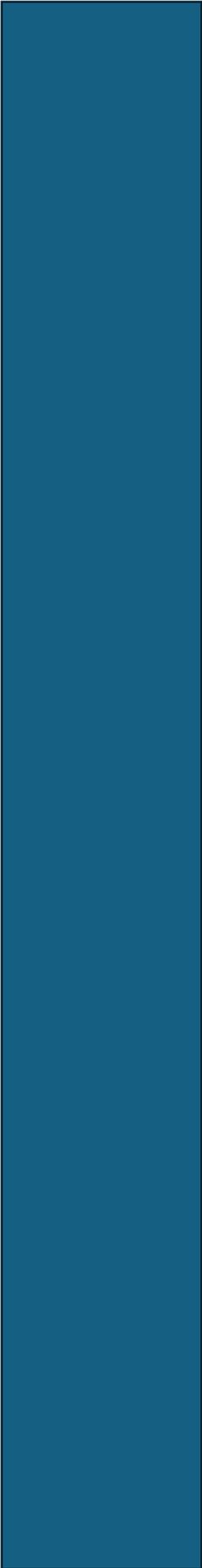
Las dos librerías de movimiento creadas permiten comprender el funcionamiento del entorno simulado, la primera que incluye movimientos simples tiene como propósito que el usuario observe las posiciones, direcciones y velocidades de trabajo para cada uno de los servomotores, así como visualizar el funcionamiento de la cadena cinemática y como un eslabón afecta la posición de los eslabones sucesivos. Otro aspecto importante es que los movimientos finales permiten entender y analizar la gravedad presente en la simulación, puesto que se tratan de posiciones en equilibrio ejecutables para el robot Bioloid GP, las cuales pueden ser variadas más allá del límite de equilibrio del robot, lo que provoca la caída de este. Por su parte, la librería de movimientos avanzados cumple el propósito de mostrar el funcionamiento de varias cadenas cinemáticas a la par, llevando al robot a posiciones complicadas, pero ejecutables en el entorno virtual, estas posiciones emplean los bloques Delay vistos en los movimientos simples de un modo más avanzado, puesto que se emplean más y en tiempos diferentes entre sí, con la finalidad de que el movimiento de diferentes cadenas cinemáticas se realice a la par, como es el caso de volver a la posición original en el movimiento de "Guardia y Patada" aun cuando el movimiento de las cadenas cinemáticas de los brazos y las piernas ocurre en momentos diferentes. La importancia del uso de los Delay recae también en que las articulaciones, sean de la misma cadena cinemática o no, colisionen entre ellas, generando un error al llegar a una posición que en un instante de tiempo no es válida, pero que en otro sí.

## 6.1. Recomendaciones.

Las recomendaciones después de esta investigación se encaminan a la sustitución del uso de la variable “Posición” en las articulaciones, mediante el empleo de “Torque”, esto con la finalidad de emular el verdadero funcionamiento de un motor, puesto que, aunque el Bioloid GP emplea posiciones para el movimiento de sus servomotores, en aplicaciones más avanzadas es el torque el que se emplea para el movimiento de motores y articulaciones de distintos sistemas robóticos, por lo que al emplearlo en la ejecución de movimientos del robot es un paso importante para el mejoramiento de los objetivos de esta investigación.

También queda a revisión la generación de trayectorias en el entorno virtual para su exportación al robot físico, de modo que la simulación sea capaz de exportar la información de movimiento de cada una de las articulaciones, sea por posición o por torque, con la finalidad de que las secuencias se realicen de manera virtual y puedan cargarse al Bioloid GP físico, como otros robots suelen emplearse (tal es el caso del NAO), esto permitirá tener un mejor control y una programación más rápida y eficaz del Bioloid, al poder emplear el entorno virtual para su programación sin la necesidad de disponerlo físicamente.

Por último, se sugiere la expansión de la metodología a otros robots, como lo pueden ser el NAO, el Lego Mindstorms V3, el Nova o el Bioloid Premium, esto con la finalidad de simular diferentes robots que conservan las características de ser humanoides y poseen cadenas cinemáticas similares entre sí por esta misma razón. La simulación y evaluación de diferentes robots permite comprender aún más las características de estos sistemas robóticos, así como su funcionamiento, permitiendo la generación de futuros robots humanoides.



CAPÍTULO VII

# Referencias

Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

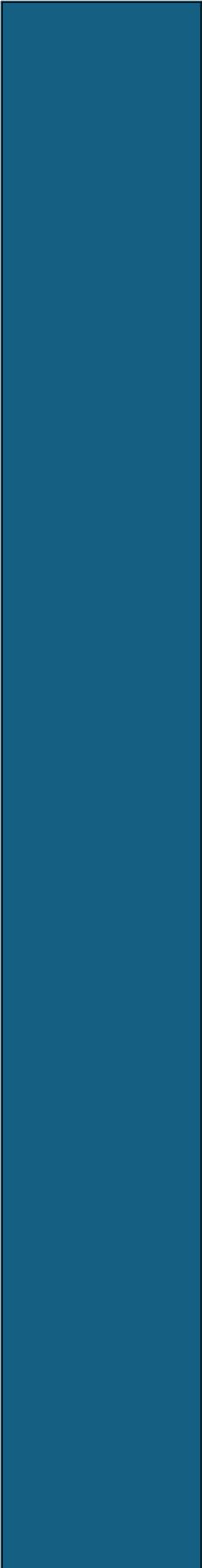
## Capítulo 7. Bibliografía.

1. Aldebarán. (2023). *NAO*. Aldebarán United Robotics Group. Recuperado el 22 de enero de 2024, de: <https://www.aldebaran.com/es/nao>
2. Autodesk. (2023). *Software de Diseño Asistido por Computadora*. Autodesk. Recuperado el 24 de enero de 2024, de: <https://www.autodesk.mx/solutions/cad-design>
3. BBC. (2021). *El perseverance llega a Marte: el robot explorador de la NASA aterriza exitosamente en el planeta rojo*. BBC News Mundo. Recuperado el 28 de enero de 2024, de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56120171>
4. Boston Dynamics. (2023). *Atlas and beyond: the world's most dynamic robots*. Boston Dynamics. Recuperado el 16 de enero de 2024, de: <https://bostondynamics.com/atlas/>
5. Buriticá, C. (2018). *SOPHIA, robot humanoide*. Agencia de noticias UPB. Recuperado el 18 de enero de 2024, de: <https://www.upb.edu.co/es/documentos/doc-boletinescuelaverano2-1464182415182.pdf>
6. Conde, M. (2008). *Generaciones de La Robótica*. Revistas Bolivianas. Recuperado el 16 de enero de 2024, de: [http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1997-40442008000200032&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1997-40442008000200032&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
7. González, I., Armas, B., Coronel M., Vergara O., Maldonado N., Granillo, F. (2021). *El desarrollo tecnológico en las revoluciones industriales*. Ingenio y conciencia boletín científico de la escuela superior ciudad Sahagún. Recuperado el 15 de enero de 2024, de: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/sahagun/article/view/7118/8139>
8. González L. [Lucas González]. (2022). *Robot Bioloid, programación en el entorno Robot Plus* [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=DrFnnvF2gFM>
9. Ifema Madrid. (S.F.). *Robots humanoides más avanzados del mundo*. IFEMA MADRID. Recuperado el 23 de enero de 2024, de: <https://www.ifema.es/noticias/tecnologia/robots-avanzados-mundo>

10. Martínez, J. (2011). *Robot Bioloid: biblioteca de movimientos básicos*. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Recuperado el 13 de agosto de 2023, de: <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/434/46905.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. MathWorks. (2024). *Modeling Joint Connections*. MathWorks. Recuperado el 13 de agosto de 2023, de: <https://la.mathworks.com/help/sm/ug/joints.html>
12. MathWorks. (2024). *Smimport*. MathWorks. Recuperado el 13 de agosto de 2023, de: <https://la.mathworks.com/help/sm/ref/smimport.html>
13. MathWorks. (2024). *MATLAB*. MathWorks. Recuperado el 17 de agosto de 2023, de: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
14. MathWotks. (2024). *Modeling Extrusions and Revolutions*. MathWorks. Recuperado el 18 de agosto de 2024, de: <https://la.mathworks.com/help/sm/ug/modeling-extrusions-and-revolutions.html>
15. MathWorks. (2024). *Install the Simscape Multibody Link Plugin*. MathWorks. Recuperado el 20 de febrero de 2024, de: <https://la.mathworks.com/help/smlink/ug/installing-and-linking-simmechanics-link-software.html>
16. Puerto, K. (2011). *Honda nos presenta un nuevo ASIMO más autónomo y habilidoso*. Xataka. Recuperado el 22 de enero de 2024, de: <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/honda-nos-presenta-un-nuevo-asimo-mas-autonomo-y-habilidoso>
17. Robotis. (2024). *Robotis e-Manual Bioloid GP*. ROBOTIS. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de: <https://emanual.robotis.com/docs/en/edu/bioloid/gp/>
18. Robotis. (2024). *Robotis GP*. ROBOTIS. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de: <https://www.robotis.us/robotis-gp/>
19. S.A. (2021). *¿Qué es un robot humanoide? Significado y Ejemplos*. EDS Robotics. Recuperado el 23 de enero de 2024, de: <https://www.edsrobotics.com/blog/robots-humanoides/>
20. Santamaría, B. (2023). *¿Cuántos robots hay en la industria mundial?*. Revista Mercado. Recuperado el 24 de enero de 2024, de: <https://www.revistamercado.do/tecnologia/cuantos-robots-industria->

[mundial#:~:text=El%20informe%20World%20Robotics%202023%2C%20el%20aborado%20la%20Federaci%C3%B3n%20Internacional%20de,en%20toda%20la%20industria%20mundial.](#)

21. Sánchez Martín, FM., Millán Rodríguez, F., Salvador Bayarri, J., Palou Redorta, J., Rodríguez, Escovar, F., Esquena Fernández, S., Villavicencia Mavrich, H. (2007). *Historía de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I)*. Actas Urológicas Españolas. Recuperado el 16 de enero de 2024, de: <https://scielo.isciii.es/pdf/ae/v31n2/original1.pdf>
22. Sánchez Martín, FM., Jiménez, Schlegl, P., Millán Rodríguez, F., Salvador Bayarri, J., Palou Redorta, J., Villavicencia Mavrich, H. (2007). *Historía de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte II)*. Actas Urológicas Españolas. Recuperado el 16 de enero de 2024, de: <https://scielo.isciii.es/pdf/ae/v31n3/v31n3a02.pdf>
23. Schweitzer, L. (2013). *Bioid GP*. GRABCAD Community. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de: [https://grabcad.com/library/bioid-gp-1/details?folder\\_id=373848](https://grabcad.com/library/bioid-gp-1/details?folder_id=373848)
24. Valencia, Asdrúbal. (2000). *Breve historia de la ingeniería*. Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía. Recuperado el 15 de enero de 2023. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/6195>
25. Viladomat, J. (2016). *Robots humanoides ¿Cuál es su función?*. Aqueae Fundación. Recuperado el 18 de enero de 2024, de: <https://www.fundacionaqueae.org/creando-robots-humanoides/>
26. Viñas, S. (2021). *Los creadores del robot humanoide Sophia quieren producirlo en masa para final de año aprovechando el auge de este tipo de dispositivos por el COVID-19*. Business Insider. Recuperado el 26 de enero de 2024, de: <https://www.businessinsider.es/robot-humoide-sophia-producira-masa-final-ano-797491>



# Anexos

Anexo A. Tabla de piezas del robot Biolod simulado en SolidWorks

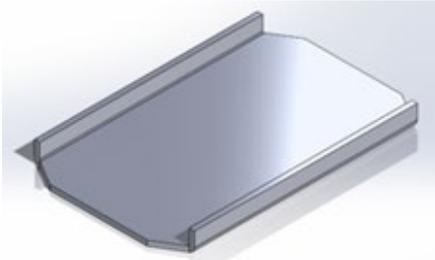
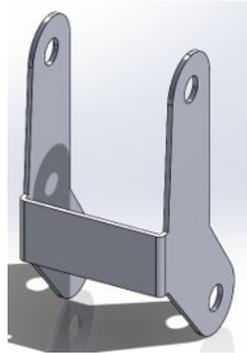
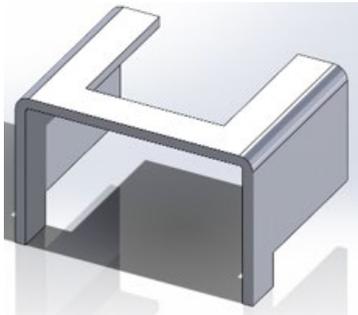
Anexo. Vista isométrica del modelo CAD.

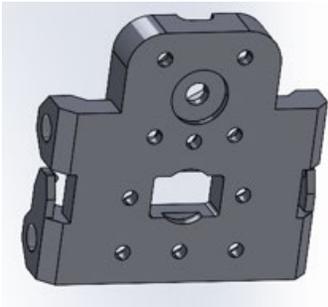
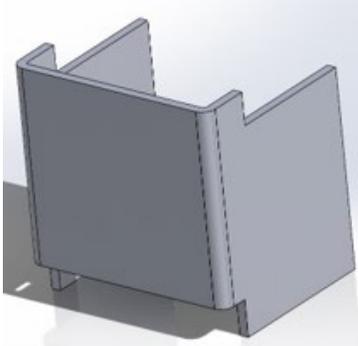
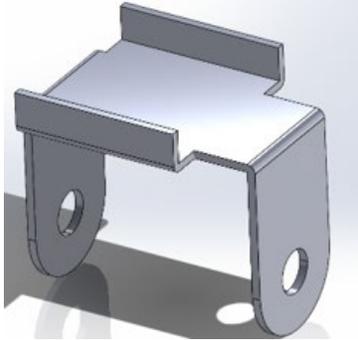
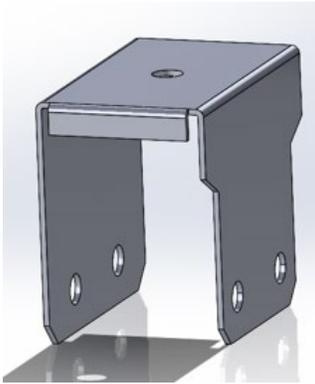
Anexo C. Enlace a la carpeta con todos los movimientos.

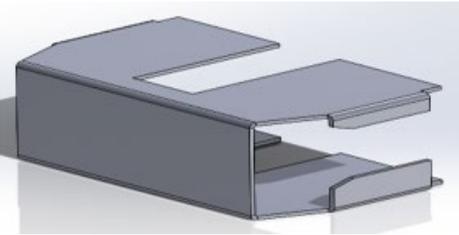
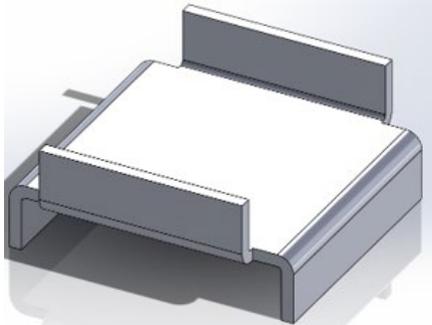
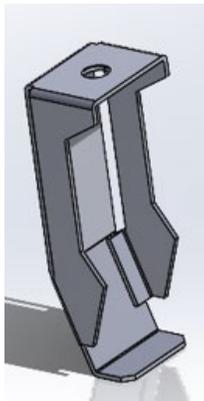
Diego de Jesús Gutiérrez Reyes

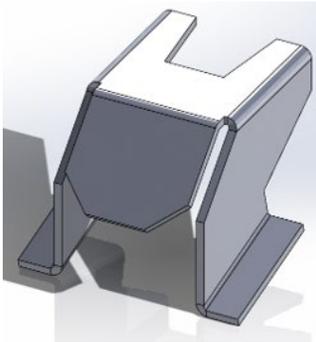
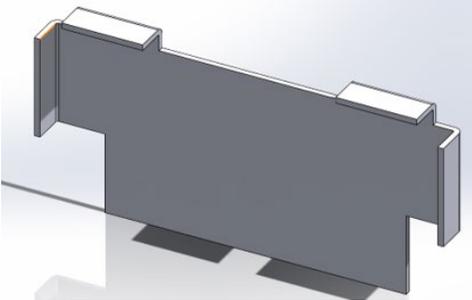
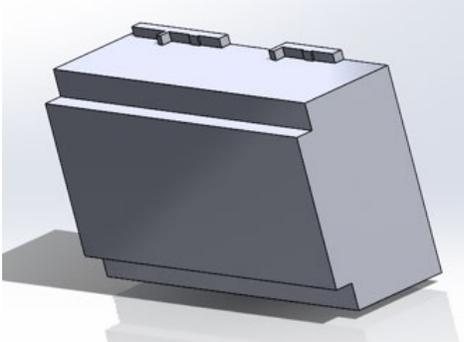
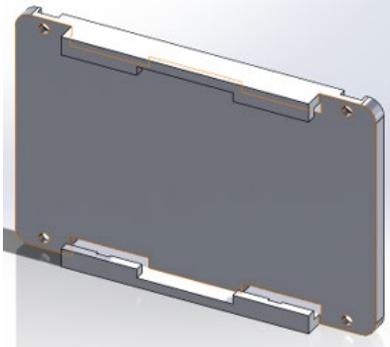
## Anexos

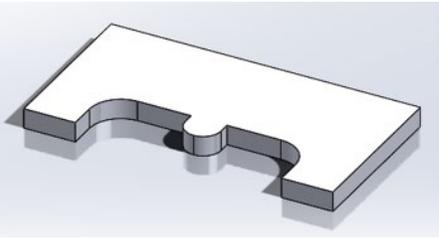
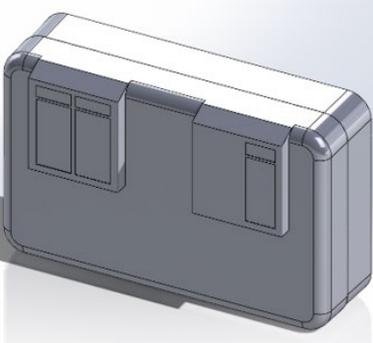
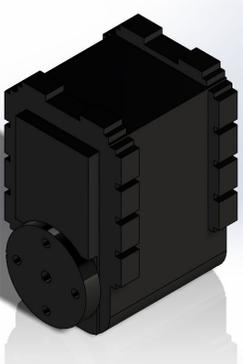
### Anexo A. Tabla de las piezas del robot Bioloid simuladas en SolidWorks.

Nombre técnico	Parte del cuerpo humano	Descripción	Imagen
Fr04_e160	Pie	Pieza que funciona como el pie del robot, representa el punto de apoyo, cuando este se encuentra parado.	
Fr04_h101	Tobillo	Pieza que une la base del pie con el servomotor que le da movimiento, esta le permite los movimientos laterales.	
Fr04_h120	Pierna	Pieza que actúa como la parte pierna del robot, conectando el tobillo y la rodilla. Une los servomotores que controlan el pie hacia adelante y atrás, así como el movimiento de la rodilla.	
Fr04_x101	Pantorrilla	Permite la unión de los dos servomotores que dan movimiento al pie.	

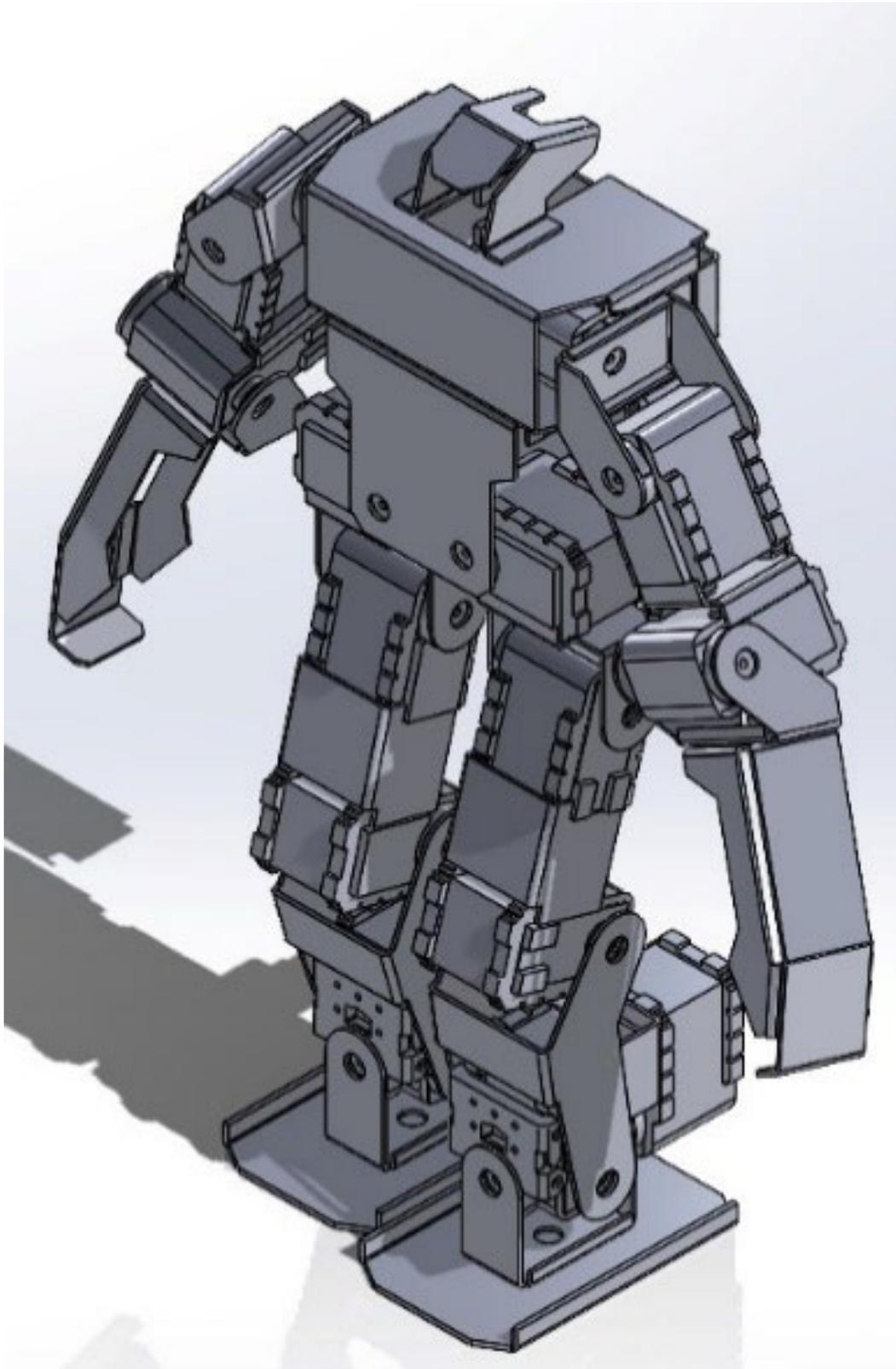
FP04-F7	Placa gris del tobillo	Placa que permite unir el servomotor que da movimiento al pie hacia adelante y atrás, con el tobillo y el pie.	
Fr04_sc110	Muslo	Pieza que conecta el servomotor de la rodilla con el de la cadera, su equivalente en el cuerpo humano es el muslo.	
Fr04_hc110	Cadera	Pieza que permite la unión de los dos primeros servomotores de las piernas, lo que permite que ambos cooperen para un movimiento esférico de la misma.	
Fr04_e131	Torso	Pieza equivalente a la zona del abdomen de un ser humano, no posee movimiento, pero permite la unión del pecho con los servomotores de la cadera.	

Fr04_e120	Pecho	Es la zona del pecho, se conectan los servomotores que actúan como hombros en las zonas laterales, la cadera en la parte inferior, y la cabeza en la parte superior, no posee movimiento, pero da estructura al robot.	
Fr04_h102	Brazo	Es el brazo del robot, conecta los servomotores que emulan el hombro, permitiendo movimientos laterales y circulares de los brazos. También se emplean para conectar el antebrazo y el último servomotor del brazo.	
Fr04_hc110	Codo	Une los servomotores que permiten el movimiento lateral del brazo con el del antebrazo.	
fr04_e180	Antebrazo	Es el equivalente al antebrazo humano e incorpora también la "mano" del robot.	

fr04_e175	Cabeza	La cabeza del robot no posee movimiento alguno.	
fr04_e150	Espalda	Es la espalda del robot Bioloid, da cierre al pecho.	
Battery	Batería	Es la batería del robot, si bien no cuenta con una función en la simulación, por su tamaño y posición es necesaria su simulación.	
f60	Complemento Batería 1	Permite conectar el torso con la batería, va pegada a la batería.	

pr10_spacer_01	Complemento Bateria 2	Permite conectar el torso con la batería, va pegada al torso.	
cm-510	Tablero	Es el tablero y procesador del robot, similar a la batería, no cuenta con una función específica, pero su dimensión y peso resultan importantes para la simulación.	
Servomotor	Articulación	Cada servomotor representa una articulación de movimiento para el robot, teniendo un total de 16.	

Anexo B. Vista isométrica del modelo CAD.



Anexo C. Enlace a la carpeta con todos los movimientos.

[Videos Movimientos Tesis](#)