



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN ROBOT  
HUMANOIDE PARA LAS COMPETENCIAS TIPO  
ROBOCUP SOCCER”**

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

TAPIA VILLEGAS ALEJANDRO

DIRECTOR DE TESIS

Mtro. Adalberto Joel Durán Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *Dedicatorias*

*A mis padres, por su apoyo incondicional.*

*Mamá gracias por creer en mí, incluso cuando yo mismo dudé. Esto es gracias a tu esfuerzo.*

*Dedico este trabajo especialmente a mis hermanos: Gabriela, Jose, Fernanda, Julio y Esmeralda, quienes fueron mi más grande motivación, los quiero mucho.*

*A mi abuela Rosario que siempre se preocupa por mí.*

*A Judith Villa lo mejor que me ha pasado en la vida, te amo.*

*A Manuel Tapia por enseñarme el camino...*

*A Javier Rosales, Jesús Manriquez, Aurora Gutiérrez y Elizabeth Macías, mis amigos.*

## *Agradecimientos*

*Mi eterno agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México quien incondicionalmente me brindo la herramienta más importante en la vida: el conocimiento.*

*A mi director de tesis el Mtro. Adalberto Joel Duran, por darme la oportunidad de colaborar en su equipo, su confianza y consejos brindados durante la elaboración de mi trabajo. Gracias.*

*Mi más sincero agradecimiento al Mtro. Mariano García del Gállego por sus consejos, asesorías y tiempo dedicado, sin los cuales no podría haber terminado este trabajo. Gracias.*

*Al Dr. Mario Peña y al IIMAS por el apoyo que brindan al equipo de UNAMoids, siempre comprometidos con el desarrollo del país.*

*Al Ing. Adolfo Altamirano por su apoyo en la caracterización del material. Gracias.*

*“Hay una fuerza  
metríz más poderosa  
que el vapor, la  
electricidad y energía  
atómica: la voluntad”  
Albert Einstein*

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
1.1 Objetivo .....	3
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Estado del arte de los robots humanoides .....	4
<b>CAPÍTULO II. LOCOMOCIÓN BÍPEDA HUMANA.....</b>	<b>19</b>
2.1 La marcha humana .....	19
2.2 Sistemas de referencia .....	20
2.3 Ciclo de la marcha .....	21
2.3.1 Mecanismos de optimización relevantes de la marcha humana .....	24
2.4 Grados de libertad en articulaciones.....	26
2.4.1 Hombro.....	27
2.4.2 Codo .....	29
2.4.3 Rodilla .....	30
2.4.4 Cadera.....	31
2.4.5 Tobillo.....	34
2.4.6 Pie .....	35
2.4.7 Raquis cervical .....	36
2.5 El equilibrio y su estabilidad en el cuerpo humano .....	37
2.6 La marcha en robots humanoides.....	40
<b>CAPÍTULO III. DISEÑO ESTRUCTURAL .....</b>	<b>44</b>
3.1 Especificaciones preliminares del robot.....	44
3.1.1 Hardware .....	46
3.1.2 Maquinaria de trabajo .....	48
3.1.3 Material de la estructura .....	51
3.2 Generación del concepto para el diseño estructural .....	52
3.3 Selección del material.....	60
3.4 Generación del concepto: acoplamiento del motor en la estructura.....	71
3.4.1 Propuestas para articulación de un grado de libertad .....	72
3.4.2 Propuestas para articulación con dos grados de libertad .....	75
3.5 Generación del concepto: articulación de la cadera.....	77
3.6 Ensamble.....	79
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS .....</b>	<b>84</b>
4.1 Análisis dinámico .....	84
4.1.1 Análisis de la incorporación después de una caída .....	85
4.1.2 Análisis de un paso.....	88
4.2 Análisis por elemento finito .....	91
4.2.1 Piezas radio-cubito .....	91
4.2.2 Piezas humero.....	97
4.2.3 Piezas tibia-peroné .....	99
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS.....</b>	<b>103</b>
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>114</b>
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>119</b>

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño estructural de un robot humanoide que cumple con las especificaciones de la competencia RoboCup Soccer dando opción a que pueda participar en las categorías TeenSize y KidSize.

Es un requisito dentro de las reglas de competencia de la RoboCup Soccer que éste tipo de robots haga su desplazamiento a través de una marcha bípeda, adicionalmente las reglas demandan un diseño guardando proporciones morfológicas similares a los humanos. Tomando en consideración los parámetros de diseño que se debían cumplir, se elaboraron estudios funcionales de los factores biomecánicos que favorecen la estabilidad durante la caminata junto con el estudio de los rangos angulares en articulaciones del cuerpo humano. Una vez concluido los análisis previamente descritos se pudo contar con más parámetros de diseño que permitan dotar el robot de un comportamiento cinemático más próximo al nuestro.

El diseño del robot tuvo como restricción adicional que se pueda manufacturar en el laboratorio de UNAMoids IIMAS utilizando materiales y refacciones disponibles en la República Mexicana, al mismo tiempo se consideró generar una estructura con ensamblajes sencillos y sin dobleces.

Finalmente, para analizar la estructura desde el punto de vista del comportamiento dinámico, se proponen diversas posturas críticas del robot. Empleando los valores obtenidos a través del análisis dinámico, es posible validar los componentes estructurales comprometidos en las posturas efectuando un análisis por medio del método de elemento finito.

Este trabajo se divide en seis capítulos:

El capítulo I especifica los objetivos de este trabajo, así como el planteamiento del problema a resolver. Además, se describe el estado del arte de los robots tecnológicamente más avanzados y de los robots humanoides que han obtenido

los primeros tres lugares en la RoboCup soccer, haciendo énfasis en su diseño mecánico.

El Capítulo II se centra en el estudio de la marcha bípeda. Los principales factores que la afectan, la optimización de la misma, criterios de estabilidad y los ángulos permisibles en articulaciones aplicables en el robot. Todo esto necesario para generar una estructura cinemáticamente equivalente a un humano, así como los parámetros de diseño mecánico que favorecen la robustez durante la marcha.

En el capítulo III se plantean las restricciones del diseño, considerando los capítulos anteriores, se genera la propuesta estructural del robot. También se analizan diversos materiales candidatos así como la caracterización del material seleccionado para la estructura.

En el capítulo IV se simulan diversas condiciones dinámicas de la estructura y se plantean las consideraciones empleadas para análisis por elemento finito de algunas piezas que componen dicha estructura.

El capítulo V presenta los resultados finales del diseño junto con sus especificaciones con las cuales se puede corroborar el cumplimiento de las reglas de la RoboCup.

Por último, en el capítulo VI se exponen las conclusiones y trabajo futuro del diseño.

## CAPÍTULO I. GENERALIDADES

### 1.1 Objetivo

Diseñar la estructura mecánica de un robot humanoide cuya morfología permita participar en la competencia “RoboCup Soccer Humanoid League”.

Objetivos particulares:

- Cumplir con las especificaciones dadas por la RoboCup en la categoría TeenSize y KidSize.
- El diseño de la estructura deberá considerar su manufactura con la infraestructura del laboratorio UNAMoids IIMAS.
- Proponer el material de la estructura que le resulte más ventajoso.
- Utilizar servomotores “CYS-S8218” en la estructura del robot humanoide.
- El diseño debe facilitar la manufactura de la estructura y su ensamble.
- Proponer un tipo de unión mecánica para evitar dobleces en la estructura.

### 1.2 Planteamiento del problema

Actualmente existen robots humanoides comerciales e incluso aquellos que son de plataforma abierta pudiéndose acceder a su software y hardware libremente. Dichas plataformas tienen como finalidad el contribuir al desarrollo e investigación de la robótica bípeda. Sin importar que estas plataformas de desarrollo puedan ser abiertas, sus refacciones son de un costo elevado y de complicada adquisición. Por tanto, se diseñará una propuesta para la construcción de un robot humanoide empleando componentes de fácil compra y se considerará también que la manufactura pueda realizarse en el laboratorio, ya que solo se dispone de máquinas de impresión 3D (de prototipo rápido), torno y fresadora CNC.

El material disponible es: Acido poliláctico (PLA), así como aluminio 5050 en láminas de 2 y 3 mm. Sin embargo, para el diseño estructural se considerará el comportamiento mecánico de materiales de fácil acceso y compra en nuestro país, resultando de la selección del material que mejores prestaciones proporcione.

El laboratorio tiene a disposición servomotores “CYS-S8218” que le darán el movimiento al robot. Se debe analizar la carga máxima en cada articulación y la configuración del robot, en donde su dinámica no sobrepase las especificaciones del servomotor. En caso de ser necesario proponer mecanismos que garanticen el buen desempeño del servomotor.

Ya que el robot tiene como objetivo participar en la competencia RoboCup Soccer en la categoría TeenSize y KidSize, es necesario que su morfología satisfaga las especificaciones de la competencia. Además, un diseño pensado en la mejora de su velocidad le sería ventajoso.

Por último, un aspecto importante es la estabilidad mecánica de la estructura: “un buen diseño mecánico reducirá el error de control y tendrá pocos problemas durante su operación” (Choong, Chee-meng, Aun-Neow, & Hong, 2003), por lo que basados en criterios de estabilidad en la marcha bípeda se buscará la geometría y su distribución de masas adecuada.

### **1.3 Estado del arte de los robots humanoides**

En este último año las investigaciones de robots humanoides han crecido notoriamente hasta llegar a tecnología tan sofisticada como ASIMO de Honda, no obstante, el campo de investigación es nuevo y se tiene muchos problemas que resolver. Para empezar, es necesario definir que es un robot. En general la palabra robot se usó en la obra teatral “Rossum’s Universal robots” por el escritor checo Karel Capek y viene de la palabra eslava “robota” que significa el trabajo realizado de manera forzada (Barrientos, Balaguer, Aracil, & Peñin, 2007). Según el diccionario de Oxford un robot se define como:

“Máquina capaz de llevar a cabo una serie de acciones complejas automáticamente, especialmente una programable por un cálculo” (Oxford University Press, 2017).

Aunque existen diversas definiciones de robot es común gracias a las novelas y películas de ciencia ficción que la gente al escuchar la palabra “robot” tenga en mente una estructura mecánica de forma humanoide (Barrientos, Balaguer, Aracil,

& Peñin, 2007). Un robot humanoide es un robot que tiene forma similar a la humana, según Bekey et. al (2008) se puede definir como:

“Los Humanoides son máquinas que tienen forma o función de un humano” (p. 71).

A diferencia de los robots que utilizan llantas para desplazarse tienen la principal ventaja de operar en lugares diseñados para humanos. Algunas de las aplicaciones que pueden tener estos robots van desde la limpieza de residuos peligrosos, rescate, servicios de limpieza, servicios de seguridad, cuidados en hospitales y asilos, brindar entretenimiento, entre otras aplicaciones (Conradt, 2001).

Algunos términos que suelen causar conflicto son robots antropomórficos y robots bípedos.

**Robot antropomórfico:** la palabra antropomorfismo según el diccionario de la real academia española se define como “Atribución de cualidades o rasgos humanos a un animal o cosa” (Real Academia Española, 2017). Los robots humanoides, bípedos, manos robóticas, etc. son robots antropomórficos, aunque esta definición es más común para referirse a brazos robóticos industriales.

**Robot bípedo:** son robots que utilizan dos extremidades para desplazarse.

El primer robot humanoide desarrollado en el mundo fue “WABOT-1” por la universidad de Waseda en Japón, quien era capaz de caminar en sus extremidades, calcular distancias con ayuda de receptores externos, sujetar objetos con las manos y comunicarse en japonés (Waseda University, 2016) (Ver figura 1).



Figura 1. Robot Wabot-1 (1973) tomado de (Waseda University, 2016).

Desde entonces el desarrollo continuo de tecnología de materiales, manufactura y robótica en el mundo ha permitido la evolución de estos robots, logrando la construcción de modelos más sofisticados.

A continuación, se enlista el panorama actual de los robots más avanzados tecnológicamente:

## **Atlas**



Figura 2. Robot Atlas, tomado de (Boston Dynamics, 2016).

Fue construido por Boston Dynamics, financiado por la agencia DARPA (**D**efense **A**dvanced **R**esearch **P**rojects **A**gency) y visto públicamente por primera vez en julio del 2013 en Boston (Markoff, 2013). Este robot fue diseñado para la competición DRC “DARPA Robotics Challenge” cuyo objetivo es acelerar el progreso de la robótica en respuesta a desastres naturales y humanos, como el accidente nuclear de Fukushima, se espera que dentro de un tiempo los robots tengan la suficiente destreza y robustez para entrar en áreas demasiado peligrosas para los seres humanos (DARPA, 2016).

Su estructura mecánica es de aluminio de calidad aeronáutica y titanio (Markoff, 2013). Las piernas, brazos, torso y pies fueron construidas por Boston Dynamics mientras que la cabeza fue construida por Carnegie Robotics, esta cuenta con un telémetro láser y sensores que le dan al robot conciencia 3D de su ambiente. El robot dispone de dos pares de manos diferentes, un par fue diseñado por iRobot y el otro por Sandia National Laboratories. Su principal desventaja es que depende de una fuente externa de energía por lo que está obligado a operar conectado. Varias copias de este robot se otorgaron a diversas instituciones con la finalidad de participar en la competencia y completar las pruebas de DRC (DARPA, 2013).

Especificaciones:

- Altura: 1.88 m.
- Peso: 150 kg (330 lb).
- 28 articulaciones hidráulicas.
- Alimentación de 480 V de energía trifásica a 15 KW (depende de la fuente de alimentación externa).

En febrero del 2016 se publicó un video por Boston dynamics con una nueva versión de atlas denominada “next generación”. Según Guizzo y Ackerman (2016) la nueva versión de atlas está diseñada para funcionar al aire libre y en el interior de construcciones, es accionado eléctricamente además ya no necesita una fuente de energía externa, continúa con el uso de actuadores hidráulicos. Usa sensores en su cuerpo y patas para balancearse, emplea tecnología LIDAR y sensores estéreo en su cabeza para evitar obstáculos, evaluar el terreno y ayudar

con navegación. Esta versión de atlas mide 1.75 m y pesa 82 kg por lo que es más ligero y corto que su versión anterior.

### ASIMO



Figura 3. Robot humanoide “ASIMO” imagen tomada de (American Honda Motor Co. Inc, 2016).

ASIMO acrónimo para “Advanced Step in Innovative Movility”, es un robot humanoide diseñado por Honda Robotics su primera versión se dio a conocer en octubre del 2000. Representa dos décadas de investigación en robótica humanoide, fue creado con el objetivo de asistir a personas de edad avanzada, personas confinadas a una cama o silla de ruedas, también podrá en un futuro realizar ciertas actividades que son peligrosas para los humanos como extinguir incendios y limpiar derrames tóxicos. El diseño de ASIMO está enfocado para desempeñarse en el entorno humano, con 130 cm de altura tiene el tamaño ideal para operar en hogares y oficinas, además hace cómoda su interacción con personas sentadas en camas o sillas. La marcha de ASIMO es muy estable incluso cuando se mueve repentinamente, ya que genera patrones de marcha en tiempo real por sí mismo además de poder caminar mientras gira. Puede desplazarse en pisos, aceras, subir escaleras, correr en círculos, correr cambiando de dirección, incluso ejecutando un patrón slalom, saltar con uno o dos

pies. Cuenta con pulgares independientes que le permiten llevar objetos con forma irregular de hasta 300 gramos en cada mano y hasta un kilogramo con ambas manos. Utiliza sensores para determinar la cantidad y dirección de fuerza en sus manos (American Honda Motor Co. Inc, 2016).

ASIMO está fabricado con una aleación de magnesio recubierto con una resina plástica lo cual lo hace durable y ligero. Cuenta con una batería de 51.8 volts (Li-ION) que le provee energía durante una hora en una sola carga. Esta batería está ubicada en la mochila de ASIMO y pesa aproximadamente 13.6 kg. Dispone de micrófonos en su cabeza para recibir comandos de voz y determinar la dirección del sonido, además ASIMO distingue entre voces y otros sonidos, cuando se le nombra es capaz de reconocerlo y voltear hacia la dirección del sonido. También puede mirar a la cara del hablante y responder a comandos de voz sencillos, reconoce sonidos inusuales como caída de objetos o colisiones y gira la cabeza en la dirección del sonido. Pero no solo puede interactuar con comandos de voz, gracias a su avanzado sistema de visión también es capaz de interpretar movimientos corporales, interpreta la posición y el movimiento de la mano por ejemplo para saludar, reconoce gestos y caras de un grupo selecto de personas, reconoce y ubica objetos, determina su distancia y el movimiento. Además, puede predecir la dirección en la que una persona va a caminar para modificar la trayectoria del robot y evitar una colisión (American Honda Motor Co. Inc, 2016).

En la nueva actualización de ASIMO 2011, la cual se dice paso de ser una máquina automática a una máquina autónoma, entre lo más destacado es la mejora del equilibrio, ahora puede mantener su postura al estirar una pierna; la capacidad de reconocimiento externo que le permite integrar información como el movimiento de las personas a su alrededor, en su comportamiento autónomo ahora el robot puede hacer predicciones a partir de información recopilada y determinar la acción siguiente de manera autónoma sin ser controlado por un operador (Honda Motor Co., 2016).

Algunas de sus especificaciones técnicas son:

- Altura: 130 cm.
- Peso: 50 kg.
- Velocidad al caminar: 2.7 km/h.
- Velocidad al correr: 7 km/h.
- Ciclo de marcha: ajustable.
- Fuerza de agarre: 0.5 kg por mano.
- Alimentación: 51.8 V litio-ion.
- Actuadores: 34 servomotores con reductor armónico.
- Grados de libertad: 57.

### Robot humanoide HRP-4



Figura 4. Robot HRP-4, tomado de (KAWADA INDUSTRIES, INC., 2016).

Es una plataforma para la investigación y desarrollo de robots humanoides diseñado por Kawada industries, Inc, en colaboración con National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), cuyo objetivo es seguir investigando para crear robots que puedan trabajar y coexistir en los entornos humanos y así mejorar la calidad de vida. El robot tiene un diseño exterior semejante al de un “atleta delgado” para buscar cierta afinidad con los humanos.

HRP-4 es la versión más reciente de una serie de modelos como HRP-2 y HRP-3. Cuenta con una mejora en sus grados de libertad, es más ligero y más pequeño que versiones anteriores. Tiene un total de 34 grados de libertad, incluyendo 7 grados de libertad por cada brazo para facilitar la manipulación de objetos, utiliza como alimentación una batería de Ni-MH de 48 [V] DC ya que requiere menor cuidado que una batería Li-ION. Para poder mejorar la eficiencia en la investigación de robots bípedos el robot se controla con software libre OpenRTM-aist y Linux. El Robot HRP-4 fue diseñado tomando en cuenta algunas consideraciones como: ser de bajo costo comparado con otras versiones, tener baja potencia en la salida de sus motores menor a 80 W, tener un cuerpo ligero y delgado, además de mejoras en la manipulación de objetos (Kenji KANEKO F. K., 2011).

Algunas de sus especificaciones son:

- Altura: 151 cm.
- Peso: 39 kg.
- Estructura: Aleación de aluminio para la estructura, plástico para la cubierta.
- Grados de libertad: 34; 6 en cada pierna, 2 en el cuello, 2 en la cadera, 2 en las manos y 7 en cada brazo.
- Fuerza de agarre: 0.5 kg en una mano.
- Baterías: DC 48 [V], 5.4 [Ah].

Ya que el objetivo de esta tesis es diseñar un robot para participar en la RoboCup Soccer, es conveniente analizar el panorama actual de los robots participantes en la esta liga, a continuación, se describen haciendo énfasis en la parte mecánica los robots que obtuvieron los primeros 3 lugares en categoría KidSize y TeenSize de la liga RoboCup Soccer 2016.

## Categoría KidSize

### Tercer lugar: equipo CIT Brains



Figura 5. Robot Accelite tomado de (Hayashibara, et al., 2016).

Este robot humanoide denominado Accelite representa al equipo CIT Brains del “Hajime Research Institute” en colaboración con “Chiba Institute of Technology (CIT)”. Es la cuarta generación de robots KidSize en el equipo. EL robot está integrado por una cámara usb, una unidad para medir inercia, 19 servomotores, una batería y la interfaz del usuario. En la RoboCup Soccer 2015 se implementó el uso de pasto artificial el cual tenía una longitud de 35 mm, consecuentemente la robustez en la marcha fue afectada por lo que se modificó el diseño del pie; el equipo solucionó este problema presentado dobleces en los bordes de las suelas del robot (Hayashibara, et al., 2016).

Especificaciones:

- Altura: 60 cm.
- Peso: 4.2 kg.
- Velocidad al caminar: 40 cm/s.
- Grados de libertad: 19.
- Actuadores: Futaba RS405CB.

## Segundo lugar: equipo ZJUDancer



Figura 6. Robot del equipo ZJUDancer tomado de (Huan, Dongdong, WenXing, & Rong, 2016).

Este equipo utilizó a los robots denominados Yu Quan, Zi Jingang, Xi y Zhi Jiang, los cuales están conectados inalámbricamente, cada robot usa 6 motores MX-106 en cada pierna, 3 motores MX-64 en los brazos y 2 motores MX-28 en la cabeza. Los robots están equipados con sensores de imagen, acelerómetros giroscopios y potenciómetros. Para la estimación de la posición de los robots, se utilizó odometría en lugar del uso de brújula como en años pasados lo hacían (Huan, Dongdong, WenXing, & Rong, 2016).

Especificaciones:

- Altura: 58 cm.
- Peso: 4 kg.
- Velocidad al caminar: 20 cm/s.
- Grados de libertad: 20.
- Actuadores: MX28, MX64, MX106.

**Primer lugar: equipo Rhoban Football Club**



Figura 7. Robot Sigmaban 1.4 (izquierda) y Grosban (derecha) tomado de (Fabr et al. 2016).

El equipo Rhoban Football Club, cuyos integrantes son investigadores y estudiantes en la Universidad de Bordeaux Francia y CNRS (The National Center for Scientific Research). Utilizaron los robots Sigmaban y Grosban con 20 grados de libertad cada uno. La principal novedad es que solucionaron el problema del pasto en el campo de juego utilizando 4 tacos en cada suela del pie. Cada taco está unido a un sensor de fuerza cuya finalidad es calcular el centro de presión de cada pie. Se implementaron servomotores Dynamixel RX-28, y Dynamixel RX-64 en Sigmaban, para Grosban se usaron Dynamixel MX-64 y Dynamixel EX106 (Fabre et al., 2016).

Especificaciones:

**Robot Sigmaban 1.4**

- Altura: 60 cm.
- Peso: 4.5 kg.
- Velocidad al caminar: 25 cm/s.
- Grados de libertad: 20.

## Robot Grosban 1.0

- Altura: 90 cm.
- Peso: 6. Kg.
- Velocidad al caminar: 15 cm/s.
- Grados de libertad: 20.

## Categoría TeenSize

### Tercer lugar: equipo AUTMan (TeenSize)



Figura 8. Robot ARASH tomado de (Sadeghnejad et al., 2016).

El equipo AUTMan (Amirkabir University of Technology and University of Manitoba), fundado en el 2013 por la colaboración entre la universidad de tecnología Amirkabir en Irán y la universidad de Manitoba en Canadá. Su robot ARASH utiliza 2 servomotores MX-106 en cada rodilla, con la finalidad de hacerlo más rápido. Cuenta con unidad de medición inercial (GY-80 IMU) para proporcionar la postura del centro de masa del robot en tiempo real. El robot utiliza servomotores Dynamixel MX-106 en las piernas, 2 servomotores Dynamixel MX-64 en cada brazo y 2 servomotores Dynamixel MX-28 para el cuello (Sadeghnejad et al., 2016).

Especificaciones:

- Altura 100 cm.
- Peso: 7.5 kg.
- Velocidad al caminar: 35 cm/s.
- Grados de libertad: 20.
- Batería: 14.8 v Li-Po 6800 mAh.

**Segundo lugar: equipo HuroevolutionTN**

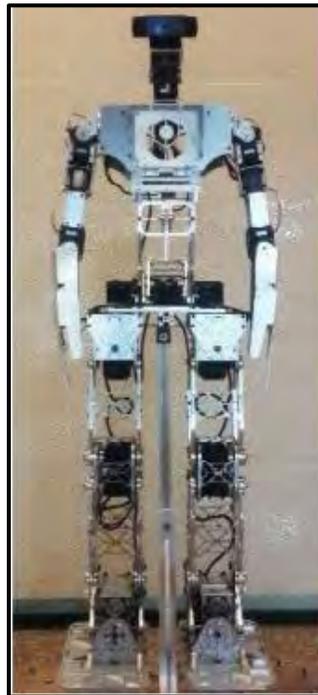


Figura 9. Robot HuroevolutionTN (Kuo, Chen, Chang, Gaox, & Huang, 2016).

Es un robot desarrollado por “National Taiwan University of Science and Technology” tiene 21 grados de libertad, 12 grados de libertad en sus piernas, 6 grados de libertad en sus brazos, 2 en su cuello y además de tiene un grado de libertad en su cintura. Su estructura es una aleación de aluminio y material polimérico. Las piernas están diseñadas como un mecanismo de estructura paralela con la finalidad de reducir el efecto de holgura en la caja de engranes y de disminuir el peso. Este mecanismo hace que las rodillas siempre se muevan paralelas a la cadera (Kuo, Chen, Chang, Gaox, & Huang, 2016).

Especificaciones:

- Altura: 95 cm.
- Peso: 12 kg.
- Grados de libertad: 21.
- Actuadores: Robotis MX106, Robotis MX28 y Robotis MX64.

**Primer lugar: equipo Nimbro TeenSize**



Figura 10. Robot Igus humanoid Open Platform (izquierda) y robot Dynaped (derecha). Tomado de (Farazi, Allgeuer, Ficht, & Behnke, 2016) .

Es un equipo de la universidad “Heinische Friedrich-Wilhelms-Universit“at Bonn” en Alemania utilizaron los robots humanoides Igus y Dynaped. El robot Igus es alimentado con 4 baterías de Li-Po, utiliza 6 servomotores MX-106 en cada pierna (3 en la cadera 1 en la rodilla y 2 en el tobillo), se incorporan 3 servomotores MX-64 en cada brazo y 2 en la cabeza. Una característica particular es que los componentes mecánicos de la estructura fueron fabricados con la tecnología “Selective Laser Melting” que es una técnica de prototipo rápido 3D, entre algunas de sus ventajas es que se pueden fabricar geometrías complejas incluso metálicas y tener un excelente acabado. Utiliza magnetómetros, acelerómetros y giroscopios en el sub controlador CM730 para sensar la inercia. El robot humanoide Dynaped tiene 14 grados de libertad, 5 grados por pierna, 1 por brazo y 2 grados de libertad en el cuello. Utiliza un par de servomotores EX-106 configurados como maestro esclavo en las articulaciones de la cadera y el tobillo. En los hombros y cabeza

utiliza actuadores RX-64. Este robot tiene articulaciones flexibles en los hombros y protección en la columna, además de que su torso está hecho de aluminio y es recubierto por espuma; por lo que es capaz de lanzarse como portero (Farazi, Allgeuer, Ficht, & Behnke, 2016).

Especificaciones:

### **Robot humanoide: Igus Humanoid Open Platform**

- Altura: 92 cm.
- Peso: 6.6 kg.
- Velocidad al caminar: 27 cm/s.
- Grados de libertad: 20.

### **Robot humanoide: Dynaped**

- Altura: 109 cm.
- Peso: 7.5 kg.
- Velocidad al caminar: 30 cm/s.
- Grados de libertad: 14.

**Observaciones generales:** de la información recopilada se puede notar una tendencia en el uso de aluminio como material estructural, así como la conexión entre articulaciones a través de piezas tipo “armadura estructural” disminuyendo así el peso del robot. Por otra parte, es factible usar varios servomotores en una articulación configurados en serie o paralelo, aumentando así la potencia de la articulación. También nótese el uso de diferentes servomotores dependiendo de la articulación, por ejemplo, empleando servomotores de bajo par en la cabeza siendo más ligeros que los utilizados en rodillas y tobillos. Finalmente, es posible sacrificar grados de libertad en diversas articulaciones tal y como lo hizo el equipo Nimbro TeenSize disminuyendo así la masa total del robot.

## CAPÍTULO II. LOCOMOCIÓN BÍPEDA HUMANA

El objetivo de este capítulo es entender los factores que influyen en el desempeño de la marcha y el equilibrio de un robot, ya que se diseñará un robot humanoide, es necesario comprender conceptos básicos de locomoción en humanos. Después se analizarán los principales criterios de estabilidad con la finalidad de que el diseño mecánico del robot contribuya a la estabilidad y robustez en la marcha.

Los humanos y los animales tienen diversas formas de desplazarse de un lugar a otro, ya sea arrastrándose, brincando, nadando, volando etc. A esta capacidad se le denomina locomoción, un caso de locomoción muy estudiado es la humana. Para poder entender aspectos de la locomoción humana, es necesario emplear técnicas para separar fenómenos dinámicos, cinemáticos, entre otros, este conjunto de técnicas se le denomina análisis de la marcha (Dra. Mademli & Dr. Morey, 2015).

### 2.1 La marcha humana

La marcha humana es una forma de locomoción bípeda muy antigua, es una actividad que se realiza desde siglos atrás y que por lo tanto ha tenido diferentes modificaciones a lo largo del tiempo. Consta del movimiento alternante de los miembros inferiores que desplazan el cuerpo en posición erguida manteniendo su equilibrio, también definido como “el patrón de movimiento de nuestros segmentos durante la deambulación” (Dra. Mademli & Dr. Morey, 2015, p. 401), a diferencia de la carrera, el cuerpo siempre se mantiene el contacto con el suelo. Este movimiento de locomoción puede variar por diversos factores como el tipo de suelo (pasto, lodo asfalto), la pendiente del terreno, tipo de calzado, la actividad que se esté realizando, edad, peso de la persona, entre otras.

Una de las herramientas básicas que es utilizada en la biomecánica es el análisis de la marcha, se ha empleado tanto en la medicina como en el deporte, por ejemplo, para analizar el comportamiento de los atletas y determinar cómo pueden tener un mejor desempeño o para saber el grado de afección de una lesión en un paciente. También se ha aplicado el análisis de la marcha en la identificación de

personas como si fuese una huella digital, ya que no nacemos con la habilidad de caminar, es un proceso de aprendizaje “prueba y error” con mejora continua hasta desarrollar un patrón de marcha específico en cada individuo. En consecuencia, este patrón contiene mucha información personal como rasgos de carácter, estado de ánimo, de salud, entre otros (Dra. Mademli & Dr. Morey, 2015).

### **2.2 Sistemas de referencia**

Para describir el movimiento y la posición del cuerpo humano es necesario utilizar ejes y planos imaginarios, además, de una posición particular del cuerpo como referencia, a esta posición se le denomina “posición anatómica” según Dr. Lisón, Dr. Sánchez y Dr. Vera (2015) está definida como: “es la postura erecta, con la cara mirando hacia adelante brazos a los costados, palmas de las manos hacia adelante y los dedos en extensión” (p. 210) normalmente en esta posición las articulaciones se consideran en un ángulo cero, si se quisiera medir el ángulo de una extremidad o articulación esta sería respecto a su posición anatómica. Sobre esta posición anatómica se definen los planos principales ortogonales entre sí cuyo origen está antes de la segunda vertebra sacra y los ejes principales formados por la intersección de los planos (figura 11). Este sistema de referencia se puede mover a cualquier articulación del cuerpo, sin embargo, se definen los 3 planos y ejes principales según los siguientes autores Dr. Lisón, Dr. Sánchez y Dr. Vera (2015):

**Plano sagital o anteroposterior:** está en dirección vertical y divide al cuerpo en una sección izquierda y una derecha.

**Plano frontal o coronal:** está en dirección vertical y divide al cuerpo en una sección anterior y otra posterior.

**Plano transversal u horizontal:** está en dirección horizontal y divide al cuerpo en una parte superior y una inferior.

**Eje frontal o transversal:** es el eje horizontal, respecto a este eje se dan los movimientos de flexión y extensión.

**Eje longitudinal o vertical:** es el eje vertical y es perpendicular a la superficie donde se apoyan los pies (Faller & Schünke , 2006).

**Eje sagital:** este eje es perpendicular al eje frontal y al eje longitudinal.

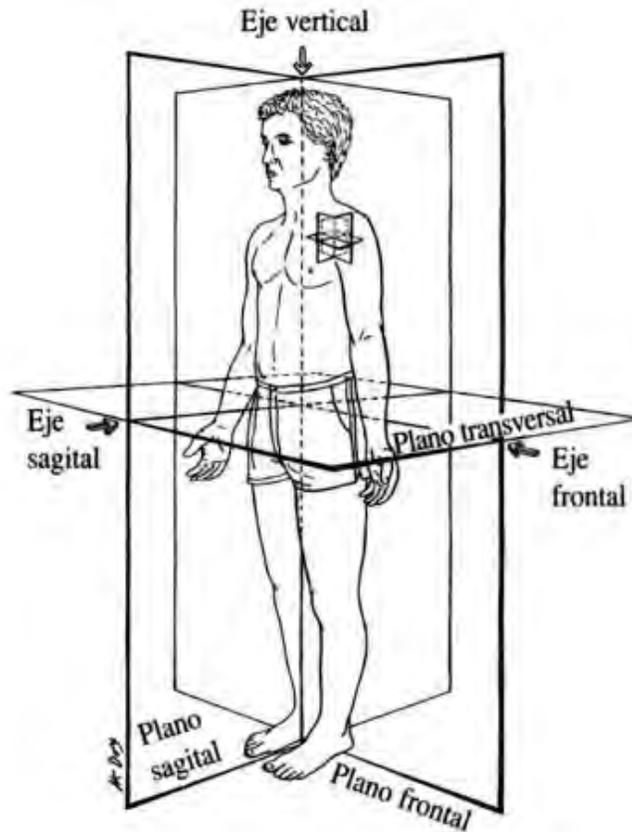


Figura 11. Esquema donde se muestran los ejes y planos principales tomado de (Clarkson, 2003).

### 2.3 Ciclo de la marcha

Durante la marcha bípeda en humanos se dan ciertos patrones de movimientos repetitivos, principalmente en las extremidades inferiores del cuerpo. Estos patrones son estudiados detalladamente y se describen en el denominado ciclo de la marcha.

El ciclo de la marcha es la unidad básica de medición del análisis de la marcha, aunque para poder describir totalmente la marcha humana, es necesario tomar en cuenta factores dinámicos en articulaciones, músculos, tendones, en el pie con el

suelo, requerimientos energéticos y mecanismos de optimización adoptados por el cuerpo (Dra. Mademli & Dr. Morey, 2015).

La Dra. Mademli y Dr. Morey (2015) señalan que este ciclo consta de dos fases principales, en la primera “fase de apoyo” el pie está en contacto con el suelo y en la segunda “fase de balanceo” este mismo pie se balancea sin tocar el suelo para luego volver a apoyarse. El ciclo de la marcha puede iniciar en cualquier momento, pero comúnmente se utiliza el primer contacto del pie con el suelo como inicio y el final del ciclo es marcado hasta que este mismo pie llegue a la posición de inicio.

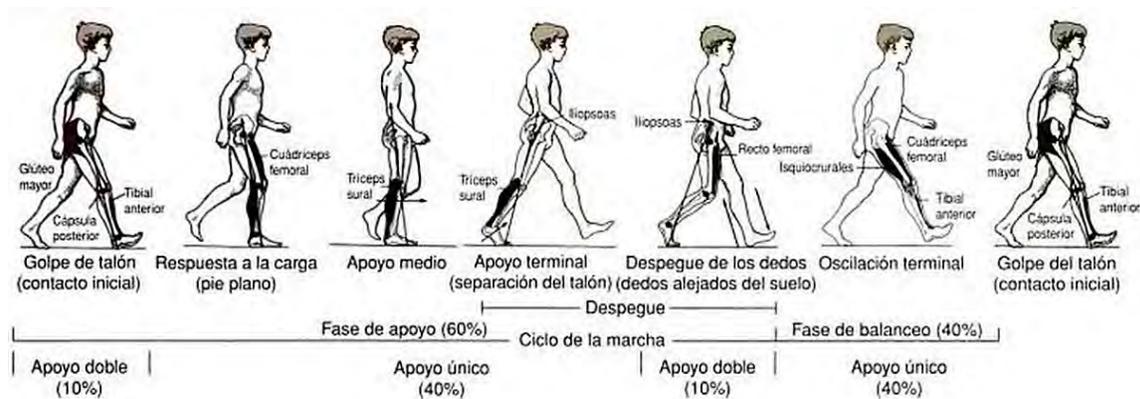


Figura 12. Ciclo de la marcha tomado de (Moore & Dalley, 2006).

Así mismo la fase de apoyo se divide en de dos fases, la fase de apoyo bipodal donde ambos pies están en contacto con el suelo transfiriendo la carga de un lado a otro, y fase de apoyo monopodal o unipodal donde solo un pie está en contacto con el suelo cargando todo el peso y permitiendo que el otro pie se balancee. Entre mayor sea la velocidad de la marcha el tiempo que ambos pies están en contacto con el suelo es menor hasta llegar a la carrera en donde no existe fase bipodal.

La fase de oscilación se divide en tres partes: oscilación inicial, en donde la pierna despegando del suelo desplazándose hacia adelante, oscilación central, donde la rodilla flexionada se desplaza hasta que la tibia esta perpendicular al suelo, y oscilación terminal, cuando la pierna se frena y la rodilla está totalmente extendida terminando cuando el talón hace contacto con el suelo.

La Dra. Mademli y el Dr. Morey (2015) establecen que del ciclo de la marcha se pueden obtener ciertos parámetros importantes como son:

- **Velocidad de la marcha:** es la distancia recorrida por el centro de gravedad por unidad de tiempo comúnmente en dirección del plano sagital.
- **Longitud de paso:** es la distancia medida desde el apoyo inicial de un pie hasta el apoyo inicial del otro pie.
- **Longitud del ciclo o de la zancada:** es a distancia total recorrida en un ciclo, se mide del primer apoyo del pie hasta el segundo apoyo de ese mismo pie.
- **Ancho de paso:** es la separación entre ambos pies en dirección perpendicular a la dirección de la marcha.
- **Angulo del pie o de paso:** es el ángulo que forma el eje medio del pie con la dirección de la marcha.
- **Duración del paso:** durante la marcha es el tiempo el cual se da el contacto inicial de un pie con el suelo hasta el contacto inicial del otro pie.
- **Cadencia:** número de pasos realizados en un minuto.

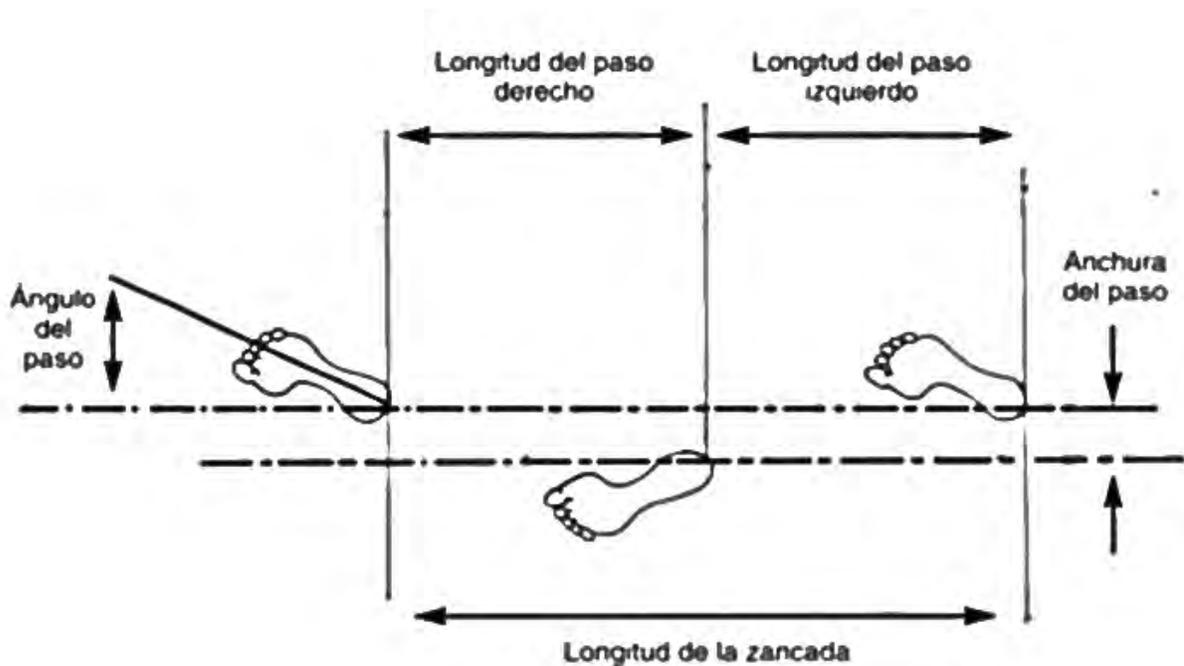


Figura 13. Parámetros de la marcha, tomado de (Miralles, 2001).

### 2.3.1 Mecanismos de optimización relevantes de la marcha humana

El centro de gravedad está a 55% de la estatura del sujeto ligeramente delante de la segunda vertebra sacra. Durante la marcha se da un desplazamiento de este centro de gravedad que describe una determinada trayectoria casi sinusoidal si lo vemos desde el plano frontal o el sagital, el desplazamiento ideal del centro de gravedad durante la marcha debería ser en línea recta energéticamente hablando, sin embargo, en la marcha humana, aunque no es en línea recta está muy optimizado (Plas, 1979).

Según Plas (1979) diversos factores ayudan a mejorar la eficiencia de la estabilidad locomotora durante la marcha de las cuales destacan:

La rotación de 4 grados de la pelvis alrededor del eje vertical que repercute en alargar el paso sin aumentar la caída del centro de gravedad (figura 14).

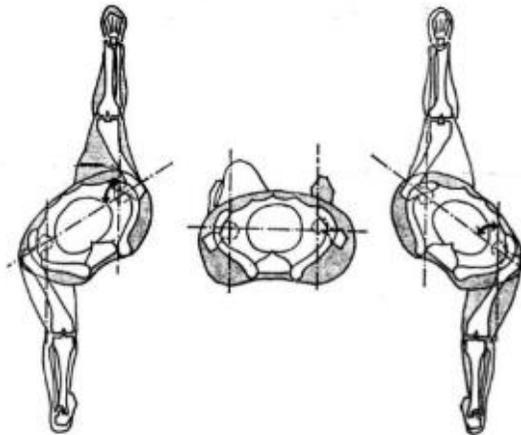


Figura 14. Rotación de la cadera sobre el eje longitudinal, tomado de (Plas, 1979).

La inclinación de la pelvis durante la fase de apoyo, efectuada del lado del pie que se está balanceando con una amplitud de 5 grados, por lo que es necesaria la flexión de la rodilla balanceada (figura 15).

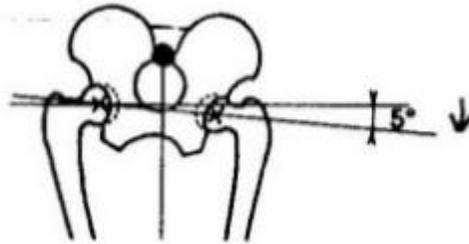


Figura 15. Inclinación de la pelvis en el pie de apoyo tomado de (Plas, 1979).

Durante el apoyo del pie con el piso la rodilla está casi en extensión completa e inmediatamente comienza a flexionarse de 15 a 20 grados. Gracias a esta flexión se disminuye la elevación del centro de gravedad sobre el plano sagital en la fase de apoyo (figura 16).

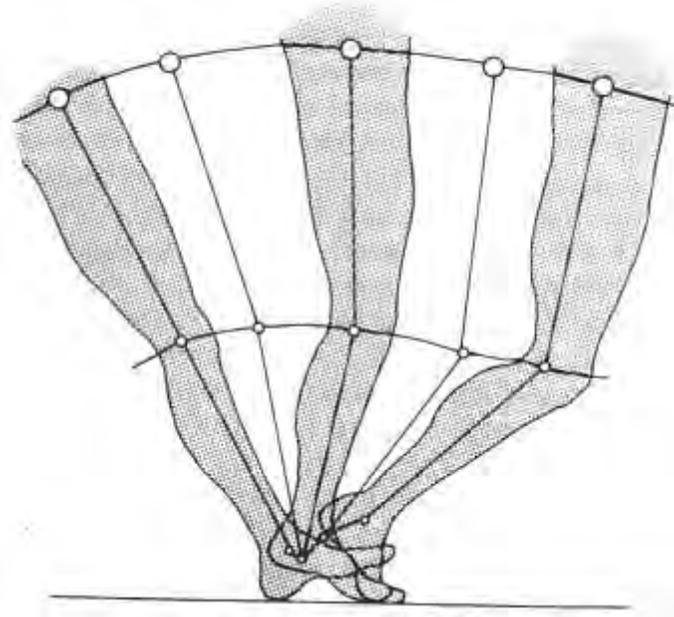


Figura 16. Trayectoria de la rodilla, se ilustra la flexión de la rodilla durante la fase de apoyo monopodal tomado de (kottke & lehmann, c1993).

Movimientos del pie y del tobillo, cuando el pie hace contacto con el suelo el tobillo inicia una trayectoria circular sobre el talón, el pie siempre mantiene contacto con el piso (figura 16). De igual manera existe una coordinación de los movimientos de la rodilla y el tobillo, cuando el talón toca el piso la rodilla se flexiona y el tobillo descende; luego cuando empieza el impulso de esta pierna la rodilla se dobla y el

tobillo asciende, estos movimientos coordinados contribuyen al traslado suave del centro de gravedad (arranques bruscos y retenciones repentinas).

Desplazamiento de la pelvis, durante la fase de apoyo monopodal el centro de gravedad se desplaza hacia el pie de apoyo, con la finalidad de conservar el equilibrio. Sin embargo, el fémur se mantiene próximo a la otra pierna gracias al valgo fisiológico de la rodilla disminuyendo el desplazamiento lateral de la cadera (figura 17).

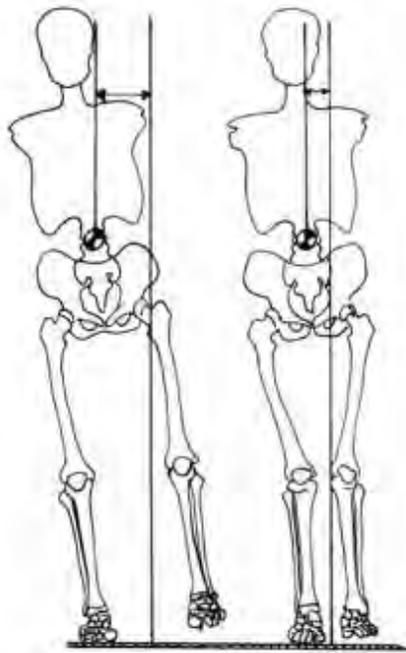


Figura 17. Desplazamiento lateral del centro de gravedad durante el apoyo monopodal en una pierna. Del lado izquierdo se muestra el desplazamiento del CG sin valgo fisiológico. En el lado derecho se aprecia el efecto del valgo fisiológico en las rodillas. imagen tomada de (Miralles, 2001).

### 2.4 Grados de libertad en articulaciones

Para que un robot humanoide pueda caminar en las tres dimensiones necesita por lo menos 12 juntas, cada una le otorga un grado de libertad. La configuración para la cadera y los miembros inferiores se muestra en la figura 18, donde cada cilindro representa un grado de libertad, su distribución es de 3 en la cada cadera, 1 en cada rodilla y 2 en cada tobillo (Choong, Chee-meng, Aun-Neow, & Hong, 2003). Además, basándose en el diseño del robot DARWIM-OP se determinó los grados

de libertad necesarios para el brazo y el cuello siendo 2 para el hombro, 1 para el codo y 2 para la cabeza.

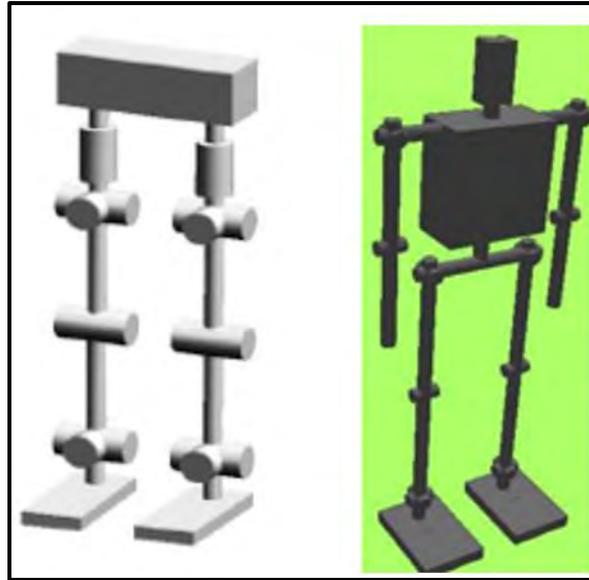


Figura 18. La imagen del lado izquierdo muestra los grados de libertad necesarios para una marcha 3D. Tomado de (Choong, Chee-meng, Aun-Neow, & Hong, 2003). La imagen derecha muestra la configuración de un robot humanoide especificado por la RoboCup imagen obtenida de (RoboCup, 2015) .

Es necesario tomar en cuenta el desplazamiento angular de cada junta, con el objetivo de tener una cinemática similar a la humana, el cual se especifica en las reglas de la RoboCup Humanoid League. Este desplazamiento de las articulaciones se describe alrededor de los ejes transversales, horizontales y verticales del sistema de referencia descrito anteriormente (figura 11), basta con mover este sistema a cualquier articulación como se ejemplifica en la figura 19 y 24 a).

A continuación, basándose en el trabajo de Kapandji (2006) se establecerá el tipo de movimiento y sus rangos de desplazamiento angular en el cuerpo humano, aplicados en las articulaciones del robot.

### 2.4.1 Hombro

La articulación del hombro posee 3 grados de libertad, aunque en realidad se trata de un conjunto de 5 articulaciones que funcionan al mismo tiempo para hacer posible estos movimientos. Debido a que el hombro del robot tiene 2 grados de libertad, uno que hace posible el movimiento de rotación del brazo alrededor del

eje transversal “movimiento de flexo-extensión” y otro sobre el eje sagital “movimiento de abducción y aducción” solo se analizará estos movimientos en busca de los ángulos permisibles en humanos.

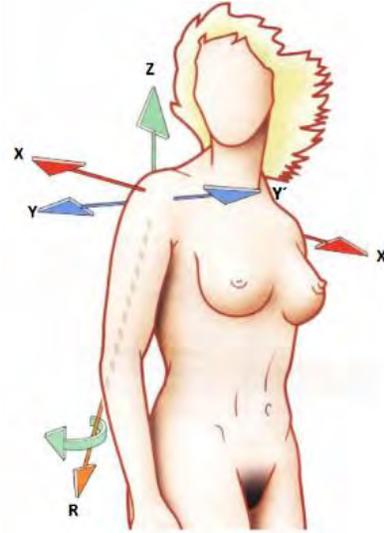


Figura 19. Ejes principales en la articulación del hombro tomado de (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 1, 2006).

Movimientos de flexo-extensión: es la rotación del brazo en torno al eje transversal  $XX'$  (figura 19) en la articulación del hombro se divide en dos: la extensión que alcanza de  $45^\circ$  a  $50^\circ$  y la flexión con  $180^\circ$  (figura 20 a) y b) respectivamente).

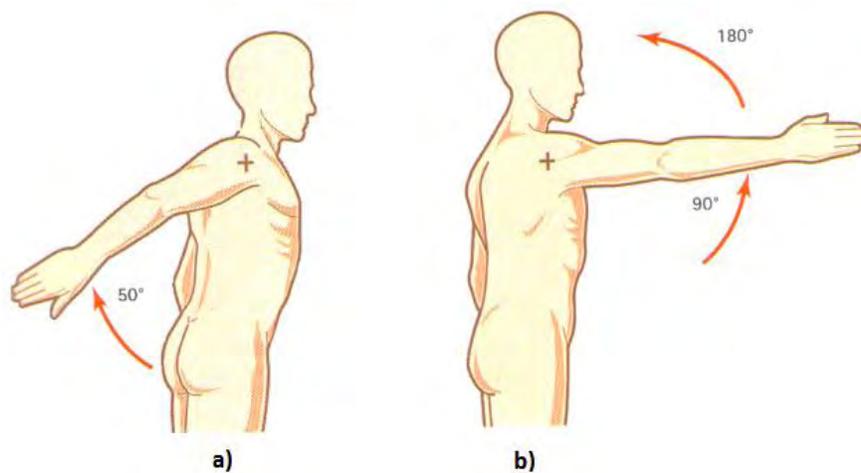


Figura 20. a) Extensión y b) Flexión ilustraciones tomadas de (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 1, 2006).

Movimiento de abducción: desde la posición anatómica es la rotación del brazo sobre el eje sagital alejándose del torso alcanza hasta  $180^\circ$  (figura 21 a)).

Movimiento aducción: este movimiento traslada el brazo desde la posición anatómica hacia el tronco por lo que es físicamente imposible, sin embargo, con un movimiento de flexión del brazo y luego la aducción se pueden alcanzar hasta  $45^\circ$  (figura 21 b)).

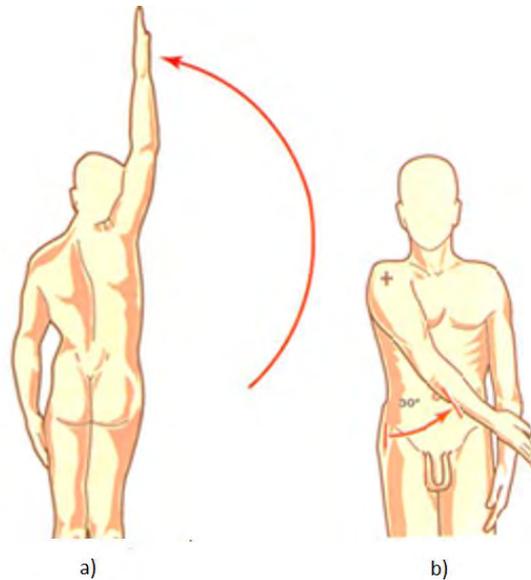


Figura 21. a) Movimiento de abducción b) Movimiento de aducción ilustraciones tomadas de: (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 1, 2006).

### 2.4.2 Codo

La articulación del codo une el brazo con el antebrazo, su fisiología distingue dos movimientos la flexo-extensión y la pronosupinación. Para el robot solo se aplica el movimiento de flexo-extensión que es la rotación del antebrazo sobre la articulación del codo, a su vez se divide en la flexión que es el movimiento del antebrazo hacia la cara anterior del brazo con un desplazamiento de hasta  $145^\circ$  y la extensión, que desde la posición anatómica para medir amplitudes es imposible (figura 22).

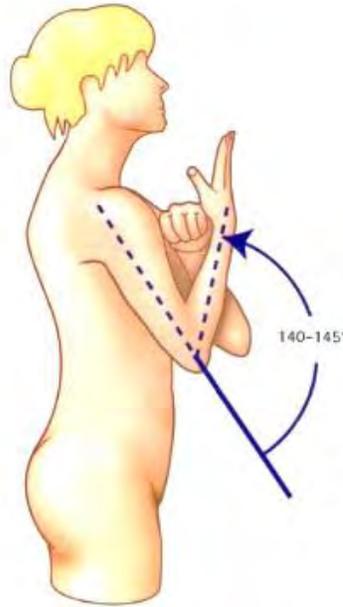


Figura 22. Movimiento de flexión imagen tomada de (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 1, 2006).

### 2.4.3 Rodilla

La articulación de la rodilla une el muslo o región femoral con la pierna, tiene un grado de libertad que le permite el movimiento de flexión y de extensión sobre el eje transversal, sin embargo, cuando esta flexionada un segundo grado de libertad le permite rotar sobre su eje longitudinal, eje que atraviesa axialmente el miembro, esto es debido a la holgura articular entre la tibia y el fémur que desaparecen con la extensión máxima. Para el robot solo es necesaria la articulación que le permita extender y flexionar la pierna, movimientos de “flexo-extensión”. Este desplazamiento angular de la articulación se mide desde la posición de referencia establecida cuando el eje longitudinal del muslo coincide con el eje longitudinal de la pierna.

El movimiento de extensión se define como: “el movimiento que aleja la cara posterior de la pierna, de la cara posterior del muslo”, alcanzando no más de  $10^\circ$  desde la referencia (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

El movimiento de flexión es definido como “el movimiento que aproxima la cara posterior de la pierna a la cara posterior del muslo” con una amplitud de  $120^\circ$  y

hasta  $160^\circ$  cuando el glúteo toca la nalga (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006) (figura 23).

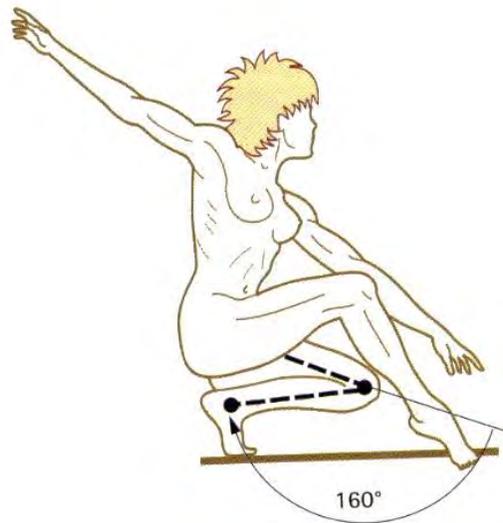


Figura 23. Movimiento de flexión de la rodilla tomado de (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

### 2.4.4 Cadera

Su articulación coxofemoral es una de las más importantes para un robot humanoide ya que le permiten mover el miembro inferior en las tres dimensiones. El movimiento de flexión se realiza sobre el eje  $XOX'$ , permite el contacto del tronco con el muslo. Su amplitud varía según ciertos factores por la simple acción de los músculos (flexión Activa) y con la rodilla extendida es posible llegar hasta  $90^\circ$  como se muestra en la (figura 24 b)), mientras que con la rodilla flexionada se superan los  $120^\circ$ . De manera pasiva (con ayuda de manos o fuerzas externas) la extremidad supera los  $120^\circ$  y con la rodilla flexionada supera los  $145^\circ$  ver figura 24 c).

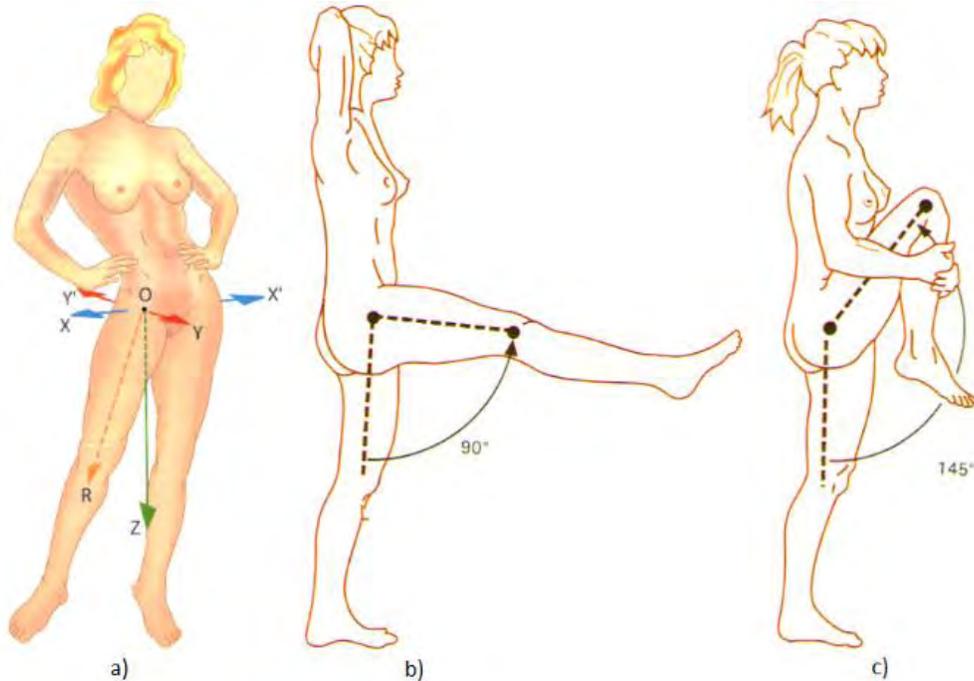


Figura 24 . Ejes de referencia en articulación coxofemoral donde R representa el eje longitudinal del muslo tomado de (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

El movimiento de extensión se realiza en torno al eje  $XOX'$  y aleja el muslo del tronco. Con la rodilla extendida la extensión es de  $20^\circ$  y con la rodilla flexionada es de  $10^\circ$ . La extensión pasiva alcanza hasta  $30^\circ$  (figura 25 a) y b)).

Movimientos de abducción: es el movimiento alrededor del eje  $YOY'$  tal que el miembro inferior se aleja del plano sagital, a partir de los  $30^\circ$  la abducción de una cadera se acompaña de la otra obteniendo un ángulo máximo de  $90^\circ$  con  $45^\circ$  cada una, mediante ejercicio es posible aumentar hasta  $130^\circ$  como lo hacen las bailarinas (figura 25 c) y d)).

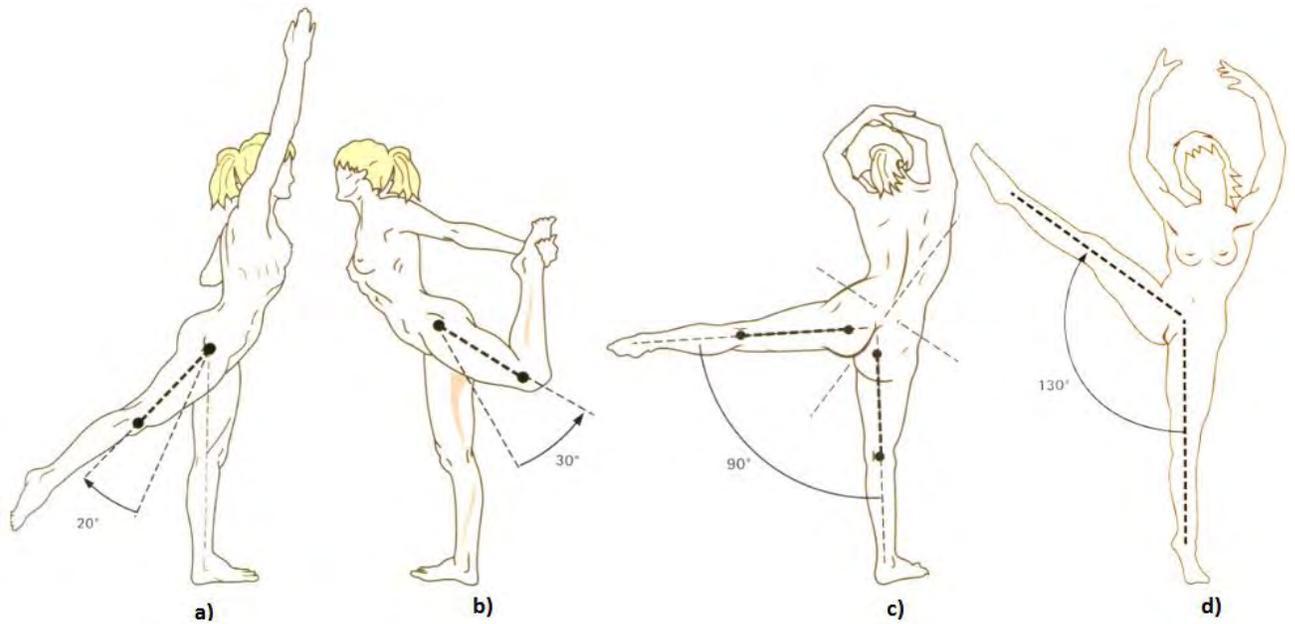


Figura 25. a) Extensión b) Extensión pasiva c) abducción d) abducción límite. Imágenes obtenidas de (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

El movimiento de aducción se realiza en torno al eje YOY' y aproxima el miembro inferior hacia el plano sagital, sin embargo, desde la posición anatómica las dos extremidades están en contacto por lo que no es posible realizar este movimiento, usando un movimiento de aducción con extensión en la cadera se puede alcanzar hasta 30° (figura 26 a)).

Movimiento de rotación: se efectúa sobre el eje OR (figura 24 a)). Se divide en rotación externa e interna, se mide con la rodilla flexionada ya sea en decúbito prono o sedestación al borde de una camilla (figura 25 b) y d) respectivamente). El movimiento de rotación interna traslada el pie hacia dentro con amplitud máxima de 60°, mientras que la rotación externa traslada el pie hacia fuera con una amplitud máxima de 30° a 40°.

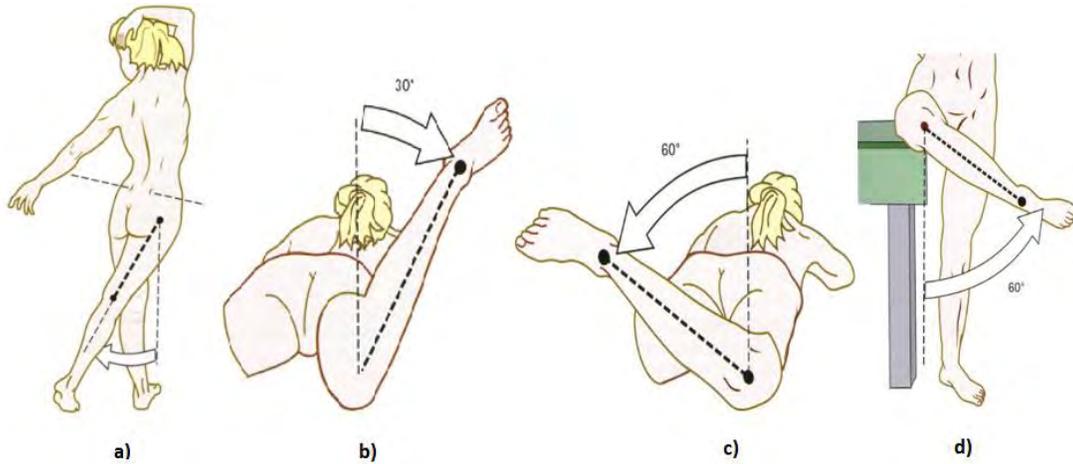


Figura 26. a) Movimiento de aducción b) rotación externa de la cadera en posición decúbito prono c) rotación interna de la cadera en decúbito prono d) rotación interna en posición de sedestación. Imágenes obtenidas de (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

### 2.4.5 Tobillo

La articulación talocrural o del tobillo posee un grado de libertad, frecuentemente está sometida a cargas mayores al peso de todo el cuerpo, su movimiento se divide en flexión y extensión sobre el eje XX' figura 27 a).

Flexión: es la rotación del pie hacia la pierna alcanza un valor de 20 a 30° posición B (figura 27 b)).

Extensión: es el movimiento que aleja el dorso del pie de la cara anterior de la pierna tiene un rango máximo entre 30° y 50° posición C figura 27 b).

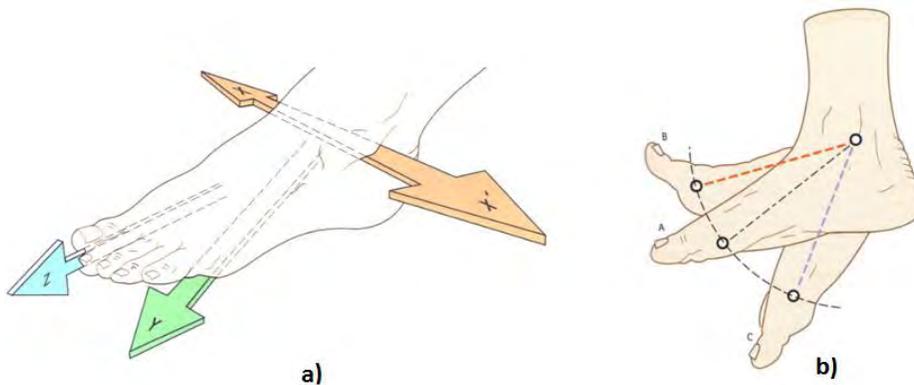


Figura 27. a) ejes de referencia articulación talocrural b) movimiento de flexo-extensión ilustraciones tomadas de (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

### 2.4.6 Pie

Son diversas las articulaciones que componen el pie con la función de complementar al tobillo, pues agregan 2 grados de libertad permitiéndole adaptarse en cualquier terreno, modificar la forma de la bóveda plantar, mejorar la distribución del peso y generar un sistema de amortiguamiento. Estrictamente el movimiento del pie no se puede ejecutar en un solo plano debido a la configuración de sus articulaciones, pero haciendo una aproximación es posible distinguir entre dos tipos de movimientos aducción-abducción en torno al eje "Y" y supinación-pronación en el eje "Z" (figura 27).

**Abducción:** cuando la punta del pie se dirige hacia afuera y se aleja del plano de simetría.

**Aducción:** cuando la punta del pie se dirige hacia dentro hacia el plano de simetría del cuerpo (plano sagital) (figura 28 c)). En conjunto la aducción y la abducción abarcan de 35° a 45° (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 1, 2006).

**Supinación:** es el giro sobre el eje Z que orienta la planta del pie hacia el eje sagital con hasta 52 ° en total (figura 28 d)).

**Pronación:** movimiento de giro que aleja la planta del pie del plano sagital con deslazamiento angular total de hasta 25° a 30° (figura 28 e)).

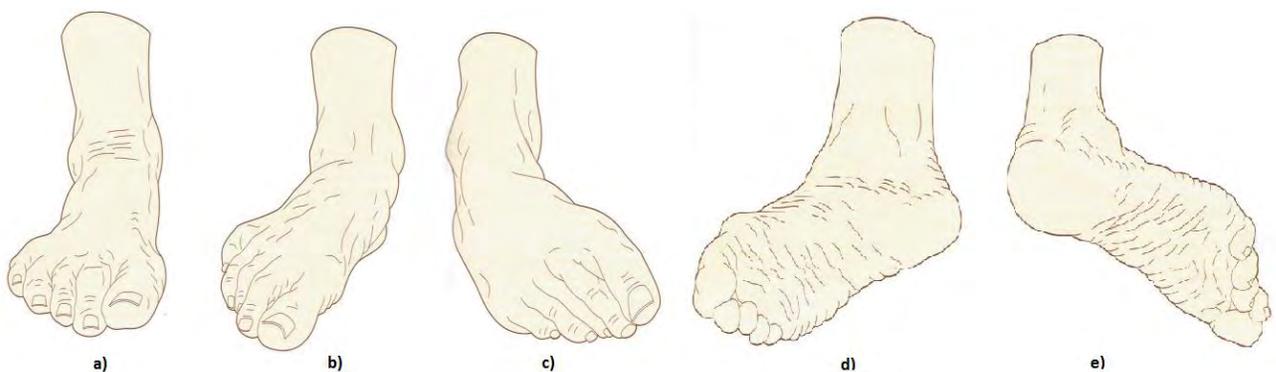


Figura 28. a) posición de referencia del pie b) movimiento de abducción del pie c) aducción del pie d) movimiento de Supinación e) movimiento de pronación. Tomado de (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2, 2006).

### 2.4.7 Raquis cervical

Es un conjunto de vértebras cervicales que sujeta y permite el movimiento de la cabeza, además de ser el esqueleto del cuello, su movimiento de flexo-extensión se mide en relación al plano masticador que es una referencia obtenida al sujetar un cartón con los maxilares y cuyo desplazamiento máximo es de  $130^\circ$  (figura 29 a)). La rotación va de  $80^\circ$  a  $90^\circ$  cuyo propósito es mayor eficacia en orientar los receptores sensoriales (figura 29 b)) (Kapandji, Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 3, 2016).

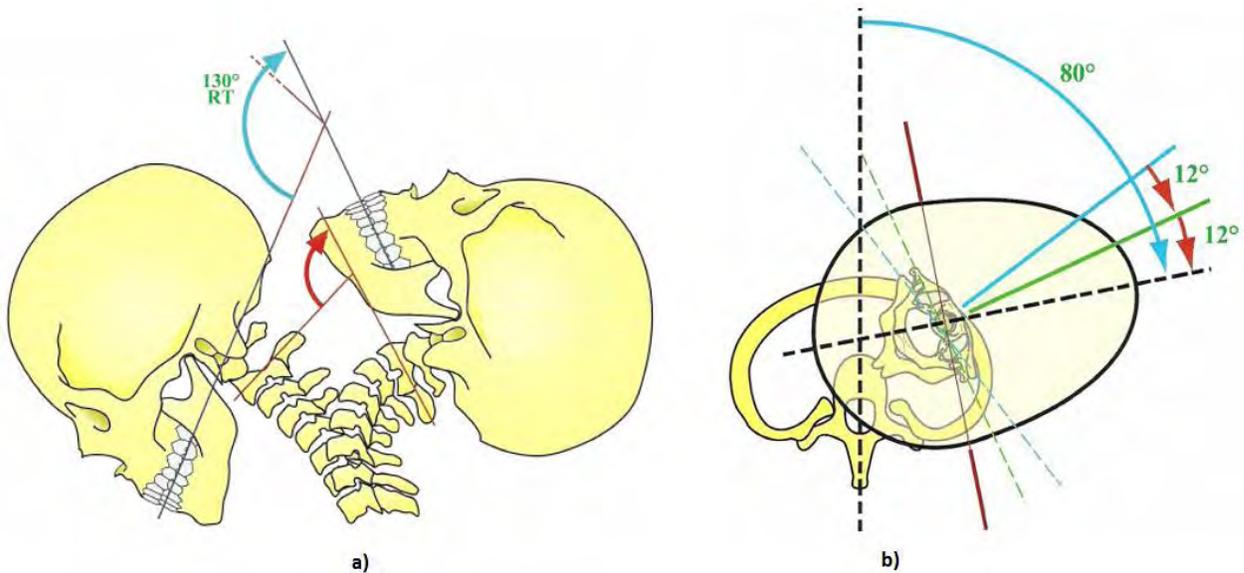


Figura 29. a) Movimiento de flexo-extensión tomando como referencia el plano masticador línea trazada a través de los dientes b) rotación del raquis cervical. Tomado de (Kapandji, Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 3, 2016).

La siguiente tabla resume el valor del desplazamiento angular para cada articulación como rangos base aplicados al robot humanoide, medidos a partir de la posición anatómica de referencia y cuyos desplazamientos de aducción, rotación interna, extensión y supinación se consideraron negativos.

**Tabla 1. Desplazamiento angular permisible en articulaciones humanas aplicables al robot humanoide.**

Desplazamiento angular en articulaciones aplicados al robot		
Articulación	Eje	Desplazamiento angular °
Hombro	x	-45 a 180
	y	0 a 180
Codo	x	0 a 145
Rodilla	x	-160 a 10
Cadera	x	- 30 a 145
	y	- 30 a 90
	OR	-60 a 40
Tobillo	x	-50 a 30
Pie (figura 27)	y	-22.5 a 22.5
	z	-52 a 30
Raquis cervical	x	130°
	z	-90 a 90

## 2.5 El equilibrio y su estabilidad en el cuerpo humano

Según el Dr. Garcia y Dr. Rodríguez (2015) desde el punto de vista mecánico el equilibrio estático en un cuerpo humano tiene que ver con las fuerzas y momentos externos que se ejercen sobre el cuerpo, para que el cuerpo este en equilibrio su sumatoria de fuerzas debe ser cero, también llamado equilibrio absoluto. Normalmente el equilibrio absoluto depende de la proyección del centro de gravedad con el polígono de sustentación. La mayoría de los tipos de locomoción en los humanos son inestables como la marcha y al correr. Sin embargo, se mantienen en posición bípeda gracias a la intervención del sistema nervioso y muscular que continuamente retroalimenta la posición en busca de la estabilidad.

Los principales factores mecánicos que determinan la estabilidad del equilibrio son la base de sustentación, la altura, el centro de gravedad respecto a la base de sustentación y la proyección del centro de gravedad en la base de sustentación.

**Distancia del centro de gravedad (CG) a la base de sustentación:** con una fuerza aplicada al centro de gravedad como se muestra en la figura 30, entre mayor sea la distancia del CG a la base de sustentación, mayor es el momento, entonces el desequilibrio es mayor, cuando la distancia disminuye para la misma

fuerza, el momento se hace menor, lo ideal sería que la distancia fuera 0 por lo que ninguna fuerza podría desequilibrar al cuerpo. Un tipo de locomoción donde el centro de gravedad es cercano al polígono de soporte es el reptar de algunos animales como las serpientes y lagartos. Otro ejemplo podría ser en deportes como el surf y el esquí alpino, donde los deportistas tienden a disminuir su altura del centro de gravedad para ganar estabilidad (Dr. Garcia & Dr. Rodríguez, 2015).

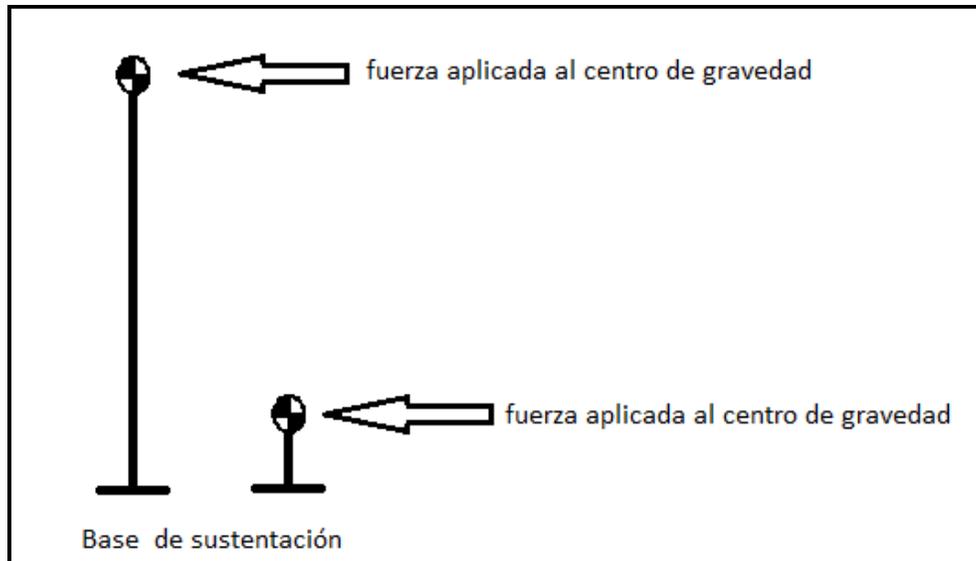


Figura 30. Influencia de la distancia al eje de acción de la fuerza. Cuanto mayor sea la distancia del brazo de palanca menor será la fuerza para desequilibrar el cuerpo.

**Base de sustentación:** también denominada en robótica humanoide, como polígono de soporte, es una región que encierra a todos los puntos en contacto entre el robot (o humano) y el suelo como si se usara una liga en el contorno de los pies (figura 31). Matemáticamente se define como un “convex hull” que es el polígono convexo más pequeño que encierra un conjunto de puntos en un plano, en este caso los puntos son las regiones del pie del robot en contacto con el piso (Kajita, Hirukawa, Harada, & Yokoi, 2014).

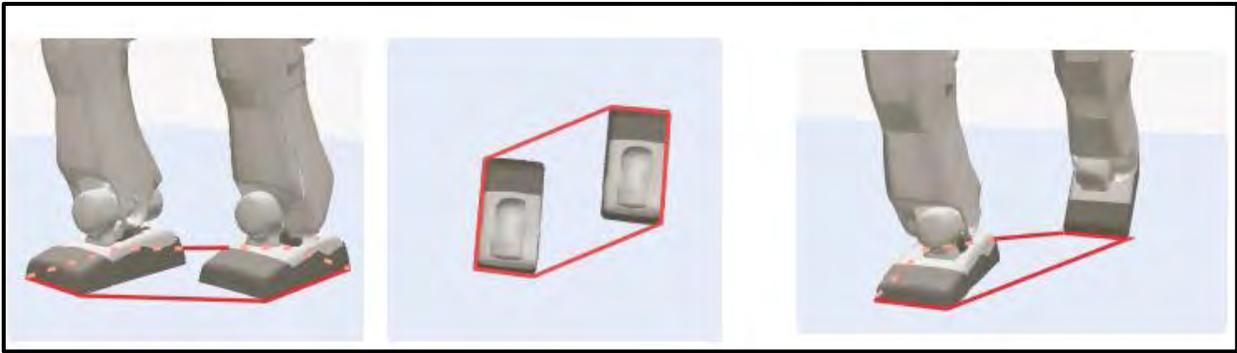


Figura 31. Polígono de soporte trazado por los pies de un robot, la última figura ilustra el contacto parcial de un pie con el suelo fuente: (Kajita, Hirukawa, Harada, & Yokoi, 2014).

El concepto de polígono de soporte es muy importante ya que es la base teórica del cual parten diferentes criterios de estabilidad en la marcha bípeda. Un ejemplo común, es la utilización de un bastón por los adultos mayores para ayudarse a mantener el equilibrio, el apoyo del bastón aumenta el polígono de soporte, también cuando sufrimos un desequilibrio en la bipedestación tendemos a desplazar un pie aumentando el área del polígono; en general entre mayor sea el área de este polígono, mayor será la estabilidad en el equilibrio (Dr. Garcia & Dr. Rodríguez, 2015).

### **Proyección del centro de gravedad**

La proyección del centro de gravedad, es el punto obtenido al proyectar sobre el plano horizontal “el suelo” el centro de gravedad. Cuando el cuerpo está en posición bípeda estática la proyección del centro de gravedad debe estar dentro del polígono de soporte, la posición más estable es cuando “la proyección esta exactamente en el centro del polígono”. Algunas veces la proyección del centro de gravedad no se encuentra dentro del polígono de soporte y aun así existe un equilibrio, por ejemplo: al correr, andar en bicicleta, caminar, etc., la razón es que influyen fuerzas externas además de la gravitatoria como la fuerza centrípeta y las inerciales. Un ejemplo común es al conducir una bicicleta, la estabilidad aumenta conforme aumentamos la velocidad, ya que la velocidad angular del ciclista y de la bicicleta aumenta la inercia angular y lineal. Durante la marcha humana no se está en equilibrio, prácticamente es una caída continua, en el momento de la fase de

apoyo, la proyección del centro de gravedad sale del polígono de sustentación, pero al colocar el siguiente pie en fase de apoyo se genera un aumento del área en el polígono, quedando el centro de gravedad dentro (Dr. Garcia & Dr. Rodríguez, 2015).

### **2.6 La marcha en robots humanoides**

Desde el punto de vista del uso de actuadores en robots, la caminata bípeda es clasificada en tres categorías “Active walking”, “passive walking” y “Hybrid walking” (Fukuda, Hasegawa, Sekiyama, & Aoyama, 2012). La primera es la marcha común en robots bípedos, en donde se necesita la ayuda de actuadores y control para que el robot camine. En “passive walking” tan solo con el diseño mecánico del robot se puede bajar determinadas pendientes (aprovechando la gravedad) caminando sin usar actuadores o control, en general sin aporte externo de energía. Un ejemplo es el diseñado por Tad McGeer el cual consta de piernas con rodillas unidas a una cadera con la peculiaridad de tener pies curvos (figura 32). Estos robots son denominados como “passive dynamic walkers”. (Álvaro, Forner, Moreno, Turowska, & Pons, 2008). A pesar del uso eficiente de energía tiene la desventaja de tener baja robustez hacia perturbaciones en el piso, solo pueden caminar con ciertas trayectorias y en determinadas pendientes. Por ultimo “Hybrid walking”, es una combinación de las dos anteriores en donde aprovechan el diseño de los robots “passive walking” junto con el control y actuación de motores para que el robot no solo camine en pendientes (Álvaro, Forner, Moreno, Turowska, & Pons, 2008).

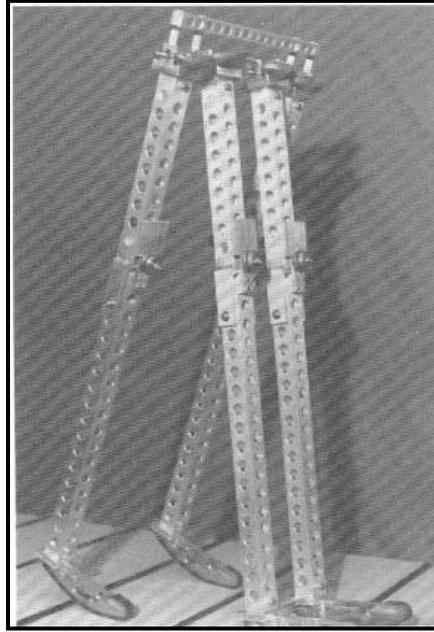


Figura 32. Máquina Dynamite con rodillas. Tomado de (Mcgeer, 1991).

Además, la “active walking” se puede dividir en dos tipos diferentes de caminata: caminata estática “static walking” y la caminata dinámica “Dynamic walking” (Kajita, Hirukawa, Harada, & Yokoi, 2014); que se caracterizan por la proyección de su centro de gravedad en el polígono de soporte durante la caminata. Para la primera, la proyección permanece siempre dentro de él y en la otra, existen periodos donde la proyección sale del polígono. En la robótica lograr una caminata dinámica es un desafío ya que requiere de un control robusto.

Algunos robots son diseñados con patrones de marcha basados en “static walking”, sin embargo, entre algunas de sus desventajas es que su velocidad de caminar debe ser lenta para mantener la proyección del centro de masa dentro del polígono de soporte (Fukuda, Hasegawa, Sekiyama, & Aoyama, 2012).

### **Criterio ZMP**

El Zero Moment Point (ZMP) es un indicador de la estabilidad en la marcha dinámica de un robot, fue definido por Vukobratović y Stepanenko en 1972, donde se expresa que mientras el ZMP este dentro del polígono de soporte se mantendrá la estabilidad dinámica del robot. Cuando una persona está de pie estáticamente la proyección del centro de gravedad coincide con el ZMP, sin embargo, al realizar

una marcha dinámica el centro de gravedad puede estar fuera del polígono de sustentación en contraste con el ZMP que nunca sale del polígono como se ilustra en la figura 33 (Kajita, Hirukawa, Harada, & Yokoi, 2014).

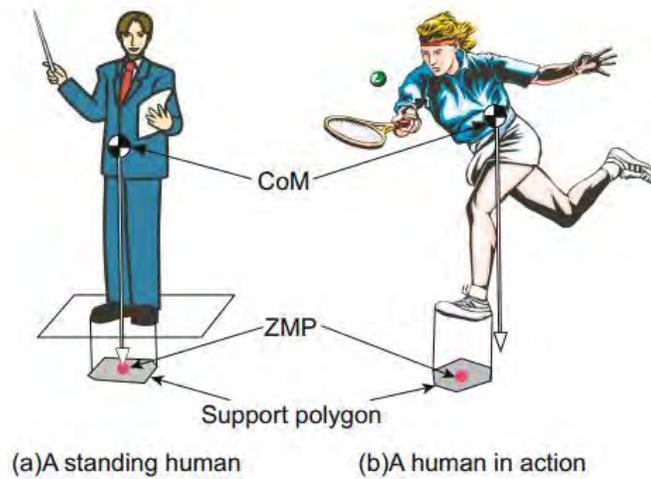


Figura 33. Izquierda: el ZMP coincide con el CG ambos se mantienen dentro del polígono de soporte, derecha: locomoción dinámica donde el CG sale del polígono sin embargo el ZMP siempre se mantiene dentro. Imagen obtenida de (Shuuji Kajita, 2014).

Durante la marcha se generan fuerzas que se distribuyen sobre las suelas de los pies tanto en dirección vertical como horizontal, es común que robots basados en este criterio utilicen un complejo arreglo de sensores para determinar esta distribución (figura 34).

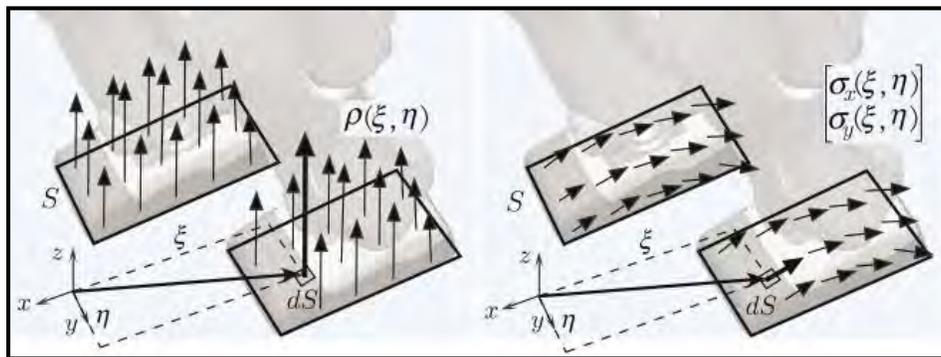


Figura 34. Izquierda fuerzas actuando en dirección normal a la suela, derecha fuerzas actuando paralelas a la suela. Tomado de (Shuuji Kajita, 2014).

El ZPM es un punto en el cual los momentos resultantes de las fuerzas se hacen cero, para el caso en 3D existen momentos verticales que no siempre son cero,

por lo que la definición formal según Kajita, Hirukawa, Harada, y Yokoi, (2014) es: “EL ZMP es el punto donde las componentes horizontales de los momentos de las fuerzas de reacción en el suelo son cero”.

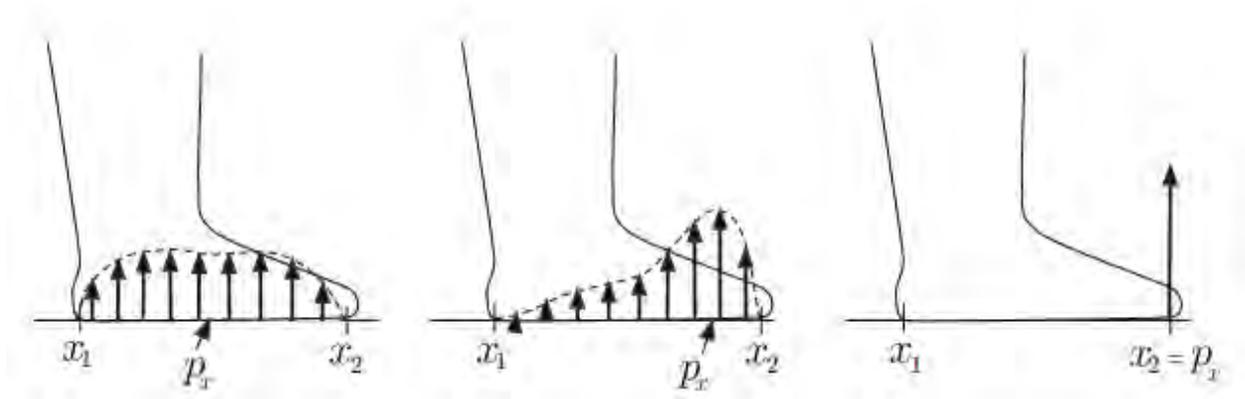


Figura 35. Izquierda: pie con distribución uniforme de fuerzas. Pie central con mayor distribución de fuerzas en un lado. Derecha pie con todas las reacciones concentradas en un punto tomado de (Kajita, Hirukawa, Harada, & Yokoi, 2014) .

La ubicación del ZMP dependerá de la distribución de fuerzas sobre el pie, para una distribución uniforme el punto debe estar en el centro, conforme las fuerzas se concentran en un costado el ZMP se desplaza hasta el punto de llegar a la frontera de la suela donde el robot comenzará la rotación (figura 35), por lo que el ZMP es una condición suficiente para garantizar la estabilidad y entre más cerca este del centro del polígono de soporte la caminata dinámica del robot será más estable y más robusta (Mejía, Scarpetta, & Rodríguez, 2015).

## CAPÍTULO III. DISEÑO ESTRUCTURAL

### 3.1 Especificaciones preliminares del robot

El robot tiene como objetivo participar en la RoboCup Soccer Humanoid League en las categorías TeenSize y KidSize, su diseño mecánico estará restringido por las siguientes reglas de la competencia:

1. El robot debe tener un cuerpo con forma humana: dos brazos, dos piernas y una cabeza unidos a un tronco.
2. Debe ser capaz de mantenerse de pie, sus únicos modos de locomoción permitidos son la marcha y carrera bípeda.
3. Cualquier acción del robot debe ser cinemáticamente equivalente a los movimientos humanos.
4. Seguridad: el robot no debe poseer ninguna configuración que pueda dañar a las personas, otros robots o el campo de juego.
5. Robustez: el robot debe mantener su integridad durante el juego.
6. Arnés: para poder levantar al robot durante el juego este debe tener agregado a su estructura en el área del cuello un arnés.
7. Color: el robot debe ser de color negro o gris oscuro no lustroso, está permitido que sean de color aluminio, gris o blanco con la condición de que sus pies sean de color negro.

La figura 36, muestra la configuración de un robot humanoide con las principales acotaciones especificadas por las reglas y con las cuales se definen las proporciones del robot.

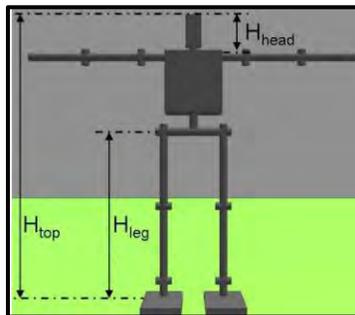


Figura 36. Forma de un robot humanoide en posición bípeda. Tomado de (RoboCup, 2015).

**Altura del robot:**

$H_{top}$  es la altura del robot definida como la distancia del suelo a la cabeza del robot cuando está en posición erguida y con las rodillas extendidas (figura 36).

El rango de altura para KidSize es  $40\text{ cm} \leq H_{top} \leq 90\text{ cm}$

El rango de altura para TeenSize es  $80\text{ cm} \leq H_{top} \leq 140\text{ cm}$

$H_{com}$  es el centro de masa del robot medido desde el suelo cuando está en posición erguida.

**Peso del robot:**

Para KidSize no hay una restricción en el peso, sin embargo, para TeenSize existe un peso máximo de 20 kg.

**Restricciones de tamaño:**

1. Cada pie abarcará una superficie rectangular con área máxima de:

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{(2.2H_{com})^2}{32}$$

2. Considerando el rectángulo que encierra el convex hull del pie, la relación entre el lado más largo con el más corto no debe exceder 2.5.
3. El robot debe estar contenido en un cilindro con un diámetro de  $0.55H_{top}$ .
4. La suma de los brazos y el ancho del torso a la altura del hombro debe ser menor que  $1.2H_{top}$ , la longitud del brazo es la suma de las longitudes de los eslabones que lo conforman, ambos brazos deben ser del mismo tamaño.
5. El robot no debe tener una configuración que se extienda más que  $1.5H_{top}$ .
6.  $H_{leg}$  es la longitud de las piernas incluyendo el pie, es medida con el robot en posición erguida desde el eje paralelo al suelo de la primera junta rotatoria hasta la punta del pie. Debe satisfacer  $0.35H_{top} \leq H_{leg} \leq 0.7H_{top}$ .
7.  $H_{head}$  es la altura de la cabeza incluyendo el cuello, medida desde el eje de la primera junta del brazo con el hombro, hasta la parte superior de la cabeza. Debe satisfacer  $0.05H_{top} \leq H_{head} \leq 0.25H_{top}$ .

### 3.1.1 Hardware

El diseño del robot humanoide debe ajustarse al siguiente hardware:

#### 1. Actuadores

Los actuadores en el robot son análogos a los músculos del cuerpo humano, puesto que generan la fuerza necesaria para mover cada articulación y son uno de los componentes más importantes del humanoide. Para su adecuada selección es necesario conocer por lo menos requerimientos del par en las juntas, aunque muchas veces ya seleccionado un servomotor el par estimado es sobrepasado debido al peso del mismo, por lo que este proceso es iterativo. También es conveniente que se seleccione un servomotor con una relación elevada potencia-peso y lo más ligeros posibles (Choong, Chee-meng, Aun-Neow, & Hong, 2003) ya que todo esto se ve reflejado en el desempeño del robot, es decir, si comparáramos dos robots del mismo tamaño uno con servomotores de elevada relación potencia-peso contra otro de una relación menor éste movería las articulaciones con mayor velocidad que el segundo y finalmente le resultara ventajoso al robot durante la competencia.

Como restricción, el robot a diseñar está sujeto al uso de servomotores CYS-S8218 y HSR-5990TG con los cuales cuenta el laboratorio.

#### Especificaciones:

Tabla 2. Principales características del servo motor a utilizar.

Servo motor digital CYS-S8218	
Voltaje	6.0V-7.4V
Velocidad angular	0.20s-0.18s/60°
Par	36kg-38kg/cm
Peso	164 g



Figura 37. Servomotor CYS-S8218 tomado de (CYS Model Technology Co., 2017).

Es posible usar servomotores HSR-5990TG - HSR-5498SG para extremidades que demanden un par bajo, como la cabeza y el cuello con la finalidad de disminuir el peso.

Tabla 3. Características del servomotor marca HITEC.

HSR-5990TG	
voltaje	6.0V-7.4V
Velocidad angular	0.17/.14
Par	24kg-30kg/cm
Peso	67.76 g



Figura 38. Servo motor modelo HSR-5990TG tomado de (HITEC RCD USA, Inc, 2017).

## 2. Tarjetas de desarrollo digital y controladores

Tarjeta Radxa lite / pro análoga al cerebro humano para el robot. Tiene como objetivo procesar y almacenar información, está basada en Core ARM y es capaz de soportar sistemas operativos como Android 4.2.2 y Linux. Su masa aproximada es de 108 g (Radxa Limited, 2017) el CAD fue tomado de (GrabCAD, 2017).



Figura 39. Tarjeta Radxa imagen obtenida de (Radxa Limited, 2017)

Para controlar los servomotores se utilizará la tarjeta lynxmotion-ssc-32, con masa aproximada es de 40 g, CAD tomado de (GrabCAD, 2017).



Figura 40. lynxmotion-ssc-32 tomado de (RobotShop inc, 2017).

### 3. Baterías

Se utilizarán baterías LiPo de 7.4 V, entre sus principales ventajas son su elevada relación peso-energía y un elevado valor en la tasa de descarga. Masa aproximada 116 g.



Figura 41. Baterías Traxxas de 7.4 V (Hobby People, 2017).

### 4. Cámara

Se dispone de una cámara web HD 720p modelo c270, para reducir peso muerto solo se utilizará el componente mostrado en la figura 42 b) (logitech, 2017).



Figura 42. a) Cámara Logitech tomado de: (logitech, 2017), b) CAD de la cámara Logitech tomado de (GrabCAD, 2017).

#### 3.1.2 Maquinaria de trabajo

Para un diseño adecuado de la estructura es necesario considerar las condiciones de manufactura, por lo que a continuación se describen las características importantes de las máquinas existentes en el laboratorio.

##### Impresora de prototipo rápido Prusa I3

Es un modelo autoreplicable de open source capaz de imprimir ABS (Acrilonitrilo butadieno y estireno) y PLA entre otros materiales polimericos. El componente a imprimir es diseñado a través de software de dibujo y exportado al formato stl

(Stereo lithogaphy), donde es dividido en capas por la impresora las cuales seran depositadas una por una hasta conformar el total del modelo en 3D (figura 43) (MakerMex, 2017).

Tabla 4. Principales especificaciones de la impresora Prusa I3.

Principales especificaciones	
Volumen de impresión	20x20x20 cm
Resolución	0.1 mm a 0.3
Diámetro de filamento	3 mm
Temperatura de boquilla	0° a 300° C



Figura 43. Impresora de prototipo rápido Prusa I3 (MakerMex, 2017).

### Fresadora mini CNC router 3040Z-DQ

Su estructura es de aluminio 6063, utiliza motores a pasos para orientar el husillo en cualquier punto del área de trabajo, tiene un peso total de 28 kg. La comunicación de esta máquina es a través de un puerto paralelo a la computadora, se controla con el software Mach 3 quien utiliza el código G para establecer las trayectorias de corte, estos son generadas previamente por ARTCAM, puede cortar diversos materiales como polímeros, maderas y hasta aluminios (China CNC Zone, 2017).

Tabla 5. Características técnicas de la fresadora mini CNC 3040Z-DQ.

Principales especificaciones	
Superficie de trabajo X, Y, Z	275X385X55mm
Exactitud de posicionamiento	0.05 mm
Velocidad de corte	300-2500 mm/min
Velocidad del cortador	1000~8000 RPM
Diámetro del porta herramienta	ER11/3.175mm
Software	Mach3/Emc2



Figura 43. Fresadora mini CNC. Tomado de (China CNC Zone, 2017).

### Torno Modelo Grizzly G0709

Utilizado para crear piezas de revolución, barrenar, manufacturar cuerdas internas y externas de tornillería en casi cualquier tipo de material con excelente precisión. Tiene un peso aproximado de 1300 lb (GRIZZLY INDUSTRIAL INC., 2014).

Tabla 6. Especificaciones del torno modelo Grizzly G0709.

Principales especificaciones	
Chuck 3 mordazas diámetro de trabajo	6 in
Chuck 4 mordazas independientes diámetro de trabajo.	8 in
Distancia entre centros	40 in
Plato de sujeción diámetro de trabajo	11 in
Revolución Chuck	70 – 2000 RPM
Tamaño máximo de cortador	5/8 in



Figura 44. Torno modelo Grizzly G0709 tomado de (GRIZZLY INDUSTRIAL INC., 2014).

### 3.1.3 Material de la estructura

Respecto al tipo de material, el equipo dispone en su inventario de aluminio y PLA, es necesario analizar el desempeño de otros materiales para seleccionar el que resulte más conveniente. En sí, el material dependerá de la disponibilidad, manufactura y desempeño mecánico. El robot se desempeñará en un campo de juego con otros robots, aunque está especificado por las reglas que el contacto

entre robots debe ser mínimo, a veces esto es inevitable. Por esta razón es común ver colisiones entre robots y caídas del propio bípedo, es necesario tener en cuenta estos factores para diseñar un robot robusto respecto a caídas para cuidar su integridad estructural.

### 3.2 Generación del concepto para el diseño estructural

Pensando en el consumo de energía, la potencia de los motores y el uso de material, se definió la altura como el valor mínimo del intervalo  $80\text{ cm} \leq H_{top} \leq 90\text{ cm}$  que es el rango en el cual el robot califica para ambas categorías. Así  $H_{top} = 80\text{ cm}$ . En la figura 45 se ilustran las variables asignadas a diversos segmentos del cuerpo del robot, necesarios para estimar las longitudes que cumplan con las restricciones expuestas en la sección 3.1

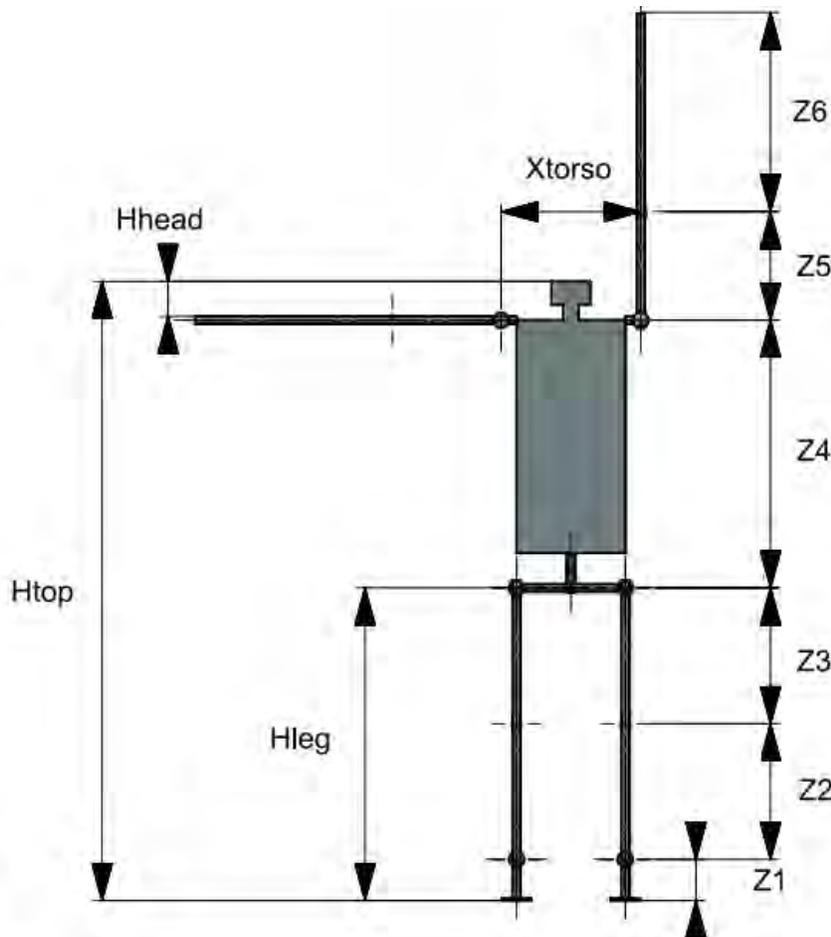


Figura 45. Secciones del robot.

Cada variable se define como:

Z1 es la altura del suelo al eje del actuador de la junta del tobillo.

Z2 es la altura del eje de del tobillo al eje de la rodilla.

Z3 medida del eje de la rodilla al eje de la cadera.

Z4 distancia del eje de la cadera hasta la parte superior del hombro.

Z5 distancia del eje del hombro hasta el eje del codo.

Z6 distancia del eje del codo hasta el final de la extremidad.

$Z_{total}$  es la extensión máxima del robot dada por  $Z_{total} = Z1+ Z2+Z3+ Z4+ Z5+Z6$  y debe ser menor a 120 cm.

La suma de los brazos y el ancho del torso serán definidos como  $X_{total}$  de acuerdo a la figura 45  $X_{total} = X_{torso} + 2(Z_5 + Z_6)$ , es conveniente que los brazos estén en el rango máximo ya que al robot le resultará ventajoso para incorporarse después de una caída.

De acuerdo a la altura de 80 cm las proporciones del robot están en los siguientes intervalos:

**Tabla 7. Valores límite de las restricciones en función de la altura.**

<b>Rangos en extremidades</b>		
<b>Variable (cm)</b>	Mínimo	Máximo
$H_{top}$	80	80
<i>Diámetro del cilindro</i>	-	44
$X_{total}$	-	96
$Z_{total}$	-	120
$H_{leg}$	28	56
$H_{head}$	4	20

La propuesta inicial de dimensiones es:

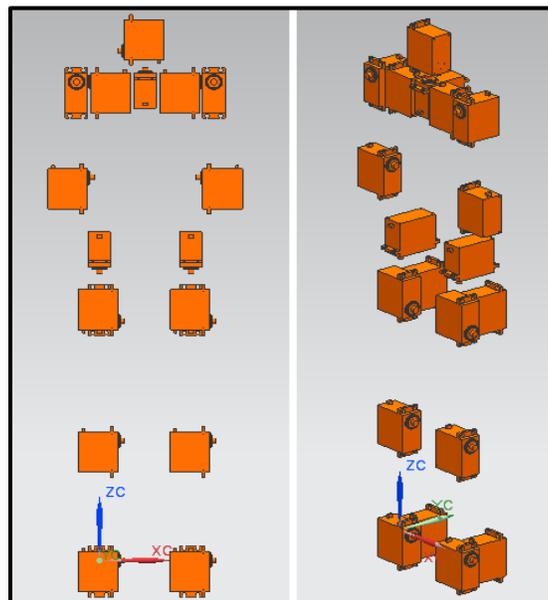
**Tabla 8. Longitudes propuestas para las secciones del cuerpo del robot.**

Descripción	Distancia (cm)
Piso a Tobillo (Z1)	5
Tobillo a Rodilla (Z2)	17.5
Rodilla a Pierna (Z3)	17.5
Pierna a hombro (Z4)	35
Hombro a codo (Z5)	14
codo a mano (Z6)	25
$Z_{total}$	114

De acuerdo a las tablas anteriores entonces el valor de  $X_{torso} = 18$  cm.

Estas dimensiones serán la base respecto a cálculos analíticos y tenderá a variar conforme se resuelvan problemas del diseño.

Utilizando NX se ubicaron los servomotores de acuerdo a las dimensiones de la tabla 8, con el objetivo de obtener una configuración inicial y la distribución de su centro de gravedad.



**Figura 46. Posición de los servomotores de acuerdo a las longitudes propuestas.**

De acuerdo a esto el centro de masa se encuentra a 44.5 cm del suelo. Se utilizará esta metodología para calcular la concentración de masa en brazos y piernas, necesario para el cálculo de momentos como se muestra a continuación.

Un parámetro importante en el diseño, es el par de los servomotores, en caso de que alguna extremidad sobrepase el par máximo podría dañar al servomotor, por esta razón es necesario hacer una estimación preliminar del par demandado en las extremidades, buscando las posiciones críticas para el robot. Lo anterior determinara si es necesario utilizar una configuración de varios servomotores para una articulación o el uso de un mecanismo de transmisión mecánica.

Basándose en el artículo de Serna & Aceves (2005), para un análisis preliminar podemos suponer que las articulaciones están fijas tratando cada extremidad como cuerpos rígidos, esto simplifica la estructura reduciéndola a un péndulo invertido. Ellos toman dos configuraciones críticas para el robot, cuando el robot está basculando en una pierna y cuando el robot levanta su cadera. Para el primer caso el robot apoya todo su peso en una pierna, en la simplificación se toma la articulación del tobillo como pivote (figura 47).

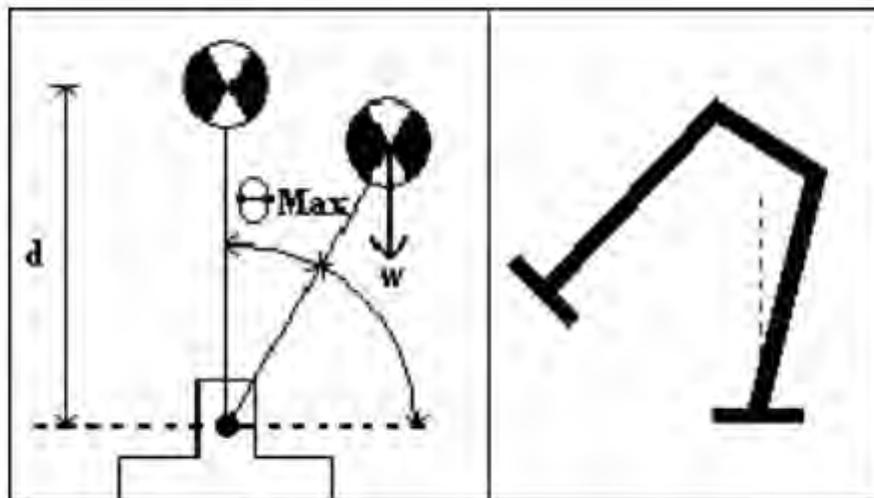


Figura 47. Método del péndulo para el cálculo del par en el tobillo cuando el robot bascula en una pierna, tomado de (Serna & Aceves, 2005).

En el segundo caso una pierna permanece rígida y fija al piso, el punto de rotación está en la junta de la pierna con la cadera figura 48.

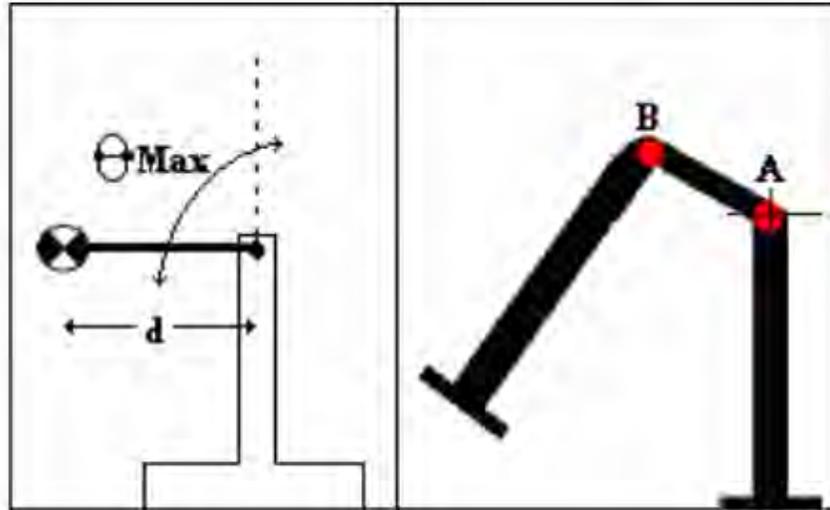


Figura 48. Método del péndulo para el cálculo del par en la articulación de la cadera cuando el robot bascula en una pierna, tomado de (Serna & Aceves, 2005).

Utilizando esta aproximación se calculó el par y ángulo máximo para el tobillo, la cadera, el brazo, y la pierna de las configuraciones mostradas en la figura 49.

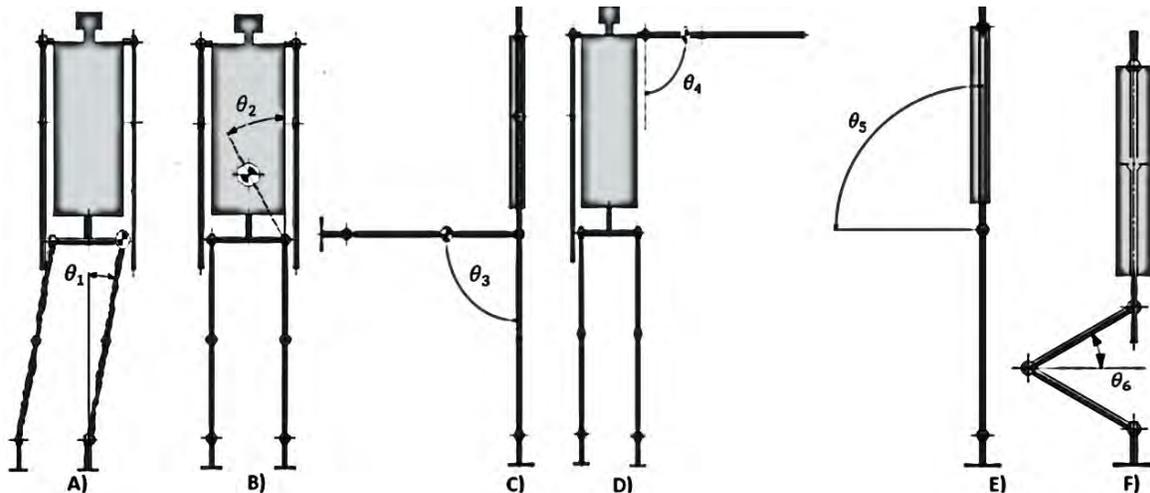


Figura 49. Ángulos del robot. A) Ángulo medido desde la línea paralela al eje vertical hasta el eje de la pierna. B) Ángulo medido con la línea paralela al eje vertical con origen en la articulación del fémur y la línea trazada desde la articulación del fémur al CG. C) Ángulo medido del centro de gravedad de una pierna con respecto a la otra pierna en posición paralela al eje vertical. D) Ángulo medido de la línea que intersecta a la articulación del hombro paralela al eje vertical hasta la línea trazada entre el CG del brazo y la articulación del hombro. E) Ángulo medido desde la línea que intersecta la articulación del fémur paralela al plano transversal con respecto hasta la línea trazada entre la articulación del fémur y el CG F) Ángulo medido desde la línea paralela al eje sagital que intersecta la rodilla y el eje del fémur.

La siguiente tabla muestra el par máximo en las articulaciones considerando una masa máxima total de 3.28 kg y utilizando los ángulos mostrados en la figura 49. Se utilizó NX para calcular la distribución de masa en brazos y piernas, así como

la distancia de su centro de gravedad a la articulación donde se ejerce el brazo de palanca.

**Tabla 9. Cálculo de brazos de palanca y ángulos máximos utilizando el método del péndulo.**

	Ángulo	Masa (Kg)	Brazo de palanca (cm)	Par máximo (kg*cm)	Valor del máximo ángulo (°)
Tobillo	$\theta_1$	3.28	39.5	38	17
Cadera	$\theta_2$	3.28	9	29.52	90
Pierna	$\theta_3$	0.82	13	10.66	90
Brazo	$\theta_4$	0.328	8.6	2.8208	90
Torso	$\theta_5$	3.28	4.5	14.76	90
Rodilla	$\theta_6$	1.64	17.5	28.7	0

De acuerdo a lo anterior los motores proporcionan el par necesario para mantener el equilibrio estático y soportar su propia masa en diferentes configuraciones del robot, con excepción de la articulación del tobillo que tiene un rango de 17° de desplazamiento el cual debe ser tomado en consideración por el programador.

Pensando además en el peso del hardware y las aceleraciones ambos desconocidos, se supone una masa máxima del doble del total de los servomotores. Esto nos da un rango máximo sobre el cual se diseñará el robot. La masa del robot total ideal es de 6.56 kg, para esta suposición se calculó los pares críticos generados mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla 10. Cálculo de brazos de palanca y ángulos máximos.**

	Ángulo	Masa(kg)	Brazo de palanca (cm)	Par máximo (kg*cm)	Valor del ángulo máximo (°)
Tobillo	$\theta_1$	6.56	39.5	38	8.4328
Cadera	$\theta_2$	6.56	9	38	40
Pierna	$\theta_3$	1.64	13	21.32	90
Brazo	$\theta_4$	0.656	8.6	5.6416	90
Torso	$\theta_5$	6.56	4.5	29.52	90
Rodilla	$\theta_6$	3.28	17.5	38	48.5458

Se observa en la tabla 10, que para la suposición en que el robot soporta el doble de la masa total de los servomotores, existen posiciones en donde se generan

pares mayores a los permisibles por los servomotores y como consecuencia se reduce el ángulo del brazo de palanca teniendo un mayor impacto en el ángulo  $\theta_6$  el cual debe llegar a 90 para la correcta incorporación del robot después de una caída, en consecuencia es necesario explorar otras opciones como implementar una reducción o disminuir el brazo de palanca en dicha junta.

De la tabla anterior tenemos 3 articulaciones críticas las cuales son influenciadas por grandes pares de fuerzas.

- **Tobillo**

Durante la fase de balanceo el tobillo necesita rotar sobre el eje sagital para desplazar el CG sobre el pie de apoyo, en ese momento el centro de masa del robot es soportado por un tobillo, según la tabla 10 el ángulo máximo permisible es de  $\theta_1 = 8.43^\circ$ .

- **Rodilla**

En determinadas posturas el servomotor de la rodilla soporta todo el peso del CG, por ejemplo, durante una caída es común que los robots para incorporarse de nuevo flexionen las piernas imitando una sentadilla figura 49 f) esto genera un brazo de palanca casi del tamaño de la pierna. Para esta situación la masa máxima soportada por la articulación es 2.17 kg por pierna en total la masa máxima soportada por los servomotores es de 4.34 kg con el brazo de palanca de 17.5 cm. Sin embargo, existe la posibilidad de utilizar los brazos para ayudar a elevar el CG o incluso desplazar el torso para disminuir el brazo de palanca.

- **Cadera**

El brazo de palanca máximo de la articulación coxofemoral de la cadera al centro de masa del robot es 5.79 cm, por lo que la cadera tendría una longitud máxima de eje a eje de 11.58 cm, sin embargo, por la morfología del robot el CG nunca llega a hacer los  $90^\circ$  en donde se da este par máximo.

Idealizar un peso máximo de 6.52 kg beneficia en que cualquier disminución en el peso contribuirá en el aumento de las velocidades de las extremidades. En las articulaciones cuyo par es excedido es posible implementar un sistema de reducción, como un tren de engranes que influiría en la velocidad de la articulación y a su vez aumentaría la masa del robot, otra opción es agregar otro servomotor

en la articulación aumentando la potencia y de igual manera la masa, es posible solucionar el problema tan solo disminuyendo las proporciones del robot tomando en cuenta que satisfaga las reglas de la RoboCup soccer.

La siguiente tabla muestra las principales ventajas y desventajas de las posibles soluciones.

**Tabla 11. Soluciones propuestas para lograr la posición del robot deseada en donde se sobrepasa el par del servomotor.**

Número de solución	Solución	Ventajas	Desventajas
1	Disminuir los brazos de palanca cumpliendo con las reglas de la RoboCup respecto a la proporción antropomórfica.	Llegar al par mínimo requerido en las articulaciones críticas. No se agrega masa a la estructura.	Morfología del robot desproporcionada "antiestético". Una situación crítica es la del brazo de palanca entre la articulación de la rodilla y la del fémur, disminuir la distancia entre estos hasta el mínimo permitido por las reglas influye en: La estatura del robot; se debe aumentar la distancia del tronco o cabeza. El tamaño de la zancada.
2	Colocar servomotores paralelos en las articulaciones críticas.	Aumentar la potencia de las articulaciones del robot aumentaría el par y la velocidad en articulaciones.	Aumento el gasto energético por el incremento de los servomotores, además de la posible necesidad de aumentar en número de las baterías. Aumentar el costo del robot debido al incremento de servomotores.
3	Implementar reducciones.	Llegar al par mínimo requerido en las articulaciones críticas. Uso de material comercial como engranes y bandas.	Aumento de masa, además existe una relación par-velocidad para conservar la potencia del motor en donde al incrementar una la otra disminuye, entonces en las articulaciones implementadas se llegará al par necesario pero el tiempo de posicionamiento a la postura deseada será mayor.
4	Jugar con las posturas del robot.	Llegar al par mínimo requerido.	Mayor complejidad durante el desarrollo de trayectorias y programación.

Dando énfasis en minimizar el peso se optó por la opción 4, en consecuencia, el programador deberá cuidar que no se sobrepase el par en determinadas posturas especialmente en el ángulo  $\theta_6$  donde con el valor de  $0^\circ$  el brazo de palanca

genera el momento máximo, en dicha situación el robot deberá utilizar brazos y movimientos del torso para disminuir el brazo de palanca.

### 3.3 Selección del material

Antes de proponer diseños de la estructura es conveniente definir los posibles materiales con los cuales se fabricará el robot, ya que la geometría de los ensambles y la unión entre estos depende del material. Una de las prioridades es disminuir el peso de la estructura, sin embargo, se debe tomar en cuenta la disponibilidad, manufactura y diversas propiedades mecánicas. Se comenzará con la selección de los posibles materiales para la sujeción de los motores y la estructura mecánica del robot.

Respecto a la selección basada en las propiedades mecánicas, es conveniente resaltar que un material se comporta diferente según la modalidad de carga a la que es sometido por lo que existen diversos criterios de falla según el material, por esa razón existen materiales enfocados a determinadas aplicaciones. Para poder hacer una comparación del desempeño mecánico de diferentes materiales, es necesario mantener las mismas condiciones tanto de geometría como el tipo de carga a la que es sometido: Tensión axial, compresión y pandeo, flexión y torsión. Una de las consideraciones que hacen validos estos criterios es suponer que el material es isotrópico y que el material es linealmente elástico. Se analizará el comportamiento de una barra sometida a tensión, así como el de una barra sometida en torsión ambas con diferentes materiales buscando la masa necesaria para que el material soporte determinada situación.

#### **Tensión axial:**

En la figura 50 se observa una barra cilíndrica de diámetro “D” y una longitud “L” sometida a una fuerza axial “F”, Se considerará una deformación máxima de la barra de  $\varepsilon = 0.2\%$  donde se genera el punto de fluencia. Proponer diferentes materiales para la fabricación de la viga modifica el módulo de Young del cual depende área de la sección transversal de la geometría y junto con la densidad se puede obtener la masa necesaria para que la deformación sea la establecida.

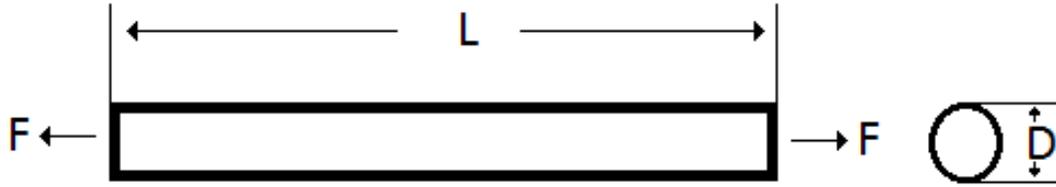


Figura 50. Viga sometida a carga axial.

Para encontrar el diámetro de la barra que satisfaga dicha deformación se parte de la ley de Hooke que puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Además, se sabe que el esfuerzo es la relación de la fuerza aplicada sobre un área determinada:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Por lo que se puede obtener:

$$E\varepsilon = \frac{F}{A}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo normal a la superficie y “E” el módulo de Young del material.

El área para la sección circular es:  $A = \pi \frac{D^2}{4}$

El diámetro de la barra está determinado por  $D_1 = \sqrt{4F/\pi E\varepsilon}$

Donde  $D_1$  es el diámetro mínimo de la barra cuando el material es sometido a un esfuerzo que ocasiona como máximo una deformación del 0.2%, entonces se garantiza cierta rigidez.

Para una geometría en la cual la deformación no es prioridad sino su resistencia máxima se utiliza el  $\sigma_{ultimo}$  que es la carga máxima que soporta el material antes de la fractura.

$$\sigma_{ultimo} = \frac{F}{A}$$

Pero  $A = \pi \frac{D_2^2}{4}$  sustituyendo en la ecuación anterior y despejando  $D_2$ .

$$D_2 = \sqrt{4F/\sigma_{ultimo}\pi}$$

Donde  $D_2$  es el diámetro mínimo para el cual el material resista una carga F sin fallar.

La masa de la barra está determinada por:

$$m = \rho V$$

$\rho$ = densidad del material y  $V$ =el volumen del cilindro.

$$\text{Entonces: } V = LA = L\pi \frac{D^2}{4}$$

$$m = \rho L\pi \frac{D^2}{4}$$

Para determinar la masa de diferentes materiales sometidos a tensión se utilizó una carga de 64.23 N en una longitud L de un metro, con una deformación de  $\varepsilon = 0.2\%$ , además para obtener el diámetro respecto a la resistencia se utilizó el valor de la resistencia a la tracción =  $\sigma_{ultimo}$ . El valor de la masa para ambas condiciones se muestra en la tabla 12 con diferentes materiales.

### **Torsión:**

Suponiendo una barra con sección transversal circular que transmita un par T como se muestra en la figura 51.

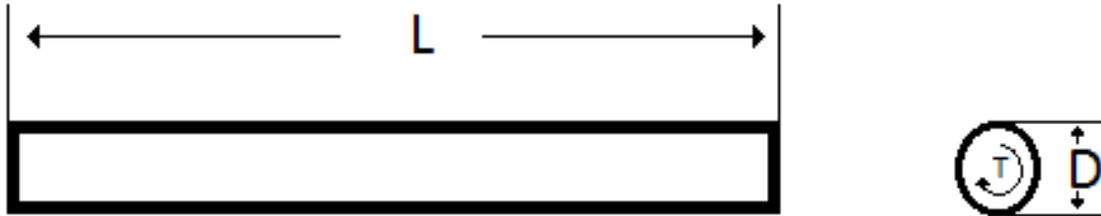


Figura 51. Viga sometida a torsión.

El ángulo de giro en dirección radial de los extremos de la barra es:

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{T(x_2 - x_1)}{GJ}$$

“G” es el módulo de elasticidad en cortante,  $x_2 - x_1 = L$  = longitud de la barra, “T” es el par de torsión y “J” es el momento polar de inercia de la sección transversal.

Entonces:  $(\phi_2 - \phi_1) = \frac{TL}{GJ}$

Siendo la barra un cilindro, el momento polar se puede calcular con la siguiente ecuación:  $J = \frac{\pi}{32} D^4$ .

Despejando J e igualando a la ecuación anterior  $J = \frac{\pi}{32} D^4 = \frac{TL}{G(\phi_2 - \phi_1)}$

$$D = D_3 = \sqrt[4]{\frac{32TL}{\pi G(\phi_2 - \phi_1)}}$$

$D_3$  es el diámetro mínimo para un desplazamiento angular máximo especificado, basado en los requisitos de rigidez del material por lo que se debe especificar la deformación máxima.

Para satisfacer requisitos de resistencia se utiliza  $\tau_{max} = \frac{Tr}{J}$

Donde  $r$  es el radio del cilindro y el esfuerzo cortante máximo adquiere el valor de la resistencia al esfuerzo cortante del material.

$$\frac{\pi}{32} D_4^4 = \frac{Tr}{\tau_{max}}$$

$$2r = D_4$$

$$D_4 = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi\tau_{max}}}$$

Donde  $D_4$  es el diámetro mínimo para soportar un  $\tau_{max}$  sin fallar, el valor de la masa se obtiene de la misma manera que para una carga sometida a tensión. Para el cálculo de la masa se propusieron los siguientes valores.

$$T = 64.288 \text{ N}\cdot\text{m}.$$

$$\tau_{max} = \text{resistencia al corte del material}$$

$$L = 1 \text{ m}$$

$$\phi_2 - \phi_1 = 0.002 \text{ rad}.$$

La siguiente tabla muestra diversos materiales propuestos, con los cuales posiblemente se pueda manufacturar la estructura mecánica del robot y que se pueden obtener en diversas sucursales de la república.

**Tabla 12. Propiedades de diversos materiales propuestos para la estructura del robot.**

Material	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Módulo de Young (Pa)	Módulo de corte (Pa)	Resistencia a la tracción (Pa)	Resistencia al corte (Pa)
Aluminio 5050 (MatWeb, Aluminum 5050-H32, 2016)	2690	6.9E+10	2.59E+10	1.72E+08	1.17E+08
PET (MatWeb, Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced, 2016)	1220	2.9E+09	2.79E+07	3.39E+07	1.03E+06
PVC (MatWeb, DIAB Divinycell® H 80 Semi-rigid PVC Foam Core Material, 2017)	92	8.0E+08	3.10E+08	2.20E+06	1.00E+06
Nylon (MatWeb, Overview of materials for Nylon 66, Unreinforced, 2016)	2700	5.0E+09	1.00E+09	1.00E+08	6.50E+07
MDF Delgado (MASISA S.A, 2017)	870	4.0E+09	1.60E+09 con 0.25 de Poisson	1.00E+06	2.50E+09
Acrílico (Plexiglas® by Arkema, 2017)	1190	3.1E+09	1.15E+09	7.24E+07	6.21E+07
AISI 310 (MatWeb, AISI 310, 2017)	8000	2E+11	2.94E+11	6.55E+08	3.28E+08

Posteriormente basados en las ecuaciones de tensión y torsión expuestas anteriormente, se calcularon los diámetros que satisfacen las condiciones de rigidez y resistencia; además, con dichos diámetros se obtuvo la masa para cada material. La tabla 13 muestra el diámetro y en la tabla 14 la masa de las barras con carga en tensión y torsión, algunos materiales necesitan menor masa en tensión, pero la cantidad de masa que necesitan en torsión es mayor con respecto a otros materiales como el caso del PET siendo el aluminio 5050 y el acero AISI 310 materiales con mejor desempeño tanto en tensión como torsión.

**Tabla 13. Valor de los diámetros de las barras según el material.**

Material	Diámetro en tensión $D_1$ (m)	Diámetro en tensión $D_2$ (m)	Diámetro torsión $D_3$ (m)	Diámetro torsión $D_4$ (m)
Aluminio 5050	0.000770718	0.000689852	0.059627976	0.01409196
PET	0.003743808	0.00155389	0.329134915	0.068247634
PVC (Cloruro de Polivinilo)	0.007152536	0.006099703	0.180289159	0.068923397
Nylon	0.002861014	0.000904732	0.134516329	0.017142029
MDF delgado	0.003198711	0.009047321	0.119603809	0.005078319
Acrílico	0.003631945	0.001063325	0.129857246	0.017409211
AISI 310	0.000452366	0.000353508	0.032482148	0.009999146

**Tabla 14. Valores de la masa según el tipo de carga y condición de falla (rigidez o resistencia) para diferentes tipos de materiales.**

Material	Masa tensión kg		Masa torsión Kg	
	Rigidez	resistencia	Rigidez	Resistencia
Aluminio 5050	0.001255	0.001005	7.51177	0.419551
PET	0.013430	0.002313	103.8000	4.4629797
PVC	0.003701	0.002691	2.35120	0.343624
Nylon	0.017358	0.001736	38.37105	0.623129
MDF delgado	0.006991	0.055931	9.77460	0.017622
Acrílico	0.012329	0.001057	15.76047	0.283266
AISI 310	0.001286	0.000785	6.62933	0.628211

Además, considerando los posibles tipos de manufactura en los materiales se generó la siguiente tabla:

**Tabla 15. Algunos tipos de manufactura para los materiales propuestos y uniones mecánicas comunes.**

Material	Tipo de manufactura	Tipo de unión mecánica
Mdf	Corte con láser, fresado en CNC, corte manual.	Pegamento, taquetes, tornillos, clavos, grapas.
Aluminio	Corte con láser, fresado en CNC, troquelado, fundición, torneado.	Dobleces con tornillos, tornillos pasados, remaches, pegamento, soldadura.
PVC	Laser, fresado en CNC, Termo formado, torneado.	Pegamento, tornillos.
Nylon	torneado, fresado en CNC	Pegamento, tornillos.
PET	Inyección, Termo formado	Pegamento, tornillos.
Acrílico	corte CNC, laser	Pegamento, tornillos.
AISI 310	Corte con láser, fresado en CNC, troquelado, fundición, torneado.	Tornillos pasados, remaches, pegamento, soldadura.

Basados en las tablas anteriores se usará aluminio 5050, pues es de los materiales más óptimos cuya cantidad de masa es menor a la de otros materiales tanto para cargas axiales como de torsión, respecto a su manufactura es posible efectuarse en el laboratorio por el método de corte en CNC y torneado a diferencia de ciertos materiales cuyas propiedades hacen complicado su maquinado, por último, ya que se cuenta en el laboratorio con placas de aluminio 5050 su selección disminuiría tiempos y gastos en el diseño. Las principales uniones mecánicas seleccionadas son tornillos, puesto que el robot es susceptible a modificaciones, mejoras y reparaciones.

Para análisis posteriores de la estructura es necesario obtener los valores que caracterizan el aluminio mecánicamente, así, se efectuó una prueba de tensión del material disponible en el laboratorio.

La prueba de tensión se emplea para obtener diversas propiedades mecánicas de los materiales, es estandarizada por “American Society for Testig and Materials” (ASTM). Las condiciones de la prueba se especifican en la norma ASTM E8, puesto que el equipo cuenta principalmente con placas de 2 mm de espesor y basados en esta norma se establecieron las dimensiones de la probeta para especímenes tipo hoja. Posteriormente se maquinaron en la fresadora CNC

probetas paralelas a las estrías del aluminio y probetas ortogonales a las mismas, la máquina CNC y las probetas se ilustran en la figura 52. El proceso de conformado para obtener este tipo de placas es el laminado, en donde durante este proceso el grano del aluminio se alarga y gira provocando la alineación de planos cristalográficos que se traduce en la anisotropía del material por lo que se espera una mayor resistencia del material en la dirección del laminado (Askeland, c1998).

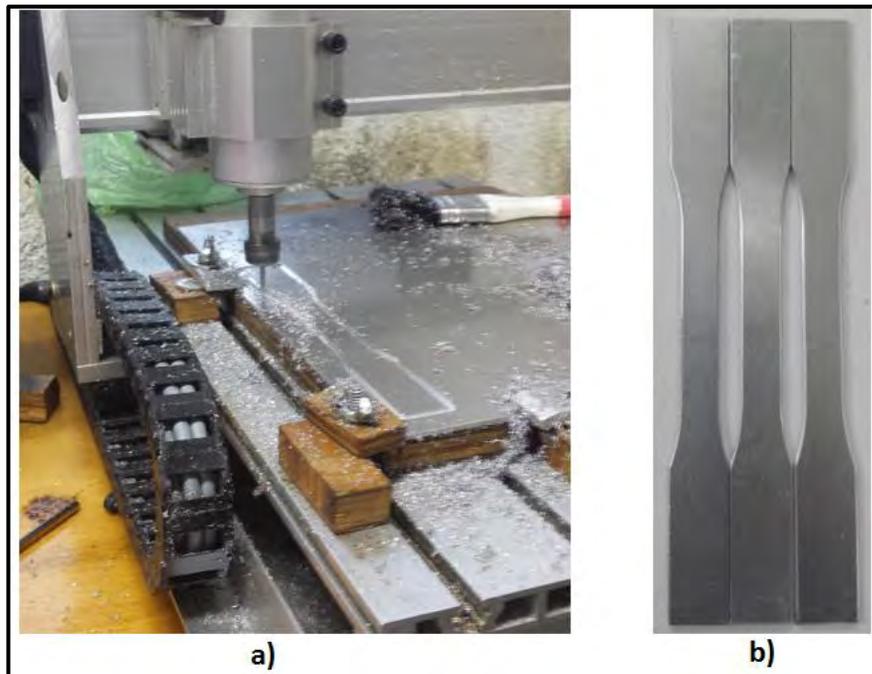


Figura 52. a) Manufactura de probetas en máquina CNC. b) Probetas para prueba de tracción.

La prueba de tracción o tensión se efectuó en una máquina universal de pruebas Instron (figura 53), antes de montar cada probeta se obtenían sus dimensiones con un calibrador de vernier y se registraba en el software de la máquina. Las probetas se sujetaron en cada extremo por mordazas en el área especificada por la norma y luego cada una fue sometida a cargas axiales progresivas hasta la falla del aluminio.



Figura 53. Máquina Instron para ensayo de tracción.

Durante la prueba de tracción el área inicial de la sección transversal de la probeta  $A_0$  y la carga  $F$  suministrada por la máquina normal a esta área determinaban el esfuerzo ingenieril que se grafica contra la deformación ingenieril definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\text{esfuerzo ingenieril: } \frac{F}{A_0}$$

$$\text{deformación ingenieril: } \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

Donde  $l_0$  es la longitud calibrada inicial de la probeta y  $l_f$  es la longitud calibrada después de aplicarse una carga.

La gráfica obtenida de la prueba de tracción “esfuerzo-deformación” provee diversos datos del comportamiento del material, algunos de estos son:

**El esfuerzo de cedencia o fluencia:** es el esfuerzo a partir del cual comienza a deformarse plásticamente el material, en el diseño cuando se desea evitar que un componente se deforme plásticamente se debe garantizar que los esfuerzos sean

menores al esfuerzo de cedencia. Ya que es difícil determinar en qué punto se lleva a cabo la transición entre la región elástica y la plástica se determina el esfuerzo de cedencia convencional, ubicado por una línea paralela a la región lineal de la curva esfuerzo-deformación con origen en el 0.2% de la deformación y que intersecta a susodicha curva (Vable, 2006).

**Esfuerzo ultimo o resistencia a la tensión:** es el esfuerzo máximo de la curva esfuerzo-deformación ingenieril (Vable, 2006).

**Esfuerzo de fractura:** es el esfuerzo en el punto de ruptura (Vable, 2006).

**Módulo de Young o de elasticidad:** es la pendiente de la región lineal de la curva esfuerzo-deformación, entre más grande sea el valor de esta pendiente más fuerza se necesita para deformar el material, por lo tanto, es una medida de la rigidez (Askeland, c1998).

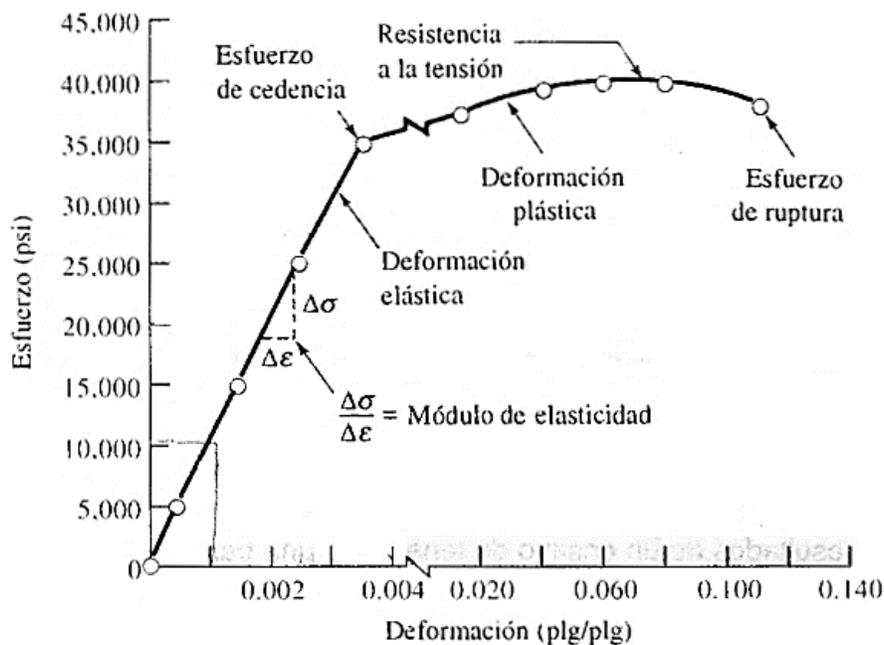


Figura 54. Gráfica esfuerzo-deformación tomado de (Askeland., c1998).

Con estos valores se puede predecir su comportamiento del material bajo cargas en tensión, sin embargo, como se analizó en la selección del material la estructura del robot también está sometido a otro tipo de cargas. Es por eso necesario obtener otra propiedad del material denominada modulo cortante o módulo de

rigidez que relaciona el esfuerzo cortante con la deformación cortante del material. No obstante, no se cuenta con una máquina de pruebas de torsión, pero es posible relacionar el modulo cortante con el módulo de Young con las siguientes suposiciones:

**Isotropía:** indica que la relación esfuerzo-deformación son independientes de la orientación de sistema de coordenadas en un punto (Vable, 2006).

**Homogeneidad:** indica que un material tiene las mismas propiedades en todos los puntos de su cuerpo (Vable, 2006).

Suponiendo un aluminio isotrópico homogéneo podemos relacionar el módulo de Young y el modulo cortante con las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{E}{2(1 - 2\nu)}$$

$$\nu = \varepsilon_w / \varepsilon_L$$

Donde  $\nu$  es el módulo de Poisson,  $\varepsilon_L$  es la deformación axial y  $\varepsilon_w$  la transversal.

Se usará el valor de 0.33 para el módulo de Poisson del aluminio.

En realidad, para poder modelar el comportamiento lineal esfuerzo-deformación de un material se necesitan conocer por lo menos 21 constantes, mientras que comúnmente se ocupan tan solo 3 ( $E$ ,  $G$ ,  $\nu$ ). Esto es posible por la suposición de isotropía, además para las 3 constantes se contempla un promedio de esfuerzos y deformaciones generados en la estructura cristalina del material (Vable, 2006).

Los resultados del examen de tracción se muestran en el apéndice figuras: 95, 96, 97 y 98, se tomaron los valores mínimos entregados los cuales se resumen en la siguiente tabla para el aluminio 5050.

Tabla 16. Propiedades del aluminio 5050.

Propiedades del aluminio 5050	
Módulo de Young MPa	10880
Módulo cortante MPa	16000
Módulo de Poisson	0.33
Esfuerzo de fluencia al 0.2% (MPa)	157.1
Esfuerzo último (MPa)	102
Densidad kg/m <sup>3</sup>	2690

### 3.4 Generación del concepto: acoplamiento del motor en la estructura

En esta sección se evaluarán las principales ideas para resolver diversos problemas del diseño de la estructura del humanoide. El robot con una morfología humana debe poseer simetría sobre su eje sagital simplificando parte del diseño, además, sus articulaciones en las extremidades se caracterizan por transmitir uno o dos grados de libertad, por esta razón proponiendo los dos tipos de articulaciones se tendrá gran parte de la estructura, sin embargo, durante el diseño de las articulaciones se deben considerar diversos factores como el tipo ensamble con la estructura su unión mecánica, peso y su manufactura.

Algunos robots transmiten la potencia de sus servos o motores a través de bandas, engranes y otros más sofisticados utilizan transmisión armónica (Harmonic drives) que entre algunas de sus ventajas esta la elevada relación de transmisión con respecto a su peso y tamaño, no tienen holgura (backlash) como en el caso de la transmisión con engranes que repercute en una excelente exactitud de posicionamiento (Harmonic Drive LLC, 2017). Para el caso del servomotor que se utilizará, se descartó el uso de algún mecanismo de transmisión y aunque posee un eje no cuenta con los aditamentos para incorporar coples o un eje posterior al original que evite su flexión y disminuya la carga.

A continuación, se analizan algunas propuestas tomando en cuenta lo susodicho y enfocando el diseño a la manufactura, es decir, debe tomar en cuenta que se dispone de un torno, CNC y máquina de prototipo rápido.

### 3.4.1 Propuestas para articulación de un grado de libertad

#### Propuesta 1 para un grado de libertad

Esta constituye en el empotramiento del servomotor a la estructura y la transmisión del par directamente a la extremidad como se ilustra en la figura 55. Esta configuración representa la opción más simple de sujeción del motor y de transmisión del par, en consecuencia, representa la opción con menor peso, menores componentes y facilidad de manufactura.

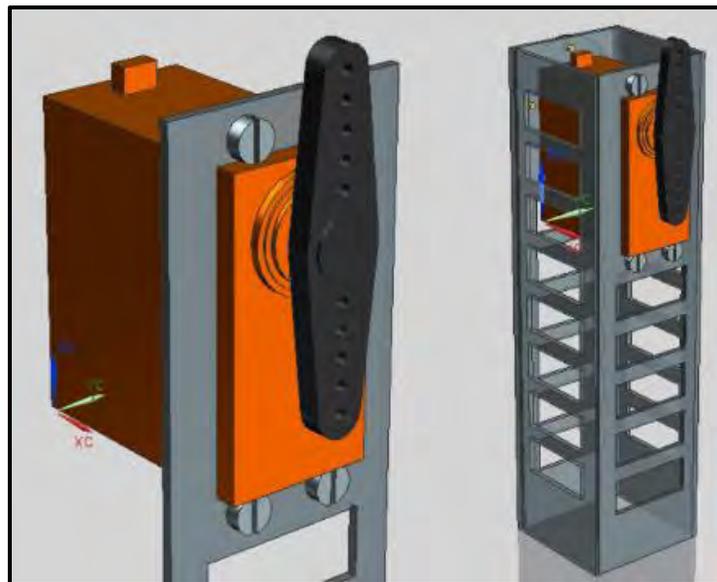


Figura 55. Empotramiento del servomotor a la estructura para un grado de libertad.

Con la finalidad de disminuir la carga en el eje del servomotor y disminuir la flexión del eje, es necesario agregar un eje colineal en la parte trasera del servomotor. Aplicando esta propuesta un bosquejo de la rodilla se muestra en la figura 56.



Figura 56. Empotramiento del servomotor con su accesorio colineal.

Observaciones:

1. El motor se apoya en la estructura y es sujetado por los tornillos, se debe garantizar un buen contacto.
2. El componente acoplado a la flecha es un accesorio incluido en la compra del servomotor, pero solo se dispone de un componente por servomotor, en consecuencia, es necesario considerar la situación crítica en donde este componente falle y se requiera un reemplazo.
3. Utiliza dobleces.

### **Propuesta 2 para un grado de libertad**

Esta propuesta está enfocada en proteger el accesorio acoplado a la flecha del motor agregando una segunda flecha que transmitirá la potencia a la extremidad, la cual deberá ser menos resistente que el accesorio que se desea proteger, es necesario incluir rodamientos más grandes por el tamaño del eje. Los componentes están unidos con tornillos a láminas de aluminio que sostienen el servomotor (figura 57).

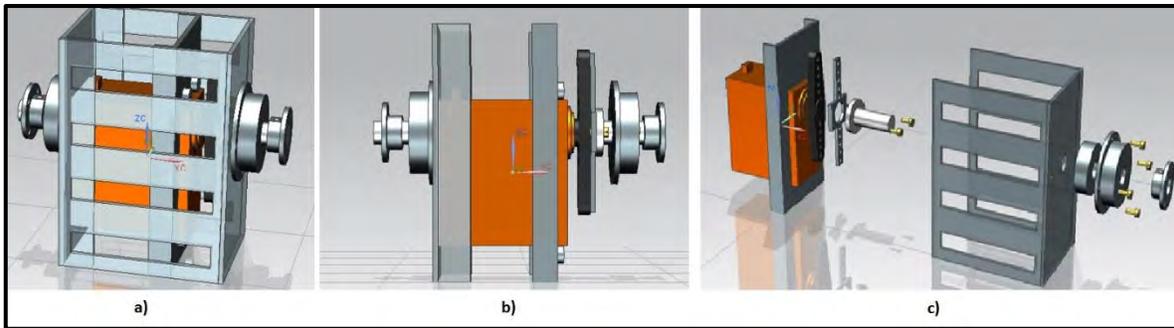


Figura 57. a) vista 3D b) vista frontal sin carcasa c) vista en explosión del ensamble.

Observaciones:

1. Contiene mayores componentes y más material, es una propuesta más pesada que la anterior.
2. Mayor dificultad en el maquinado de los componentes.
3. Se utilizan dobleces en las láminas.

### Propuesta 3 para un grado de libertad

Consta de dos placas sobre las que incide el servomotor el cual está empotrado por tornillos a una de las placas. Ambas placas se unen por medio de varillas roscadas con tuercas, el eje colineal se empotra en la otra placa con tornillos. La finalidad de las varillas roscadas es dar a la estructura rigidez (figura 58).

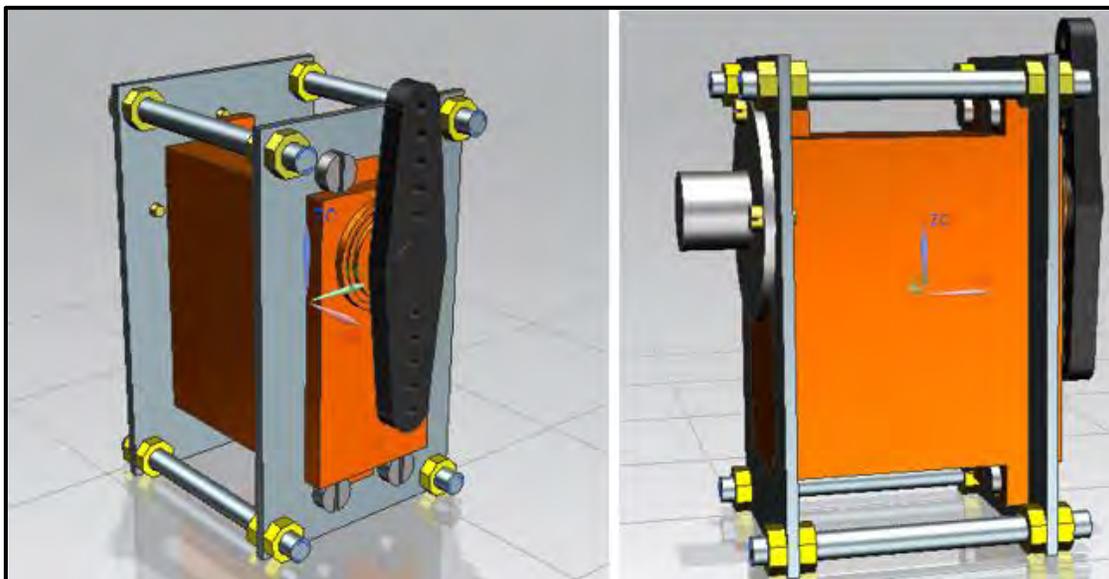


Figura 58. Diferentes vistas para la propuesta 3.

Observaciones:

1. Contiene roscas con tuercas que al ser sometidas a vibración se aflojarían, una posible solución es usar tornillos con tuercas de seguridad.
2. Facilidad en maquinado.
3. No se utilizan dobleces.

### 3.4.2 Propuestas para articulación con dos grados de libertad

Esta articulación es necesaria en el tobillo y en la cadera, un grado de libertad debe permitir el movimiento de la pierna en dirección sagital y el segundo permite el movimiento en dirección frontal, aunque para el caso de la cadera es necesario un tercer grado de libertad que permita la rotación de la pierna sobre el eje del fémur, esto se logra empotrando un servomotor al torso con su eje fijo a la pierna, de esta manera al girar el eje toda la pierna girará. Entonces la cadera se compone de una articulación de 2 grados de libertad similar a la del pie a continuación se analizan algunas propuestas:

#### Propuesta 1 para dos grados de libertad

Para este tipo de articulación es necesario implementar dos servomotores, esta propuesta usa un ensamble de dos láminas dobladas unidas con tornillos, ambos servomotores y los soportes para los ejes se empotran a dichas laminas figura 59.

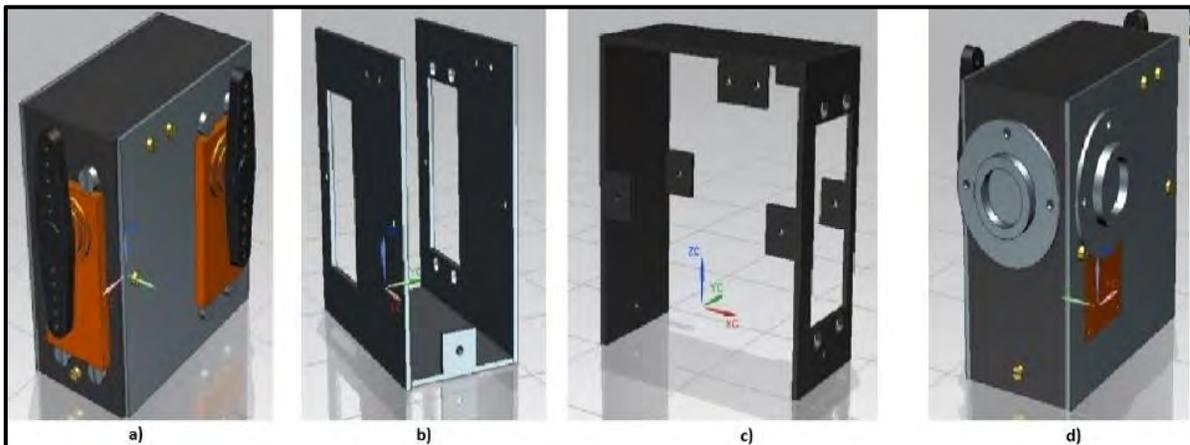


Figura 59. a) vista 3D de la propuesta 1 b) lamina inferior c) lamina superior d) vista posterior 3D con coples colineales.

Observaciones:

1. Contiene roscas con tuercas.
2. Facilidad en maquinado.
3. Utiliza dobleces por lo que aumenta la complejidad del ensamble.

### Propuesta 2 para dos grados de libertad

Utilizando un tocho de aluminio sólido, se deben maquinar las geometrías y cavidades correspondientes para la incrustación de los motores, tomando en cuenta la salida de los cables (figura 60).

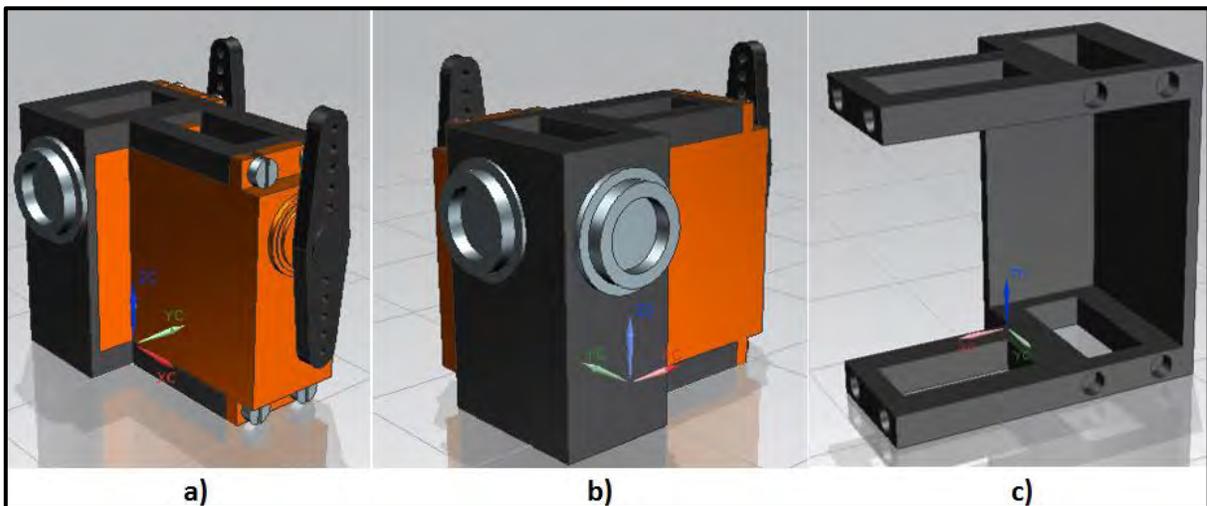


Figura 60. a) vista isométrica de propuesta 2 para 2 GDL b) vista posterior c) vista sin servomotores.

Observaciones:

1. No contiene roscas ni dobleces.
2. Máxima rigidez.
3. Dificultad de maquinado, rango de trabajo de CNC sobrepasado.

### Propuesta 3 para dos grados de libertad

Utiliza dos tipos de láminas con diferente espesor que unen a ambos servomotores, además de permitir colocar accesorios colineales como coples. Todos los elementos son sujetos por tornillos (figura 61).

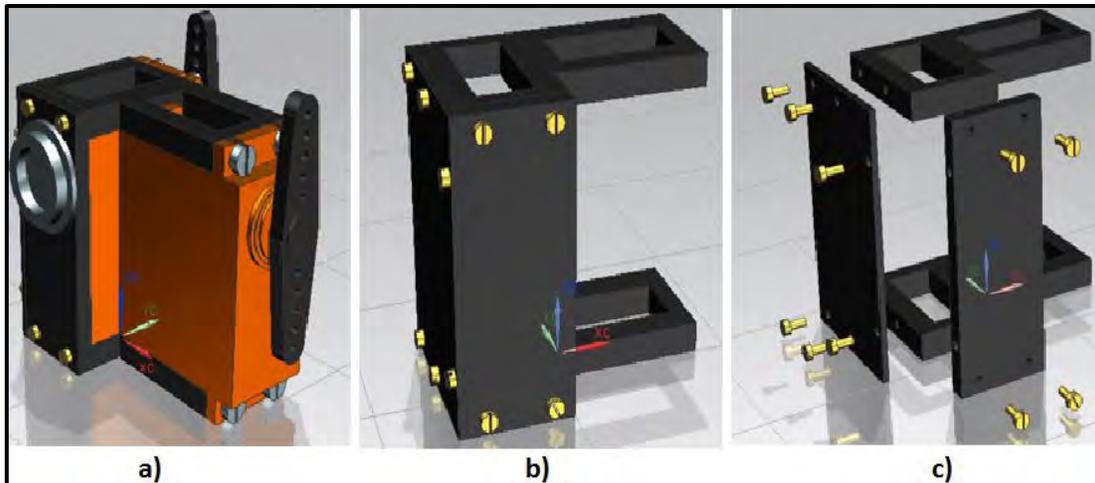


Figura 61. a) vista isométrica de propuesta 3 para 2 GDL b) vista sin servomotores c) vista de explosión del ensamble sin servomotores

Observaciones:

1. Utiliza tornillos como método de unión.
2. No utiliza dobleces en su estructura.
3. Solucionada la Dificultad de maquinado, rango de trabajo de CNC adecuado.

Para el robot humanoide se utilizarán la propuesta 3 para un grado de libertad y la propuesta 3 para dos grados de libertad siendo las más óptimas que cumplen con los requerimientos especificados.

### 3.5 Generación del concepto: articulación de la cadera

De acuerdo a la literatura existen dos variantes en la configuración de la articulación en la cadera para robots humanoides, la configuración en voladizo representada en la figura 62, que entre algunas de sus ventajas es su morfología, pues permite cruzar las piernas y disminuir las colisiones de estas con los brazos, además permite una distancia menor entre los centros de las articulaciones de la cadera, intentando disminuir el desplazamiento del centro de gravedad durante la marcha (Kenji KANEKO S. K., 2002). Es decir, durante el ciclo de la marcha existe un desplazamiento del centro de gravedad necesario para distribuir la carga en uno de los pies y así poder levantar el otro (figura 17), entre mayor sea la distancia del centro de gravedad a la articulación mayor debe ser el desplazamiento de este

para la basculación, ya que la proyección del centro de gravedad del robot sobre el suelo debe estar dentro del polígono de soporte. En el cuerpo humano pese a que las articulaciones coxofemorales están a una distancia determinada el fémur no es paralelo a el eje vertical pero posteriormente esta inclinación respecto a la vertical es mitigada por el valgo fisiológico de la rodilla, el resultado son pies muy próximos y un desplazamiento del centro de gravedad optimizado. Nótese que la forma del cuerpo humano es inestable mecánicamente con una forma de triángulo invertido siendo de menor tamaño la base de apoyo y haciéndolo susceptible a perturbaciones, pero este es el costo de gozar de una marcha optimizada.

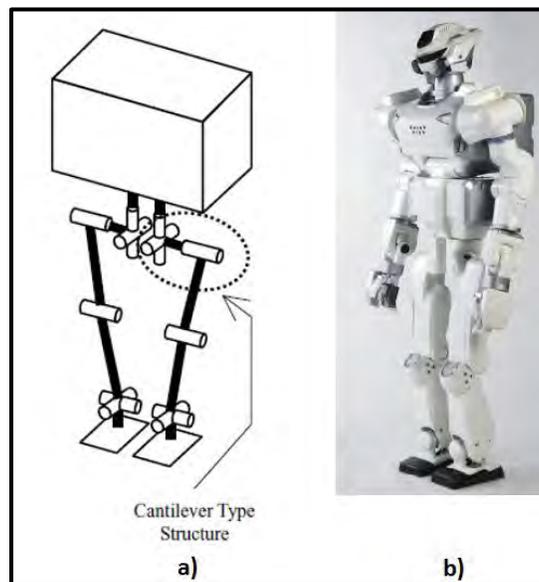


Figura 62. Configuración de la articulación de la cadera en voladizo a) módulo de piernas configuradas en voladizo para el robot HRP-2 tomado de: (Kenji KANEKO F. K., 2011) b) robot HRP-3 con articulaciones de la cadera en voladizo tomado de (Shuuji Kajita, 2014).

La otra configuración comúnmente utilizada en los robots humanoides, es cuando el servomotor que permite la rotación de toda la pierna sobre el eje vertical del fémur es empotrado en el torso (figura 63). Esta configuración permite que el eje del servomotor soporte la mayor parte del tiempo cargas en compresión lo cual resulta muy conveniente.

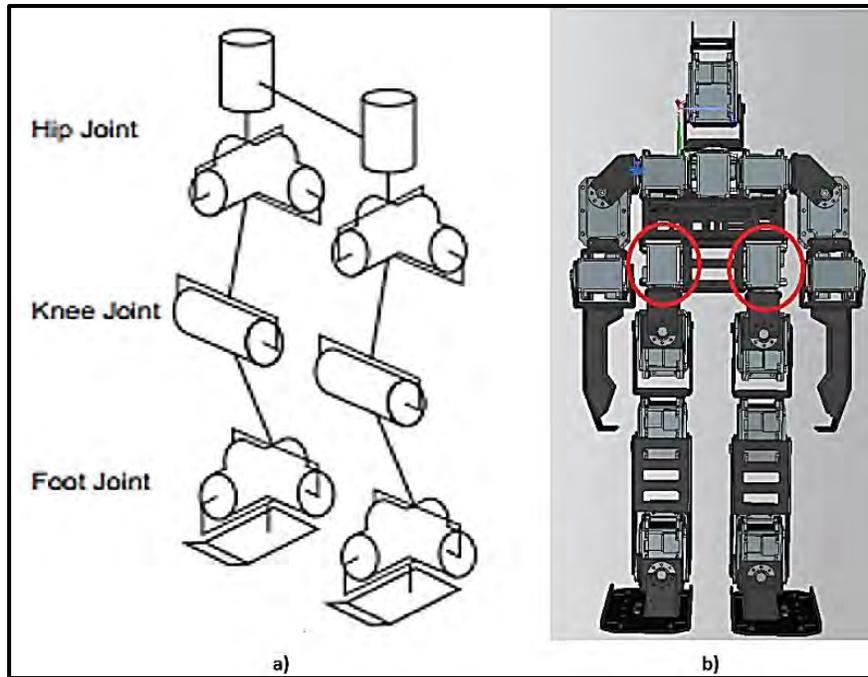


Figura 63. a) Configuración de las juntas para el robot humanoide ASIMO (Honda Motor Co., Ltd., 2007) b) vista sin carcasa del humanoide Darwin-OP en círculos rojos se destaca en servomotor que proporciona el giro de la pierna.

Para el diseño del humanoide propuesto en este trabajo se busca robustez, pero con el menor peso posible, por lo que se utilizará la configuración anterior basándose en el diseño del robot Darwin-OP.

### 3.6 Ensamble

Utilizando la propuesta 3 para dos grados de libertad y la propuesta 3 para un grado de libertad se dibujaron los aditamentos necesarios para conectar los componentes y formar la pierna tomando en cuenta las proporciones especificadas por la RobCup (figura 64).

El servomotor que proporciona la rotación de toda la pierna sobre el eje vertical fue empotrado en el torso (figura 67 a)).

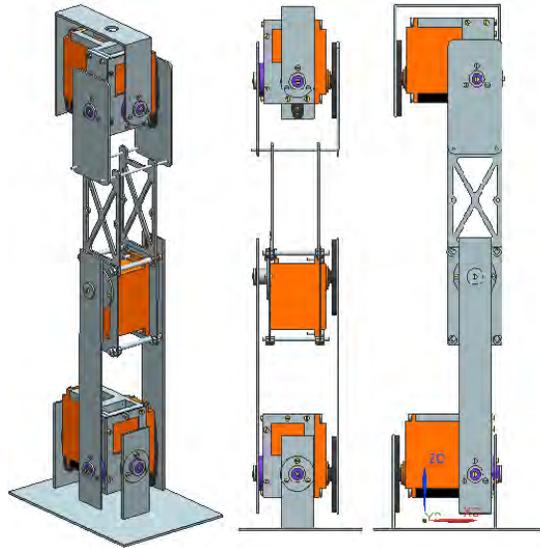


Figura 64. Diseño preliminar de pierna con 6 grados de libertad, el servomotor se resalta con color anaranjado.

De la misma forma y basándose en el diseño de Darwin-OP se diseñó el brazo, donde los servomotores se colocaron de acuerdo a las proporciones especificadas y sobre estos se dibujaron las conexiones necesarias, se consideró la manufactura por lo que su diseño incluye el uso de láminas de aluminio, materiales torneados como es el caso de los coples, para mantener la distancia entre las placas y dar rigidez se agregaron varillas roscadas (figura 65).

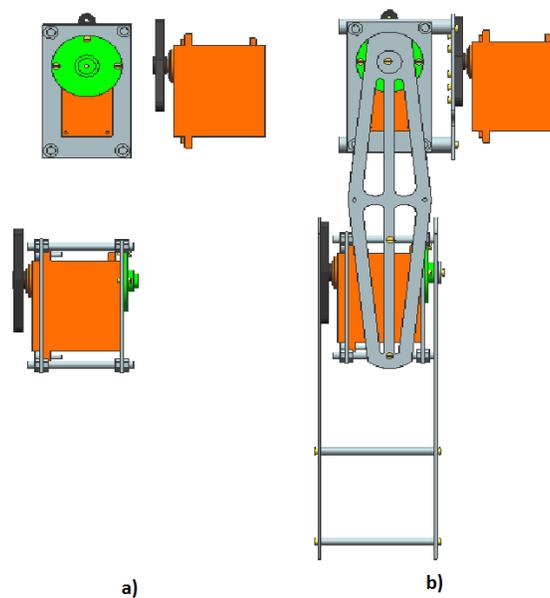


Figura 65. a) Posición de los servomotores b) Conexiones a los servomotores.

En la parte posterior del servomotor se colocó un cople colineal al eje de éste, tendrá la función de desempeñarse como eje, aunque no transmitirá potencia si soportara parte de la carga y evitará momentos de flexión sobre el eje del servomotor. Se propone el componente bosquejado en la figura 67, con la finalidad de disminuir la fricción de contacto entre el aluminio y éste material se usará teflón (politetrafluoroetileno) para su manufactura.

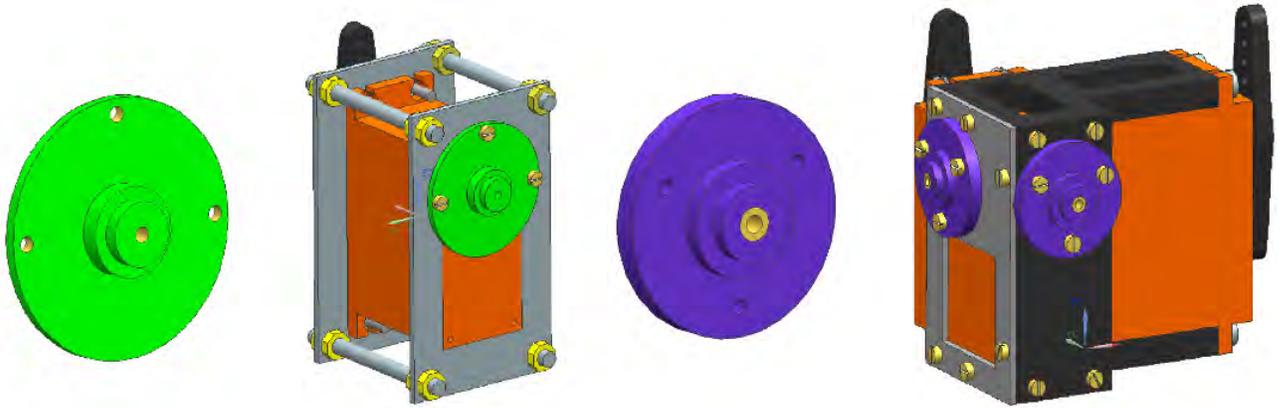


Figura 66. Color verde cople: para un grado de libertad, color morado cople: para dos grados de libertad.

Todas las extremidades se unieron a un conjunto de láminas de aluminio que forman el torso del humanoide. Dentro de éste se empotraron las tarjetas controladoras y las baterías como se muestra en la figura 68. Cada tarjeta es montada sobre una base impresa en 3D y cuya finalidad es protegerlas.

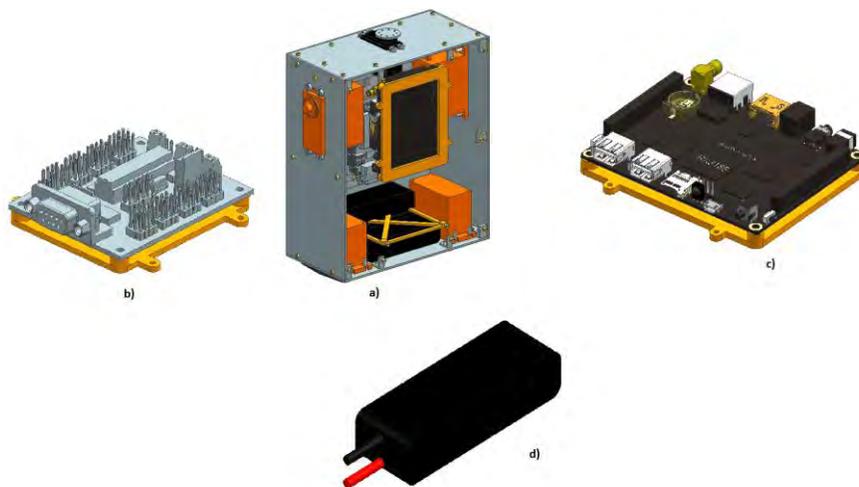


Figura 67. a) torso del robot humanoide hecho con láminas de aluminio con vista hacia el interior del pecho b) tarjeta controladora lynxmotion-ssc-32 c) tarjeta Radxa d) baterías.

Para obtener los dos grados de libertad en el cuello se empotró un servomotor HSR-5990 a el torso con PLA y se generó la estructura que une dicho servomotor con el de la cabeza el cual se encargara de rotar la cámara (figura 68).

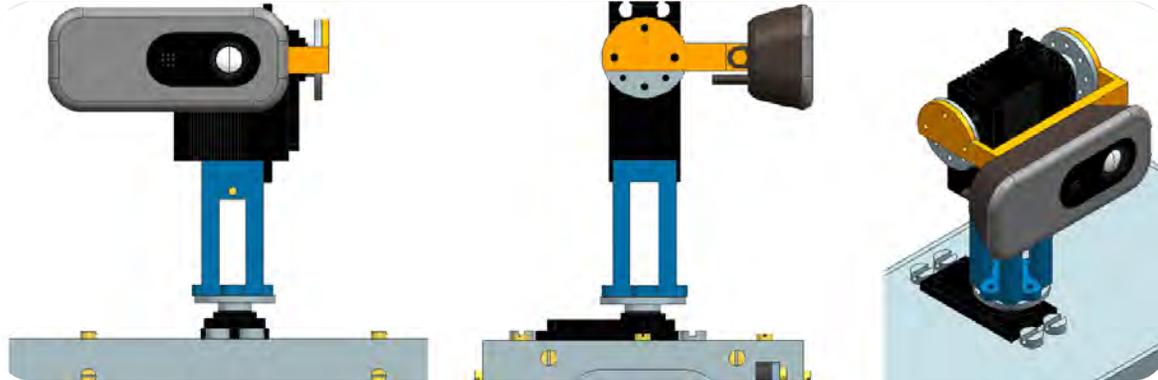


Figura 68. Cuello del robot con 2 GDL.

El diseño del robot incorporando las extremidades al torso y la cabeza se expone en la figura 69. Cabe resaltar que debido al tamaño de los servomotores se tuvo que modificar las longitudes iniciales propuestas en la tabla 8 en especial en el tamaño del torso y la distancia entre los ejes de la cadera, todo dentro del rango especificado por las reglas de la RoboCup. La estructura del robot preliminar es un conjunto de láminas de aluminio sin ningún doblez, tornillos con tuercas, varillas roscadas y PLA. Tiene una masa aproximada de 6.8 kg

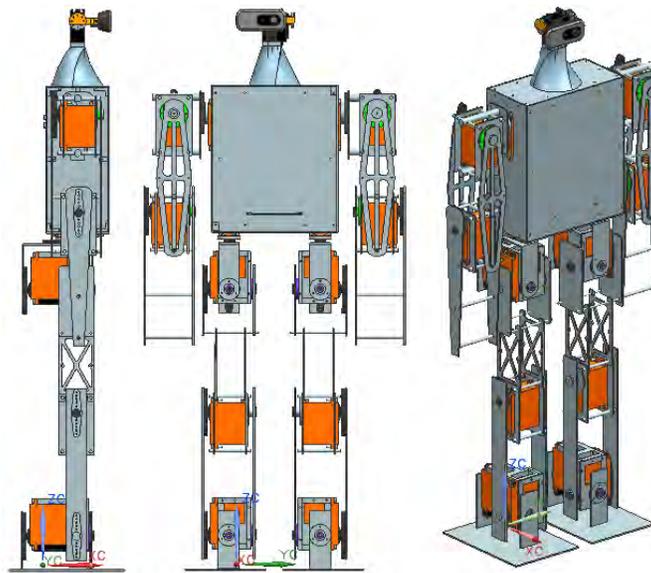


Figura 69. Robot humanoide completo.

La proyección de centro de masas del robot sobre el polígono trazado por sus pies se representa en la figura 70, en donde para poder visualizar su posición se obtuvieron las coordenadas del CG y de los vértices de los pies que se graficaron con ayuda del software libre GRAPES. El centro de gravedad del humanoide entre más cerca este del centro del polígono se considera más estable para la marcha estática. La razón es que cuando el robot está a punto de caer su centro de gravedad se desplaza al vértice del polígono en dirección a la caída, por lo tanto, estando en el centro tiene más distancia que recorrer antes de llegar a algún vértice.

Debido a la simetría del robot sobre el plano sagital el CG se ubica en la mitad del polígono de sustentación, pero solo en la dirección Y (figura 70), para la dirección X la proyección del CG se encuentra ligeramente desplazado. Para poder corregir esto basta con desplazar en el CAD del ensamble las suelas en esa dirección. Estos ajustes se consideran para el diseño final del robot.

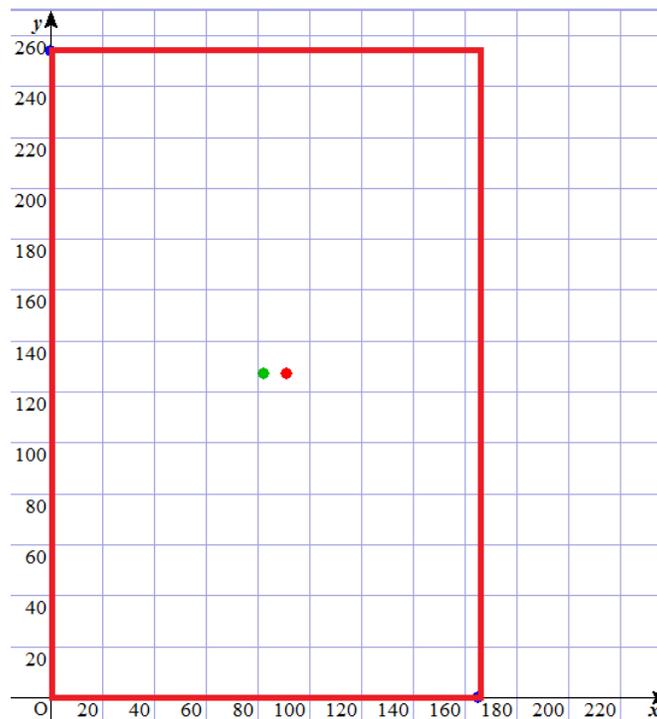


Figura 70. Polígono de sustentación de los dos pies del robot ten posición bípeda. El punto verde marca el centro del polígono y el rojo la proyección del CG.

## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS

En este capítulo se analizarán diversas posturas del robot consideradas como críticas, con la finalidad de obtener un rango de cargas y momentos en componentes donde se consideran susceptibles a falla. Posteriormente se analizará su comportamiento mecánico bajo dichas cargas utilizando la herramienta de elemento finito proporcionada por el software.

### 4.1 Análisis dinámico

Una vez obtenida la configuración preliminar del robot y sus masas aproximadas, es posible calcular los momentos y las fuerzas en su centro de gravedad o en las juntas de cada pieza. De forma analítica, por ejemplo, se utilizan las ecuaciones de Newton-Euler para cuerpos rígidos; en donde las cargas, momentos, reacciones, masas e inercias con valores conocidos se relacionan a través de las leyes de Newton, permitiendo encontrar los valores desconocidos. Con este método de análisis se requiere la resolución simultánea de diversas ecuaciones que aumentan en número conforme aumentan los cuerpos a analizar. Es por esta razón que se hacen simplificaciones, por ejemplo, si el movimiento de los cuerpos es en un solo plano el análisis se puede reducir de un análisis en 3D a uno de 2D, también dependiendo si los cuerpos están en reposo o bajo aceleraciones muy bajas el análisis se puede considerar estático donde estas aceleraciones se consideran igual a cero. Por otra parte, existe software de diseño asistido por computadora que permiten simular estas situaciones, así como colisiones, gradientes térmicos, vibraciones, condiciones dinámicas y estáticas en cuerpos. Algunos de los más conocidos son: NX, SolidWorks, SolidEdge, Autodesk, COMSOL Multiphysics, CATIA y Pro/ENGINEER.

Para el análisis dinámico del robot se utilizó NX en el módulo “motion”, donde una vez dibujados los sólidos permite asignar propiedades del material a cada componente, así como definir el tipo de unión con otros cuerpos, velocidades, pares, cargas y condiciones iniciales del análisis.

Para poder analizar el comportamiento mecánico de los componentes del robot es necesario obtener las fuerzas y momentos que se generan en estos, no obstante, estas fuerzas varían en función de la posición y velocidad que a su vez dependen de la acción que realice el robot. Por lo que se simularon condiciones en las que se esperan grandes cargas y momentos en determinadas articulaciones, en búsqueda de las situaciones críticas a las que se expondrá el robot, también se obtuvo el valor máximo de estas para posteriormente analizar su comportamiento mecánico en elemento finito y finalmente estimar si el componente debe modificarse para cubrir dichos requerimientos.

### 4.1.1 Análisis de la incorporación después de una caída

El primer análisis es la incorporación del robot después de una caída, normalmente los brazos no ejercen mayor carga que la de su propio peso, sin embargo, durante la incorporación es necesario que emplee los brazos para elevar su CG y así regresar a la posición de bipedestación, durante esta situación parte del peso total del robot es soportado por los brazos.

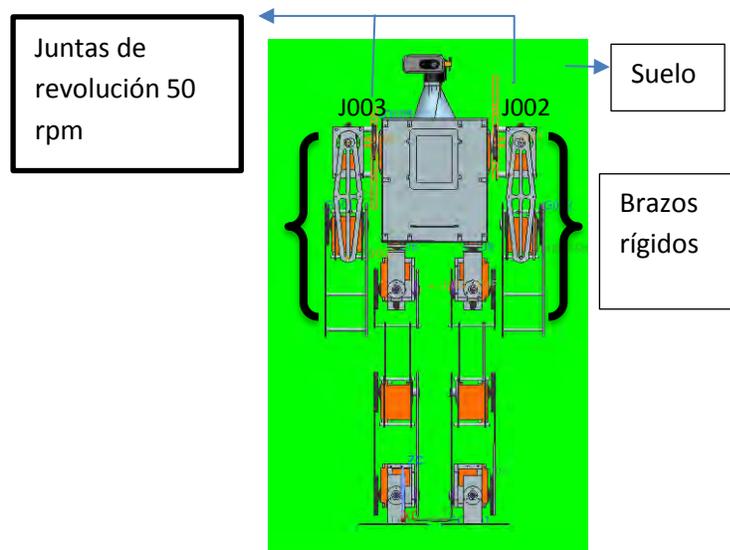
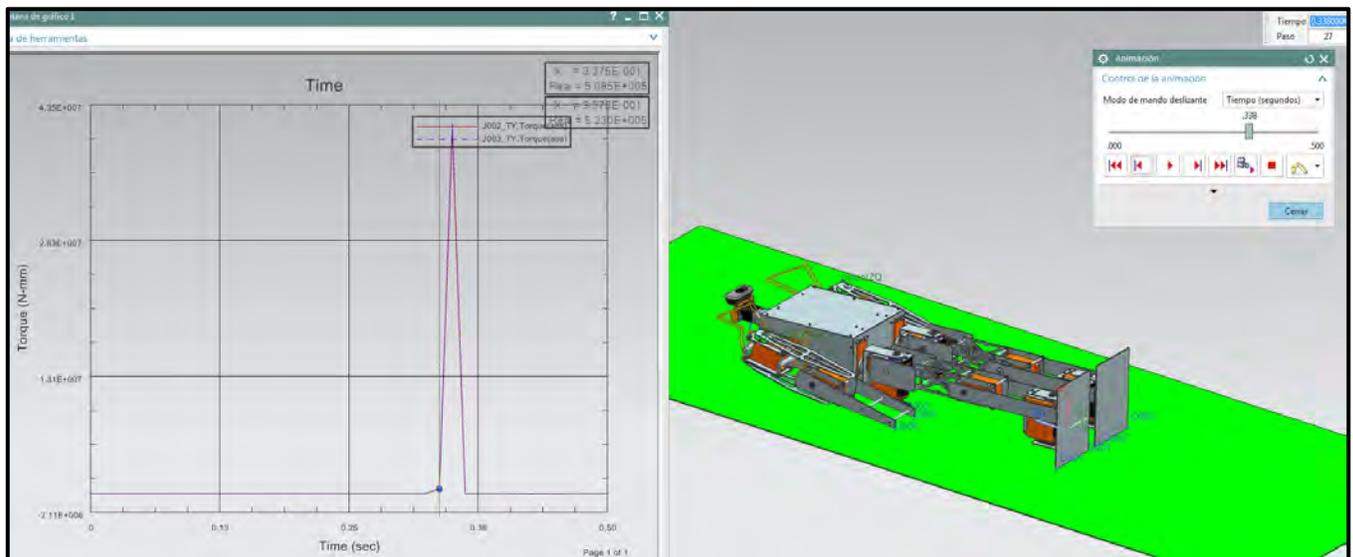


Figura 71. Juntas del robot para el análisis de incorporación utilizando los brazos, de color verde se ilustra el suelo.

Como condición inicial de la simulación, el robot parte de estar acostado sobre el suelo (figura 71) y utilizando juntas de revolución en los hombros, se genera un desplazamiento angular de los brazos quienes al contacto con el suelo tienden a mover el robot. Debido a que el punto de apoyo es el final de la extremidad, se

genera un elevado brazo de palanca sobre el eje en el servomotor del hombro. Se diseñó un suelo con la finalidad de generar contactos 3D con la estructura y se generó una condición de contacto de un punto en los pies con el suelo, además se asignaron juntas de revolución al hombro con la velocidad máxima ideal del servomotor de 50 revoluciones por minuto o rpm, esta velocidad la entrega el eje del servomotor sin carga y puesto que el servomotor soporta el peso del brazo su velocidad será menor a 50 rpm.

El resultado de la simulación fue un impacto, después de que el brazo entra en contacto con el suelo las fuerzas de reacción impulsan toda la estructura haciendo que se levante del piso, este efecto se muestra en la gráfica de la figura 72 en donde se observa un pico que representa el par generado en el instante en que los brazos del robot interactúan con el suelo, posteriormente este pico desciende abruptamente debido a la pérdida de contacto con el suelo regresando al par generado por la masa del brazo. El par máximo del servomotor es de  $3700 \text{ N}\cdot\text{mm}$  y el generado por la interacción del brazo con el suelo es de  $40663294.255 \text{ N}\cdot\text{mm}$  por lo que esta simulación no se considerará para la obtención de las cargas (tabla 23 del apéndice).



**Figura 72.** Contacto de los brazos, la gráfica muestra el valor del par en las articulaciones del servomotor. El valor máximo del par representa los picos de la gráfica generados en el instante en que interactúan los brazos con el piso.

Se hicieron varias iteraciones en la velocidad de las juntas de revolución en el hombro hasta llegar al comportamiento esperado, es decir, en donde el robot no se impulse debido al impacto. Con la velocidad de 20 rpm en las juntas de los hombros se describe la secuencia mostrada en la figura 73, las condiciones de la simulación fueron: aceleración gravitatoria  $9806.65 \frac{mm}{s^2}$ , tiempo 1 segundo y número de pasos 30.

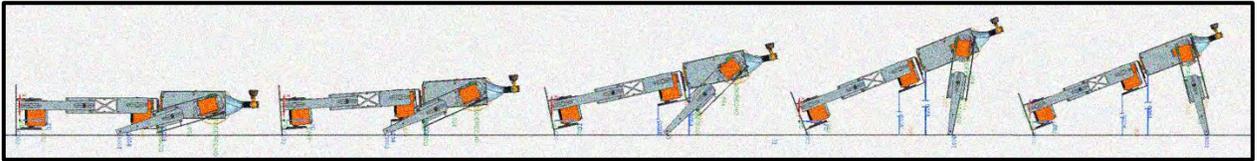


Figura 73. Secuencia de incorporación del robot humanoide con velocidad en las juntas del hombro de 20 rpm.

La gráfica en la figura 74, muestra el valor del par generado en las juntas del hombro, el valor máximo del momento con magnitud de 6038.77 N\*mm ocurre cuando el brazo inicia el contacto con el suelo en el tiempo 0.4 s posteriormente disminuye debido a la disminución del brazo de palanca, el signo del momento es causado por la referencia de la junta.

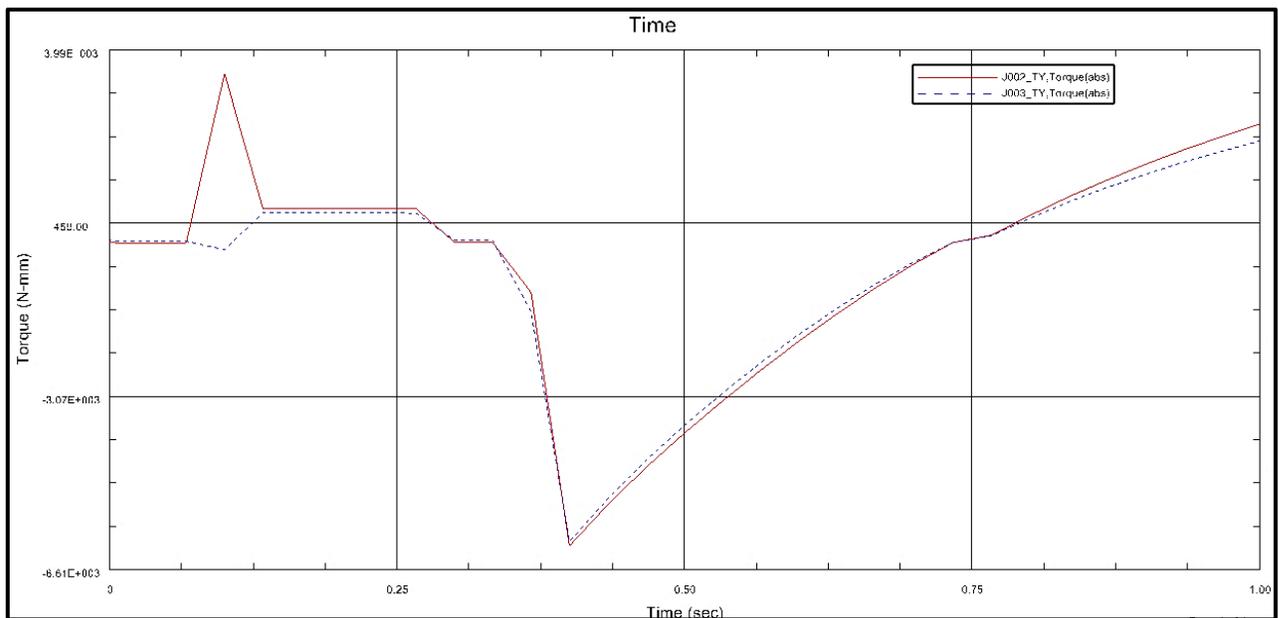


Figura 74. Par generado en las juntas del hombro el valor máximo correspondiente al tiempo de 0.4 segundos se genera cuando los brazos tocan el suelo.

La condición simulada sobrepasa el par del motor, pero muestra un comportamiento esperado, por lo que se utilizó como condición crítica para transferir cargas hacia el módulo de simulación avanzada.

Es posible sensor las fuerzas generadas en las juntas de la estructura o en el CG de cada componente durante la simulación, una simplificación fue disminuir el número de juntas, así donde existían diversas juntas de tornillo como en la figura 75, se generó solo una en el centro del eje del servomotor (juntas j006). Para la pieza a analizar correspondiente al antebrazo se obtuvieron las fuerzas de reacción en la superficie debido al contacto 3D. En la pieza del brazo análoga al humero, se generó la transferencia de cargas cuyo valor de reacciones y momentos en las juntas j006 y j007 se especifican en el apéndice tabla 21, se tomó el paso 12 correspondiente al tiempo de 0.4 segundos.

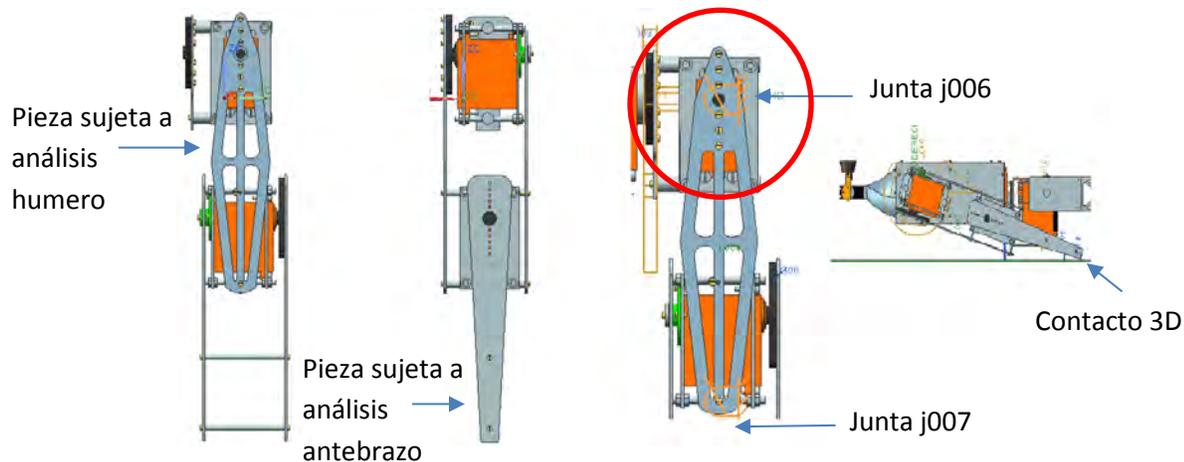


Figura 75. Brazo izquierdo, se muestran las piezas a analizar de las cuales se obtendrán sus reacciones y momentos durante la simulación. Con un círculo rojo se encierran los tornillos que fijan la pieza a la estructura y se resalta su equivalente con una junta fija (j006). Por último, se muestra la posición del brazo en el instante del contacto del antebrazo con el suelo.

#### 4.1.2 Análisis de un paso

La segunda simulación dinámica busca analizar las piezas de aluminio que unen el tobillo con la rodilla análogos a los huesos tibia y peroné, por lo que esta simulación consiste en que el robot de un paso (figura 77), para estas condiciones se anclo el pie derecho y se generó un contacto 3D del pie izquierdo al suelo, la junta j002 es el resultado de la interacción entre el eje del servomotor del tobillo y el eje de la pieza de aluminio (tibia-peroné) que conecta al eje en el servomotor

de la rodilla a través de la junta j015 como se muestra en la figura 76. Se le asignó una velocidad constante de 50 rpm, sin embargo, los momentos generados fueron muy elevados, por lo que después de varias iteraciones se encontró la velocidad máxima correspondiente a 10 rpm. Se generó una junta en la articulación de la cadera con la finalidad de levantar la pierna izquierda. Además, como situación crítica se consideró que una de las dos piezas en la región tibia-peroné no estuviera bien conectada, entonces solo la pieza con la junta j002 soportaría el momento generado en dirección Y.

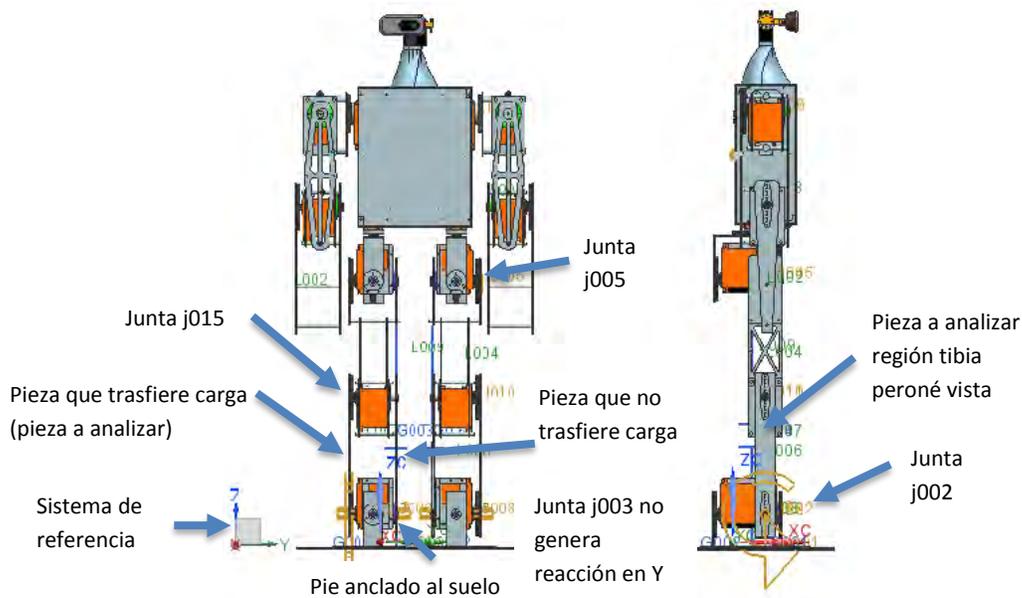


Figura 76. Condiciones de la simulación del paso, se muestran las juntas y piezas que se analizan, así como el sistema de referencia.

Las condiciones de la simulación del paso fueron: aceleración gravitatoria  $9806.65 \frac{mm}{s^2}$ , un intervalo de tiempo igual a 0.48 segundos y número de pasos 30. La dirección del eje X es paralela al eje sagital, Y es paralelo al eje frontal y Z al eje vertical como se muestra en el sistema de referencia de la figura 76.

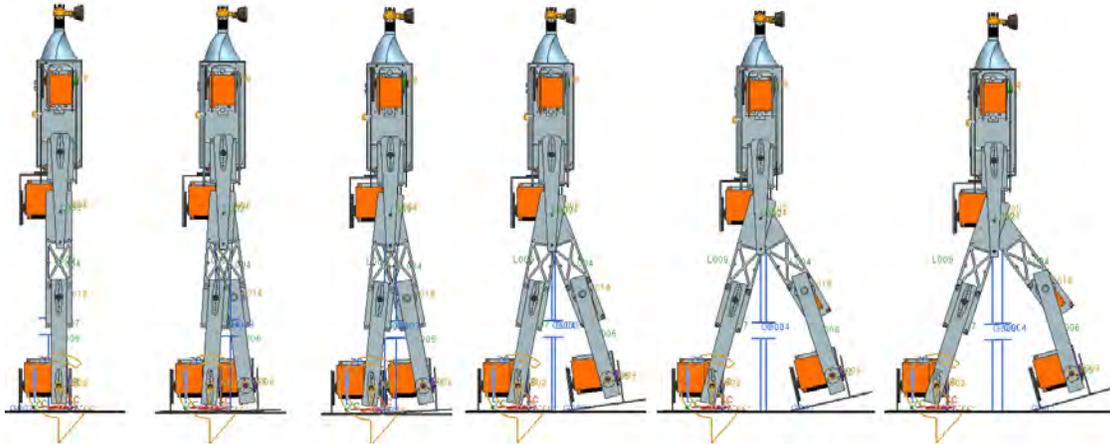


Figura 77. Secuencia de un paso para el robot.

La siguiente gráfica muestra el valor del par generado en el tobillo para la junta j002 durante la simulación, se observa que con el transcurso del tiempo el par aumenta debido al aumento del brazo de palanca. Para la obtención de las cargas se utilizó el intervalo de tiempo 0.144 segundos correspondiente al paso 9 de la simulación, en donde se genera un par cercano al máximo soportado por el servomotor 3466.785 N\*mm. Finalmente se realizó la transferencia de cargas de la pieza de aluminio (tibia-peroné), sus valores se especifican en la tabla 24 del apéndice.

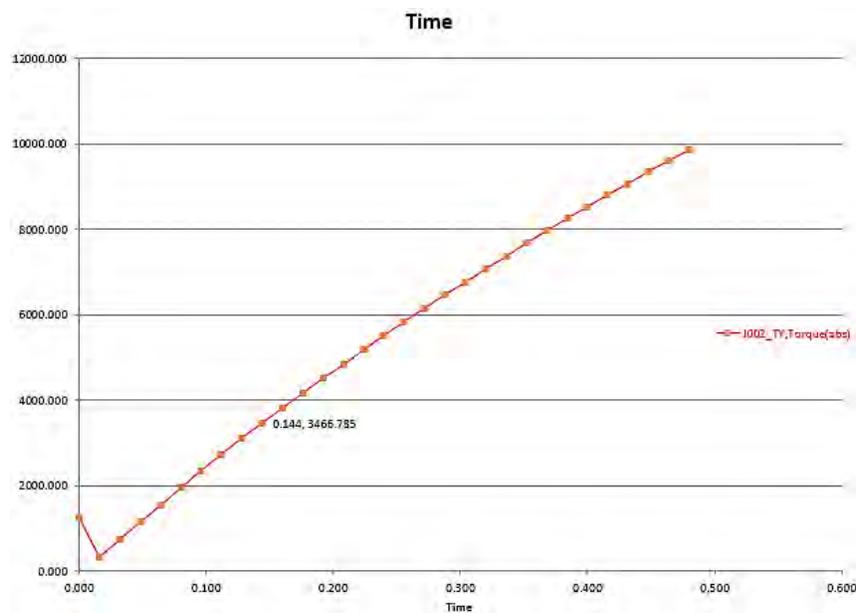


Figura 78. Gráfica del par generado durante la simulación del paso para la junta j002 el par máximo del servomotor se genera el tiempo igual a 0.144 segundos.

### **4.2 Análisis por elemento finito**

En este apartado se utilizará la herramienta de análisis por elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) que proporciona el software NX, el objetivo es estudiar el comportamiento mecánico básico de diversas piezas sometidas a cargas, las cuales fueron generadas en la simulación dinámica. Durante el FEA la pieza considerada como un sólido continuo y elástico se discretiza en un número finito de pequeñas estructuras denominados elementos que se conectan entre sí a través de nodos, a la red de elementos y nodos se le conoce como malla. La densidad de mallado está en función del número de elementos en el sólido, generalmente para un análisis más preciso es necesario refinar la malla especialmente donde existen concentraciones de esfuerzo. Cada nodo posee 6 grados de libertad, 3 rotacionales y 3 traslacionales, además en estos se definen las condiciones de frontera, propiedades elásticas y cargas. Para determinar el comportamiento de cada elemento se emplean funciones polinomiales en términos de las propiedades geométricas y del material (Budynas & Nisbett, 2008).

Existen diversos tipos de FEA en NX como: lineal estático, no lineal estático y dinámico, modal, de transferencia de calor etc. Nuestro enfoque será en análisis lineal estático, en donde se consideran las cargas y restricciones como invariables en el tiempo.

#### **4.2.1 Piezas radio-cubito**

Las primeras piezas a analizar son las que constituyen el antebrazo, que consta de dos láminas paralelas conectadas al eje del codo y separadas a través de varillas roscadas. Se analizó individualmente las dos piezas mostradas en la figura 79, en el análisis FEA de la estructura son necesarias las cargas en el instante de tiempo supuesto en la simulación dinámica (tabla 22 del apéndice), para la aplicación de las cargas es necesario suponer la dirección y la zona en que se aplican.

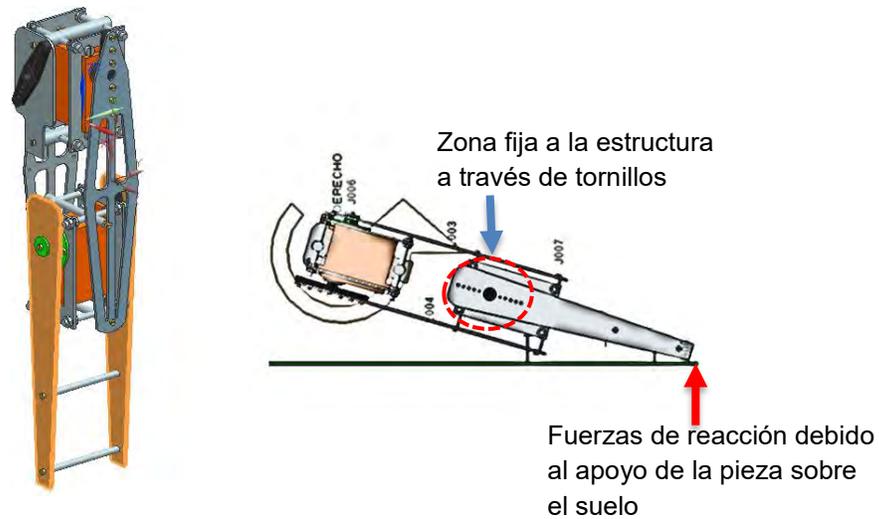


Figura 79. Izquierda: resaltado con anaranjado las piezas a optimizar, derecha acción de las fuerzas en el brazo.

En la figura 79 se aprecia una captura del brazo en el instante de tiempo en que el antebrazo hace contacto con el suelo, por el tipo de apoyo se generan fuerzas de reacción sobre la superficie de contacto del antebrazo y el suelo; en la región del codo las fuerzas generadas se distribuyen sobre los tornillos fijos al eje del servomotor. Se puede suponer el análisis de la pieza como el de una viga en voladizo, en donde la zona empotrada corresponde a la unión entre tornillos y aluminio. Para poder asignar cargas a la superficie es necesario suponer donde se aplican, para el caso de la pieza a analizar se supondrá que las fuerzas se ejercen sobre la superficie mostrada en la figura 80, además se restringieron los desplazamientos y rotaciones en los 3 gdl en la zona de tornillos para simular el empotramiento de la pieza con la articulación del codo. El tamaño de los elementos de malla fueron predeterminados por el software (figura 80).

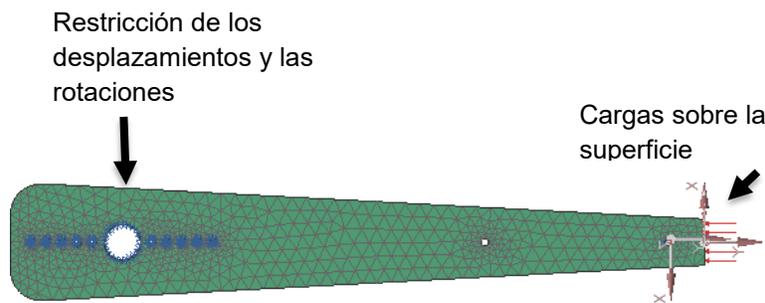


Figura 80. Condiciones del análisis por elemento finito, en color azul se muestra las restricciones de desplazamientos y en color rojo las fuerzas aplicadas sobre la superficie.

La solución al análisis muestra un esfuerzo nodal de von mises de 107.18 Mpa, el cálculo del factor de seguridad se determina con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\text{valor causante de la falla}}{\text{valor permisible}}$$

Considerando que la deformación máxima del material sea del 0.2% el valor causante de la falla corresponde al esfuerzo de fluencia del aluminio cuya magnitud es de 157.1 MPa y el valor permisible corresponde al esfuerzo nodal mostrado en la figura 81.

Así el valor del factor de seguridad es:  $k = \frac{157.1 \text{ Mpa}}{107.18 \text{ Mpa}} = 1.466$  de un rango adecuado, sin embargo, por la necesidad de disminuir el peso se procedió a utilizar la herramienta optimización de topología con la cual generar una nueva geometría.

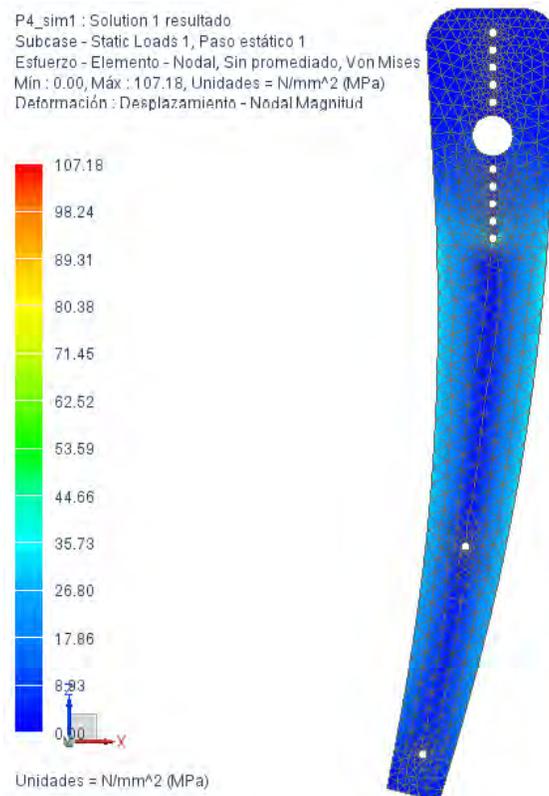


Figura 81. Resultados del análisis FEA.

La optimización de topología se basa en programación lineal, en donde se minimiza o maximiza una función objetivo que en este caso es la energía de deformación de la estructura, como restricciones se utilizó el espesor de la pieza de 2 mm y el volumen menor o igual al 70% del original. De esta manera el software propone una geometría basada en el 70% y buscando que la energía de deformación sea la mínima posible.

La geometría propuesta por el software se muestra en la figura 82 a) la cual se basa en la densidad de la estructura, en la escala el color el rojo representa la densidad máxima y el azul la densidad igual a cero, en la figura 82 b) se muestran los esfuerzos de Von Mises generados en la pieza con la densidad propuesta, cuyo valor máximo es de 116.75 MPa pero con menor masa en la estructura.

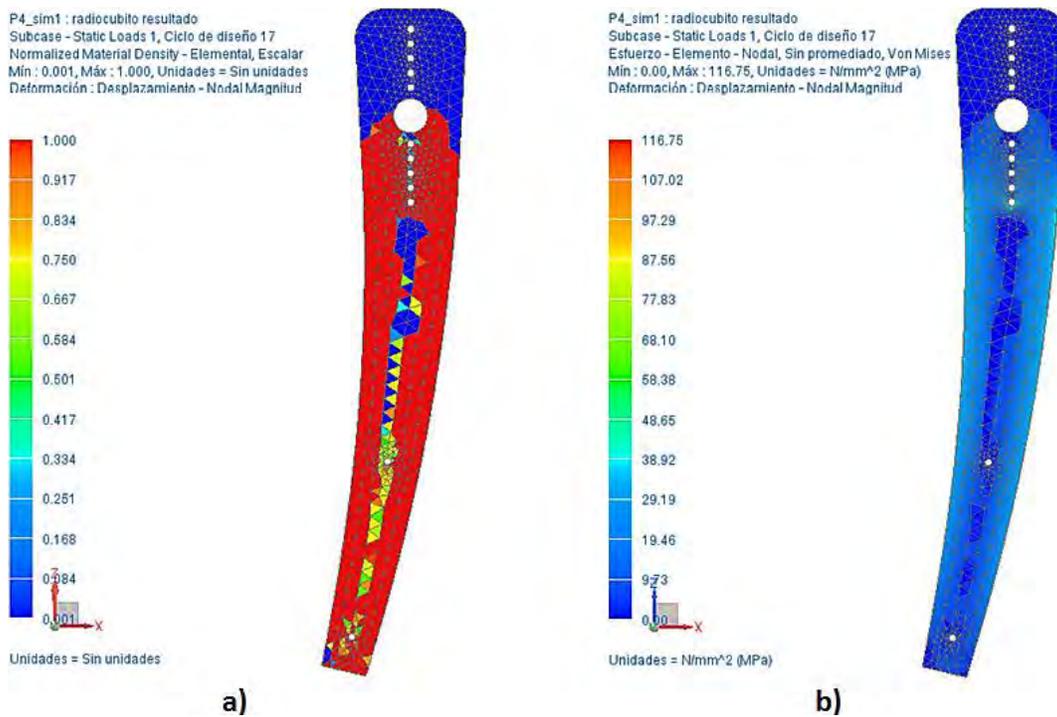


Figura 82. a) Densidad propuesta por la optimización de topología b) Esfuerzos de Von Mises para la densidad de la optimización.

Posteriormente se exporto la geometría optimizada en formato stl para utilizarse como plantilla en el rediseño de la geometría final, como se muestra en la figura 83 a), el contorno anaranjado muestra la geometría inicial y en azul la geometría optimizada propuesta por el software. Para el diseño final se contempla las

condiciones de manufactura como el diámetro del cortador, la generación de chaflanes etc. (figura 83 c)).

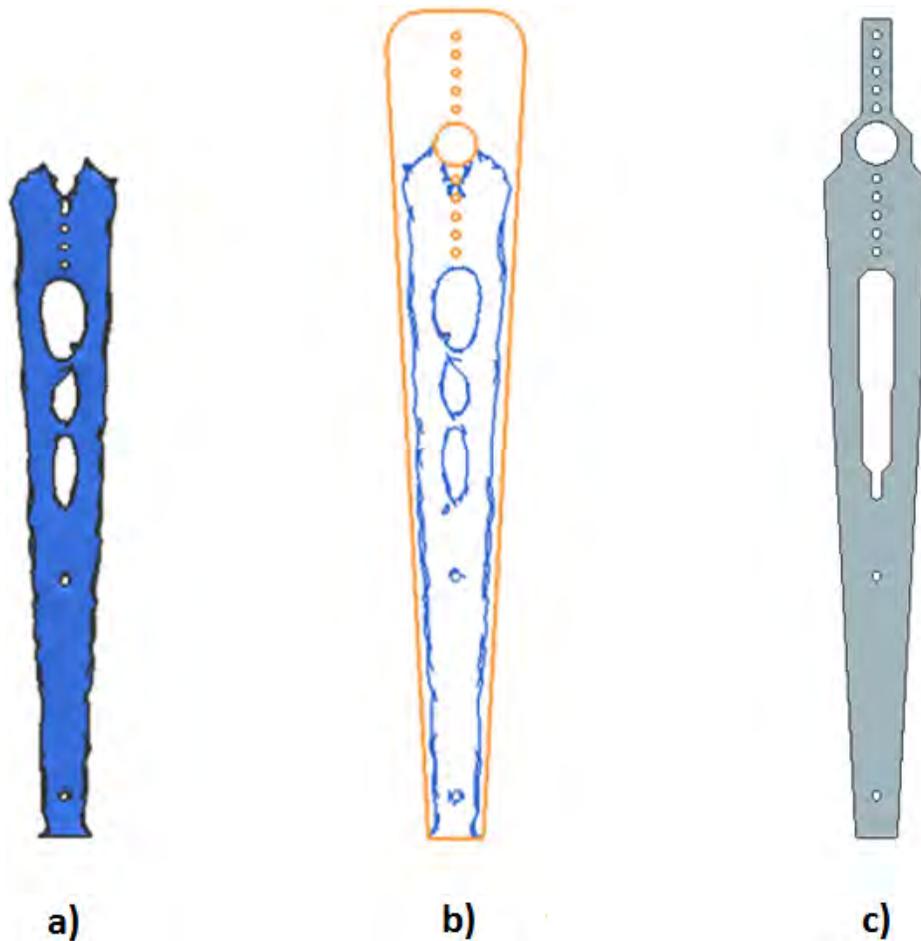


Figura 83 . a) Geometría optimizada propuesta por el software b) Contorno anaranjado muestra la geometría inicial y el azul la geometría propuesta utilizada como plantilla para el rediseño. c) Geometría final.

Finalmente se analizó bajo las mismas condiciones la nueva geometría obteniéndose un esfuerzo de Von Mises máximo de 127.54 MPa y un factor de seguridad de 1.23 (figura 84). La masa de la pieza inicial fue de 31.7 g y la final es de 19.18 g, por lo que se redujo cerca del 40% de la masa.

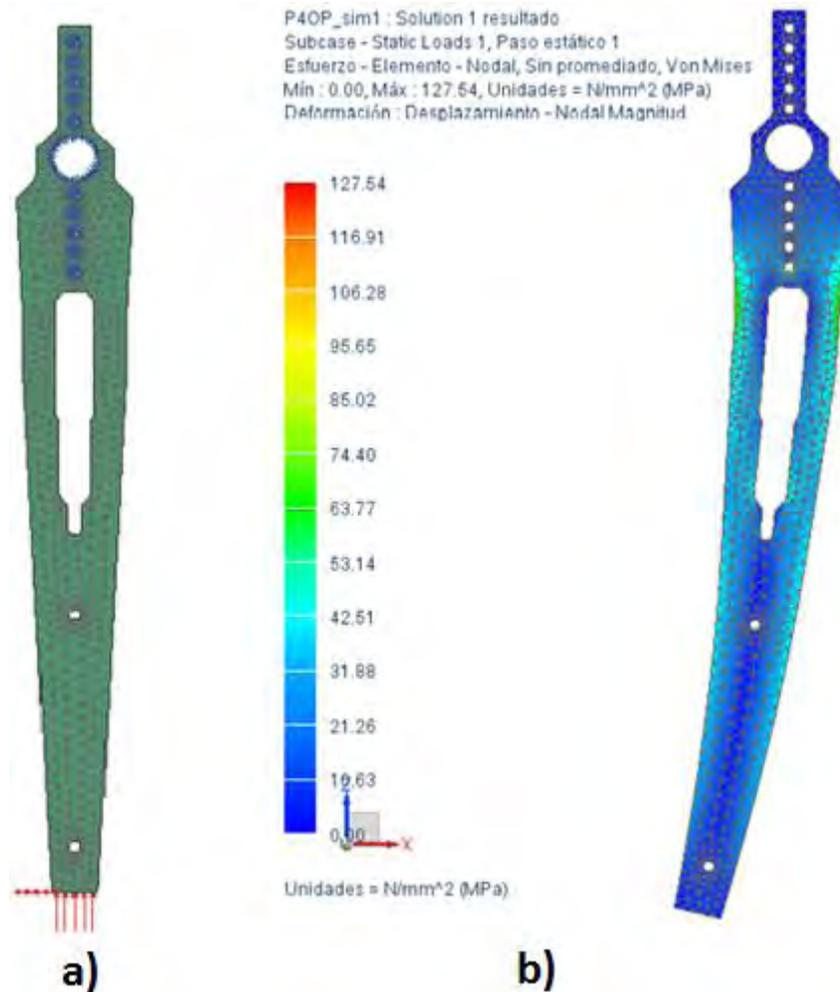


Figura 84. a) condiciones de análisis para pieza optimizada b) resultados de análisis de esfuerzos en la geometría optimizada.

La segunda pieza a optimizar es paralela a la analizada anteriormente, es similar con la única variación de la zona donde se empotra al codo (figura 79), basados en la geometría optimizada de la figura 83 a) se generó la pieza final considerando las restricciones de manufactura. Posteriormente se analizó bajo las mismas condiciones de la simulación FEA anterior. Los resultados del análisis muestran un valor de esfuerzos de Von Mises de 130.84 MPa generando un factor de seguridad de 1.2 (figura 85).

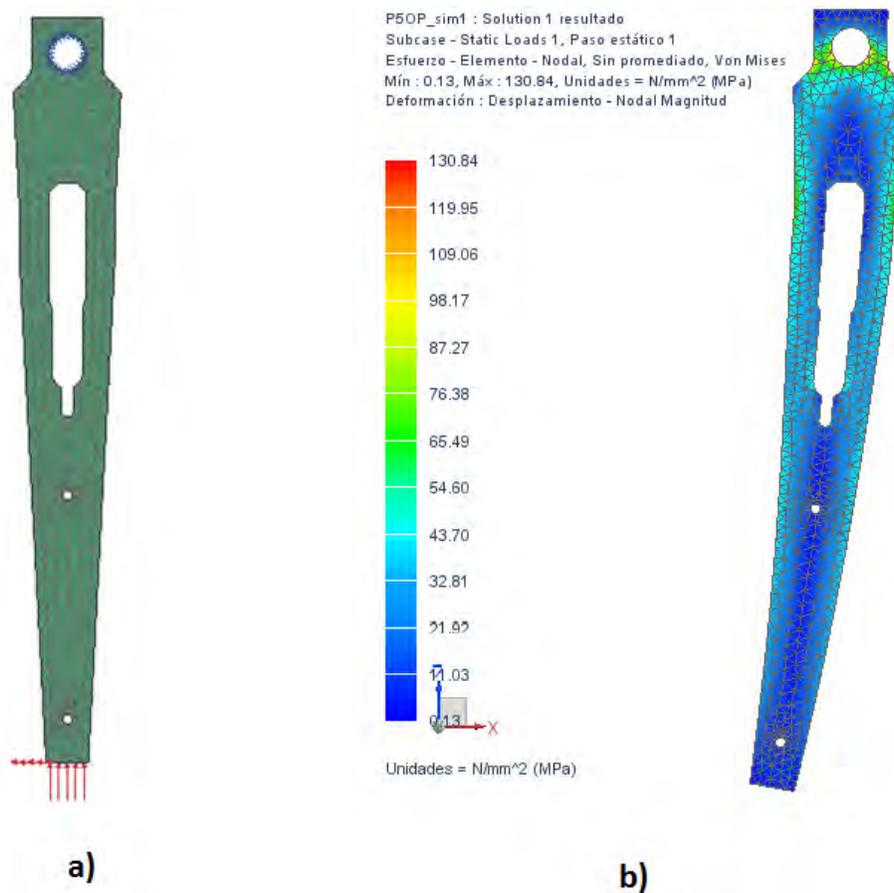


Figura 85. a) Condiciones de análisis para simulación FEA b) Valores de esfuerzos de Von Mises generados en la estructura.

#### 4.2.2 Piezas humero

El siguiente componente a analizar son las piezas de aluminio que conectan el codo con el hombro. En un análisis preliminar se analizaron las láminas individualmente, sin embargo, los esfuerzos generados eran muy elevados debido a que la carga flexionaba la pieza. Por lo que se analizaron las dos láminas junto con las varillas de aluminio que las conectan (figura 86 a)), de esta manera se considera el efecto de las varillas sobre la rigidez de la pieza. Se generó un mallado predeterminado y un acoplamiento entre mallas en las superficies de contacto, los valores de las cargas utilizados corresponden a la junta j007 de tabla 21 del apéndice y se aplicaron sobre la superficie de la cavidad del tornillo de esa junta.

El resultado de análisis muestra esfuerzos de Von Mises de 120.9 MPa (figura 86 c)) por lo que no se utilizó la herramienta de optimización. La propuesta final se detalla en la figura 87 a) donde su rediseño toma en consideración su manufactura final.

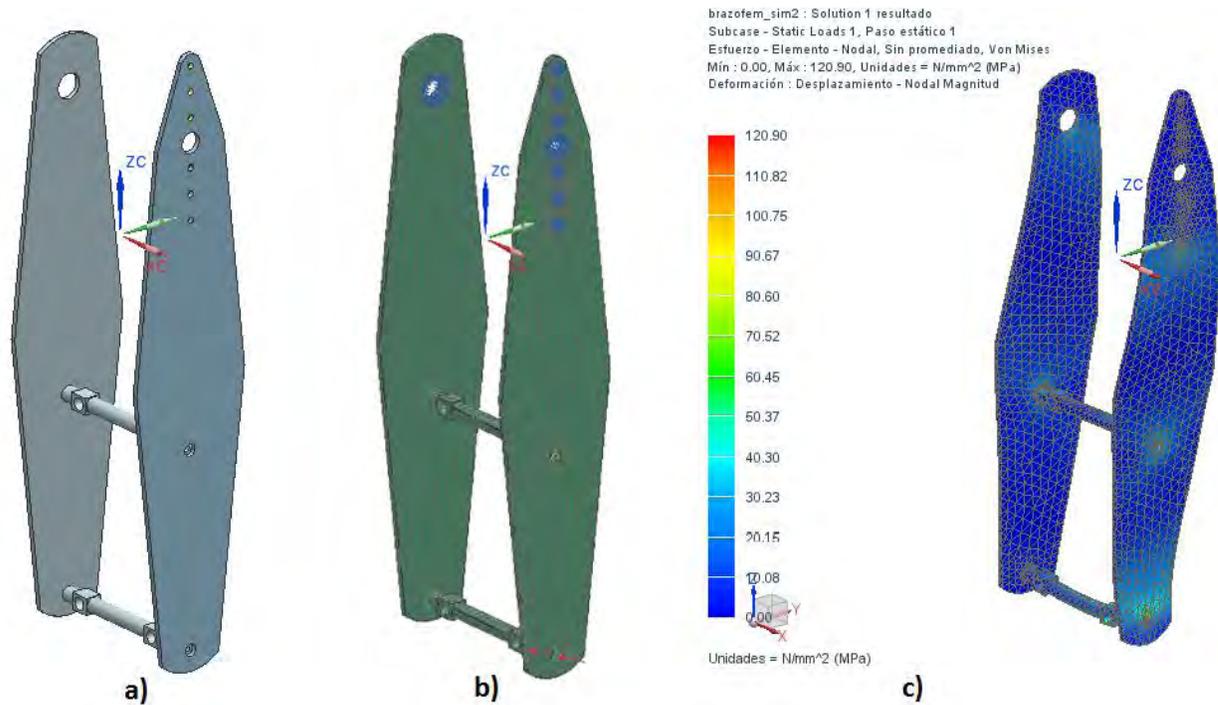


Figura 86. Piezas correspondientes al brazo del robot. a) propuesta inicial de la estructura unida a través de varillas de aluminio. b) mallado, restricciones y cargas sobre la estructura. c) resultado de análisis donde se muestran los esfuerzos nodales de von-mises.

Bajo las mismas condiciones se analizó la pieza final, el resultado de esfuerzos nodales con criterio de Von Mises se muestra en figura 87 b) el valor máximo corresponde a 121.73 MPa y un factor de seguridad es de 1.29.

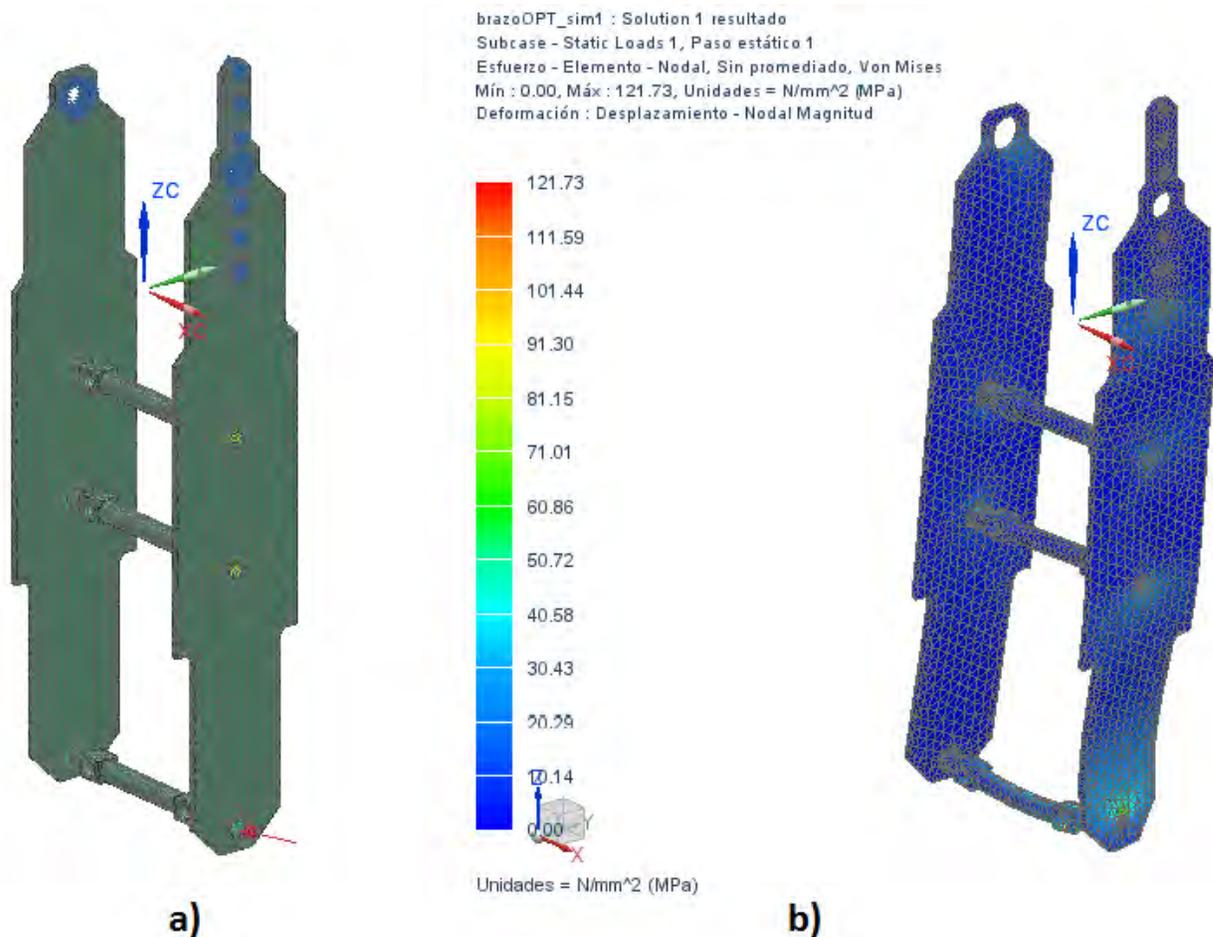


Figura 87. a) Pieza final mallada, la flecha roja indica la zona donde se asignaron las cargas. b) resultados del análisis nodal.

### 4.2.3 Piezas tibia-peroné

La sección tibia peroné se conforma de dos láminas paralelas de aluminio que unen el servomotor del tobillo con el de la rodilla (figura 76). Para el análisis se utilizarán las cargas generadas durante la simulación dinámica del paso, especificadas en tabla 24 del apéndice. Como simplificación solo se consideraron las fuerzas y los momentos que generan flexión de la pieza en dirección X. De esta manera se analizó individualmente la lámina de aluminio y se consideró como viga en voladizo siendo la junta j015 la zona empotrada y la junta j002 la superficie donde se apliquen las cargas (figura 88 a)).

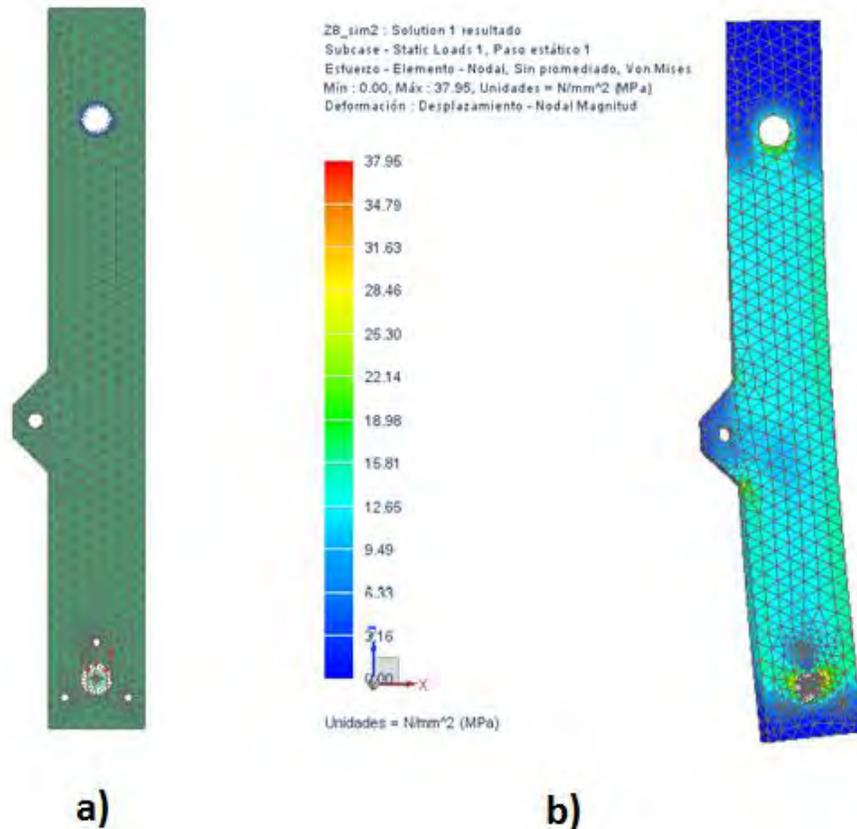


Figura 88. Pieza correspondiente a los huesos de la tibia y el perone. Se observan las condiciones de mallado así como las restricciones y cargas.

Se utilizó un mallado predeterminado por el software, en la figura 88 b) se observa un valor máximo de 37.95 MPa de esfuerzos nodales en la solución de la simulación. En consecuencia, a la magnitud del esfuerzo se optó por generar la optimización de su topología utilizando el espesor de la lámina como restricción y masa menor a 0.3 del original obtenida a partir de diversas iteraciones variando el valor de la masa de 1 a 0 y analizando el resultado en cada iteración es decir se partió de 0.9 y se analizó los esfuerzos generados con esa densidad de masa cuyo rango era muy bajo, de esta manera se fue disminuyendo la masa hasta la especificada. Para un valor menor de masa los esfuerzos son cercanos o sobrepasan el esfuerzo de fluencia, como función objetivo se utilizó la energía de deformación de la pieza durante el análisis.

La propuesta de optimización generada se muestra en la figura 89 a) en donde basados en al análisis de la simulación inicial el software propuso la densidad que

debe tener la geometría que minimiza la energía de deformación con una masa de 0.3 de la original.

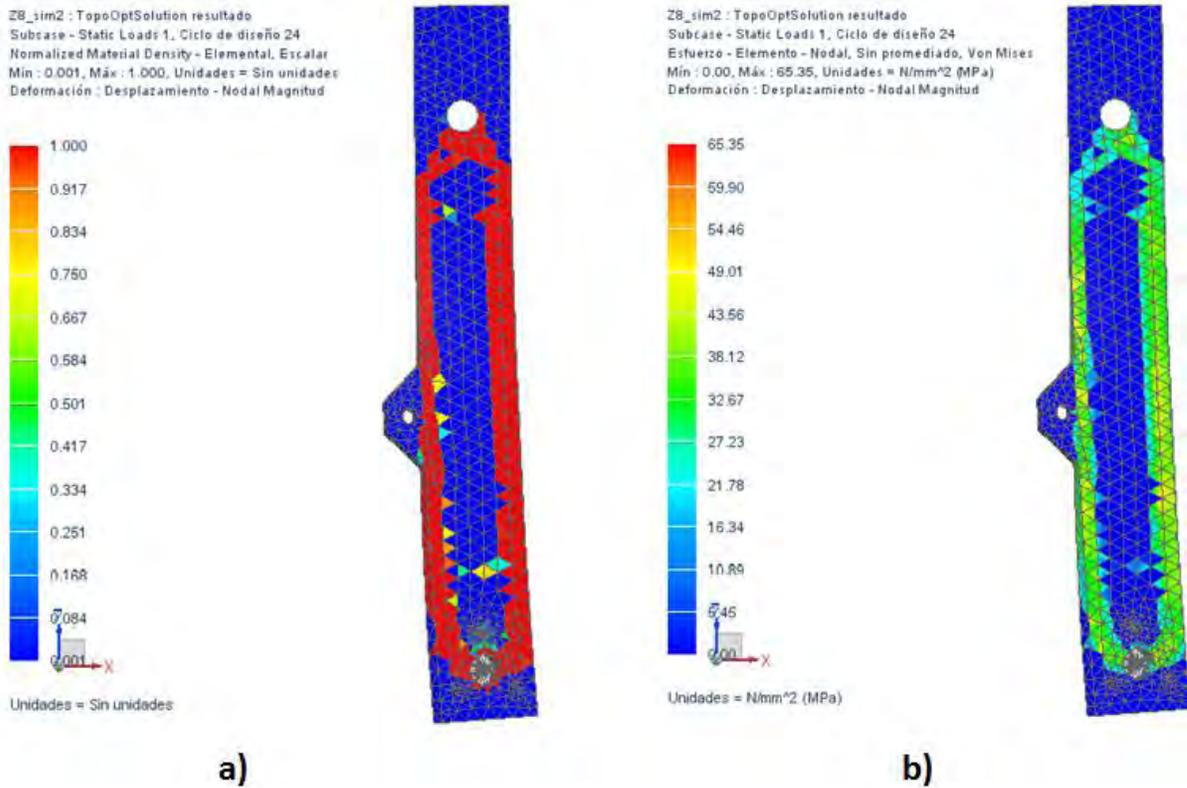


Figura 89. a) Resultado de optimización de topología por el software, el color rojo indica un 100% de densidad cuyo valor disminuye hasta llegar a el color azul con 0%. b) Concentración de esfuerzos bajo el criterio de Von Mises para la pieza con la densidad generada en la optimización de topología.

El valor del esfuerzo de Von Mises calculado por el software para la geometría optimizada es de 65.35 MPa (figura 89 b)), después se exporto la nueva geometría y se usó como plantilla para la generación de la pieza final (figura 90 a)). La nueva geometría rediseñada se analizó bajo las mismas condiciones que la pieza inicial, el rango de esfuerzos generados se detallan en la figura 90 c) cuyo valor máximo corresponde 38.32 MPa. El valor del factor de seguridad de la pieza final es de 4.09.

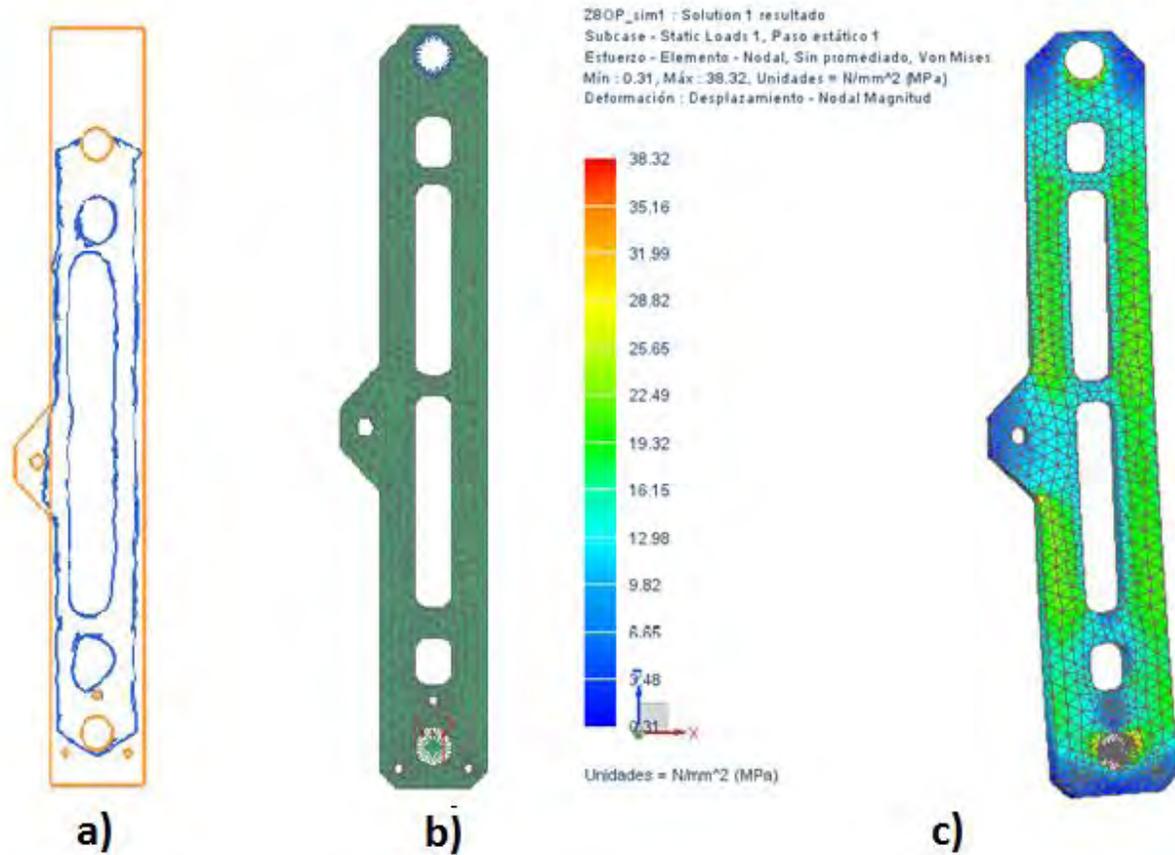


Figura 90. Pieza tibia-peroné a) El contorno de color anaranjado muestra la pieza inicial y el azul la pieza optimizada, b) Geometría final con malla, restricciones y cargas. c) Resultados de la simulación donde se muestra el rango de esfuerzos de Von Mises generados en la estructura.

---

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

Una vez optimizadas las piezas se incorporaron al diseño de la estructura, también se realizaron diversos ajustes de manufactura sobre los componentes diseñados con la finalidad de facilitar el maquinado y ensamble. La versión final se detalla en la figura 91, se propone usar color negro mate en geometrías ajenas al aluminio y cuyo color no satisfaga las reglas de la RoboCup Soccer. Las especificaciones finales del robot se establecen en la siguiente tabla:

**Tabla 17. Especificaciones finales del robot humanoide.**

Masa	6.77 kg
Altura	80 cm
Largo	37.39 cm
Ancho	16.89 cm
Grados de libertad	20

La estructura mecánica del robot está compuesta por un conjunto de láminas de aluminio 5050 cortadas con la máquina CNC, unidas a través de tornillos y varillas roscadas, como característica principal del diseño final es que no cuenta con algún doblez, además tanto los componentes de unión y materiales son de fácil adquisición. También se emplea el uso de PLA en diversas piezas como el cuello y el torso.

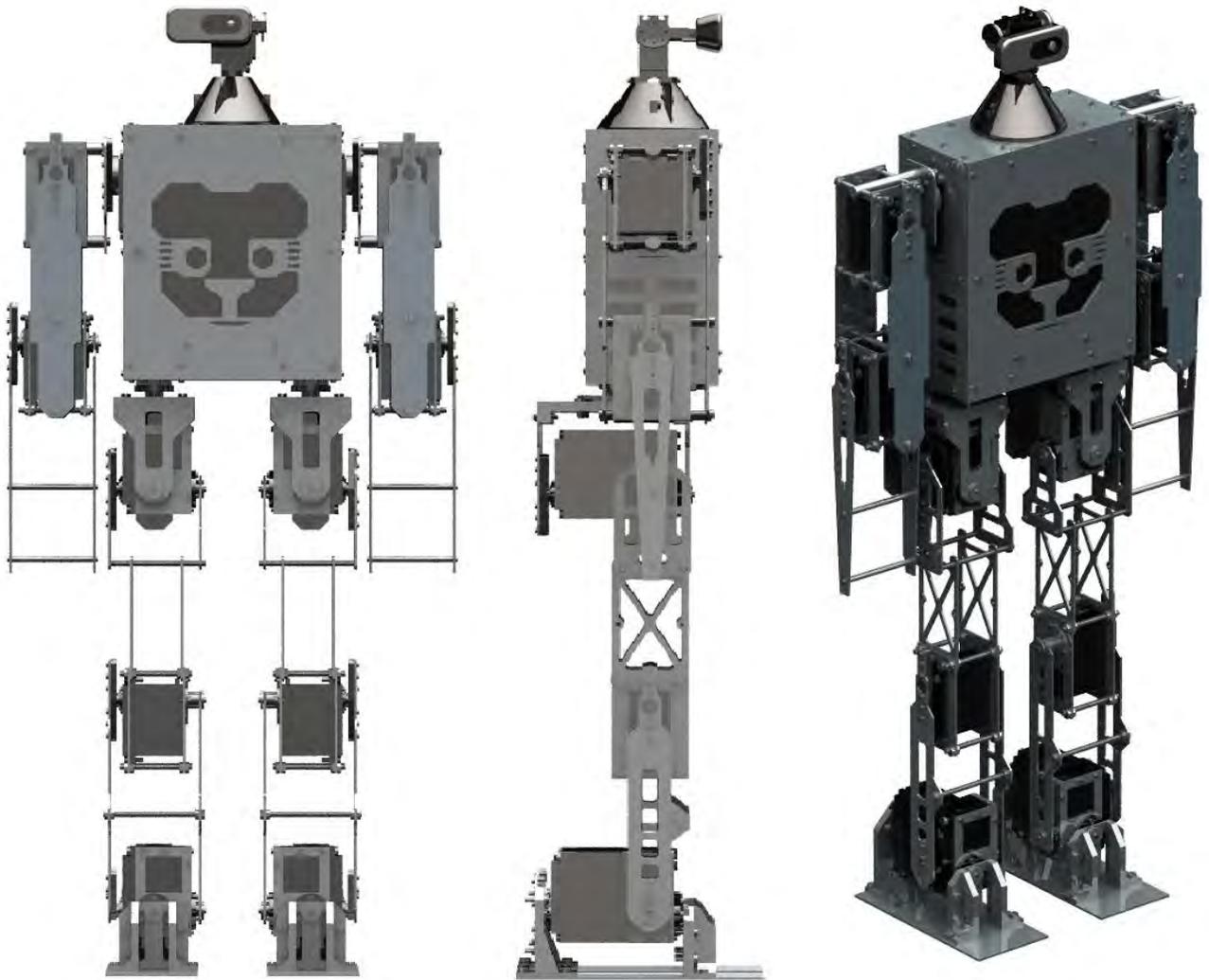


Figura 91. Diseño final del robot humanoide.

A continuación, se exponen diversas características de la estructura mecánica del robot con la finalidad de corroborar el cumplimiento de las restricciones establecidas en el capítulo III.

**Restricciones de tamaño:**

En el capítulo III se establecieron las restricciones de morfología que el robot debe satisfacer para calificar en la competencia, basándose en la tabla 7, donde se especifican los límites de las relaciones que condicionan el tamaño de diversos segmentos del robot y en la figura 92 que presenta las dimensiones finales del

robot se generó la tabla 18, en la cual especifican las longitudes de tales restricciones cuyas magnitudes no sobrepasan el límite máximo supuesto.

El ancho y largo de la estructura del robot se ilustra en la figura 93, cuya longitud corresponde a 16.89 cm y 37.39 cm respectivamente, el largo es la longitud máxima de hombro a hombro, pero también es el diámetro necesario para contenerlo en un cilindro, de acuerdo a las reglas con una altura de 80 cm el diámetro máximo del cilindro es de 44 cm por lo que se cumple con la restricción como se indica en la tabla 18.

**Tabla 18. Valor de las relaciones antropomórficas.**

<b>Rangos en extremidades</b>		
<b>Variable</b>	<b>Robot (cm)</b>	<b>Máximo (cm)</b>
$H_{top}$	80	90
<i>Diámetro del cilindro</i>	37.39	44
$X_{total}$	95.15	96
$Z_{total}$	99	120
$H_{leg}$	40	56
$H_{head}$	9.93	20

De la tabla anterior, el valor de  $X_{total}$  es cercano al rango máximo, la razón es que se busca obtener la ayuda de los servomotores de los brazos para la incorporación del robot, sin embargo, su longitud fue restringida por el torso dejando como resultado las dimensiones de los brazos establecidas en dicha tabla. El valor de  $H_{head}$  fue variable durante todo el diseño ya que es la pieza cuyo rediseño no alteraba la estructura del robot. Es decir, durante el rediseño de diversas piezas la altura del robot variaba, pero finalmente era corregida con el simple aumento del cuello.

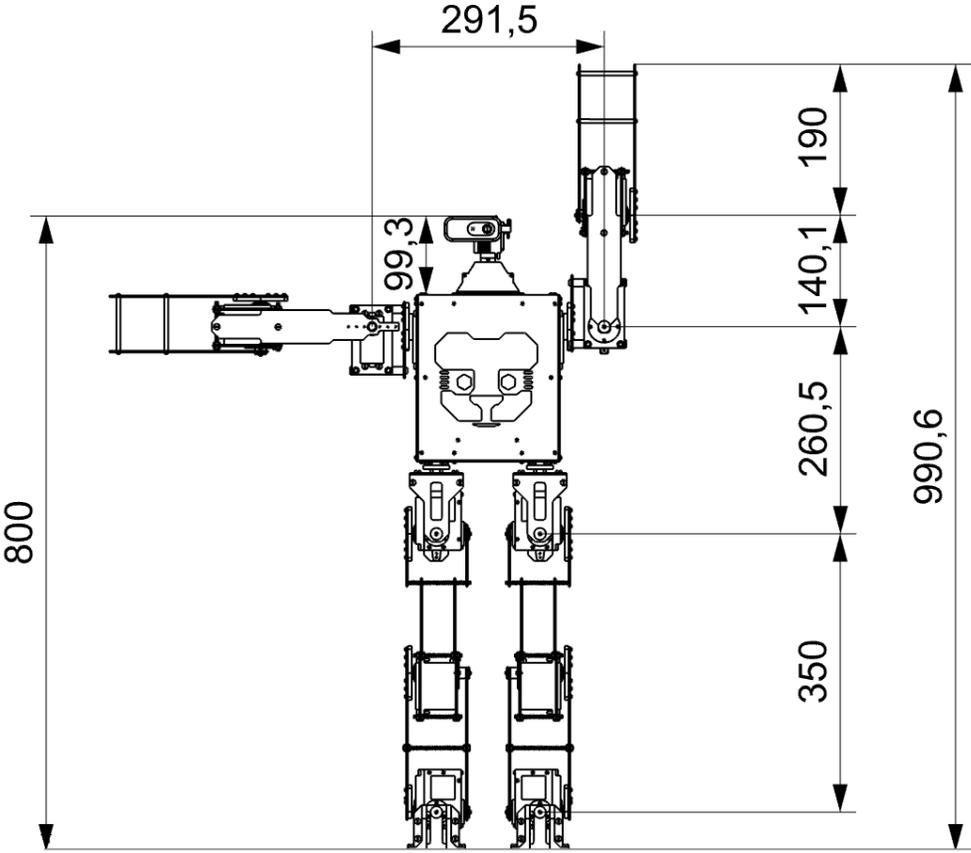


Figura 92. Dimensiones de las extremidades del robot humanoide finales, unidades en mm.

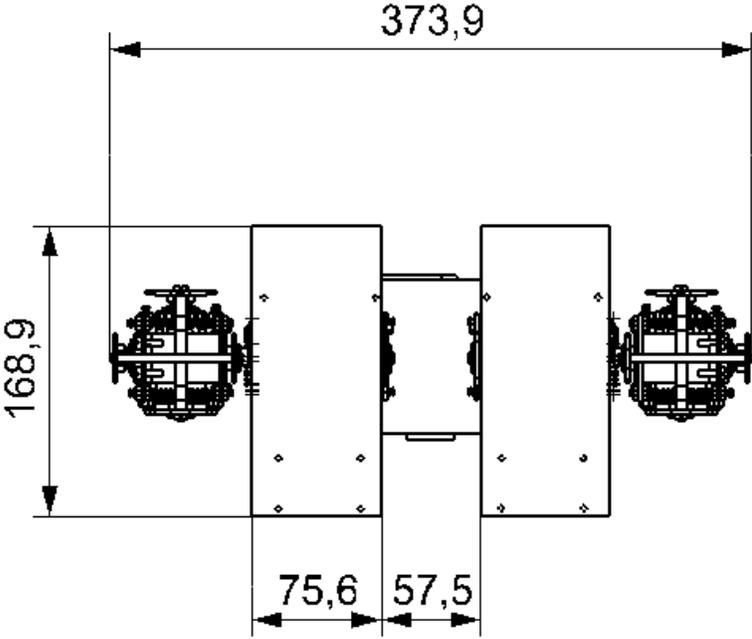


Figura 93. Vista inferior del robot se muestran las dimensiones del ancho y largo de la estructura, dimensiones en mm.

**Tamaño de los pies:**

Debido a la variación del CG durante el diseño, los talones se diseñaron al final junto con las respectivas modificaciones en los pies. Basados en la figura 93 el lado más corto mide: 7.5604 cm y el más largo 16.889 cm entregando una superficie de 127.68 cm<sup>2</sup> por cada pie.

De acuerdo al CAD la altura del CG respecto al suelo se encuentra a 40.770 cm y utilizando la ecuación que restringe el área de los pies se obtiene un área máxima de:

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{(2.2H_{com})^2}{32} = \frac{(2.2(40.770 \text{ cm}))^2}{32} = 251.407 \text{ cm}^2.$$

Por lo que el valor del área de cada pie se encuentra en el rango especificado. Las dimensiones del polígono de sustentación del pie son: ancho 7.5604 cm y largo 16.889 cm entonces su relación del lado más largo entre el más corto es de: 2.2398, siendo 2.5 el valor máximo especificado. En el diseño del CAD se propone un tamaño inicial de las suelas del pie que satisfacen la reglas de la RoboCup, sin embargo, el diseño es abierto a las necesidades durante el desarrollo de la marcha del robot.

**Proyección del CG sobre el polígono de sustentación**

De capítulos anteriores se estableció que para aumentar la robustez del robot durante la marcha estática la proyección del centro de gravedad debe estar en el centro del polígono de sustentación, esto se logró gracias a la simetría del robot y al desplazamiento de las suelas del pie una vez terminado el diseño, puesto que cada vez que se rediseñaba o agregaba una pieza esta variación de masa desplazaba el CG. Para su ubicación utilizando NX se generaron las coordenadas de los vértices de las suelas del pie y del CG, el resultado se muestra en la figura 94, donde se exhibe la orientación del CG y el del polígono, nótese que en la figura solo se percibe un punto debido a que sus coordenadas son similares y se sobreponen.

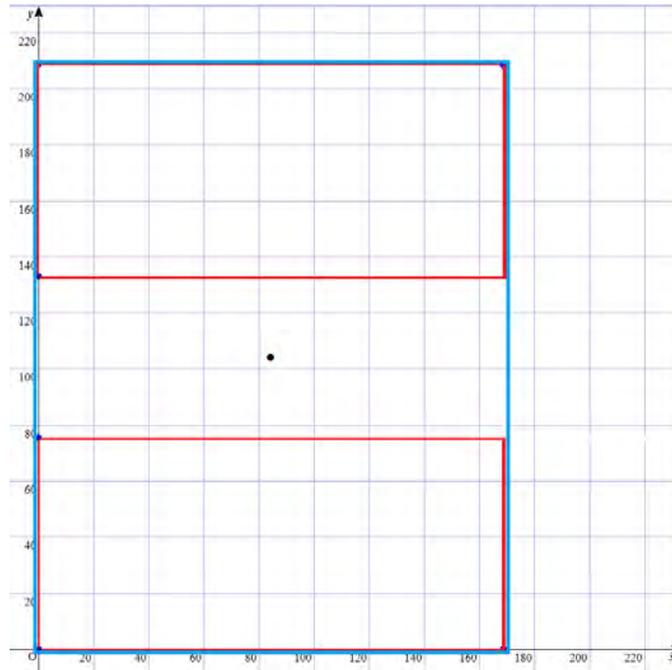


Figura 94. Proyección del CG sobre el polígono de sustentación. El color azul muestra el polígono de sustentación del robot en posición erguida, de rojo se muestra el contorno de cada pie. Los puntos sobrepuestos en el centro del polígono indican la proyección del CG y del centro del polígono.

Parte del diseño fue condicionado por el movimiento angular de cada articulación, por ejemplo, la distancia de las articulaciones de cada cadera dependió de los movimientos que necesitaba realizar sin que estas se obstruyeran en algún momento, pero al mismo tiempo se consideraba las restricciones establecidas en el capítulo tres. A continuación, se especifican los desplazamientos angulares en las articulaciones del robot de acuerdo a los límites físicos y permitidos por los servomotores. La finalidad es establecer una referencia para futuros análisis, además de poderse comparar con los ángulos de referencia especificados en la tabla 1. Para ejemplificar la tabla 19, se agregó en el apéndice las figuras que ilustran dichos desplazamientos angulares en cada articulación.

Tabla 19. Especificaciones angulares de las articulaciones del robot.

Desplazamiento angular en articulaciones del robot		
articulación	eje	desplazamiento angular °
hombro	x	-90 a 90
	y	0 a 180
codo	x	0 a 158
rodilla	x	-119.5 a 0
cadera	x	- 48 a 90
	y	-7.7 a 90
	z	-90 a 90
tobillo	x	-30 a 100
pie	y	-90 a 90
Raquis cervical	x	- 45 a 45
	z	-90 a 90

El diseño final abarca el uso de machuelos y tornillos de 1/8 in, 3/16 in y 2.5 mm, en total se ensamblaron 741 cuerpos. En la tabla 20 se enlistan los elementos que componen al robot, así como el material y la manufactura que satisfacen las especificaciones del capítulo tres. En el apéndice se ilustra la ubicación de dichos componentes.

Tabla 20. Lista de piezas con su material y manufactura propuestos.

Nombre de la pieza	Cantidad	Material	Manufactura
Z15	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z14	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z13	4	PLA	IMPRESO EN 3D
Z12	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z11	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z1B	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z8OP	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z7	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z6	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z3	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
ZZOP	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
Z1	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
PIE1	2	PLA	IMPRESO EN 3D
MIRROR_PIE1_0	2	PLA	IMPRESO EN 3D
MIRROR_Z15_0	2	PLA	IMPRESO EN 3D

LAMINA1	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
LAMINA3	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
GEMELO	4	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
PLACAA	8	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
PLACAC	4	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
PLACAD	4	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
W	4	ALUMINIO	TORNEADO
P7	4	ALUMINIO	TORNEADO
P6	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
P5OP	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
P4OP	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
P3OP	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
P2	4	ALUMINIO	TORNEADO
P1OP	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
LAMINA1	4	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
LAMINA3	4	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
CUELLO1	2	PLA	IMPRESO EN 3D
CUELLO1	1	PLA	IMPRESO EN 3D
CABEZA	1	PLA	IMPRESO EN 3D
TAPA TORSO	1	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
SOPORTESSC	1	PLA	IMPRESO EN 3D
BASES-BATERIAS	1	PLA	IMPRESO EN 3D
SOPORTERAXDA	1	PLA	IMPRESO EN 3D
MIRROR_ESQUINERO_O	4	PLA	IMPRESO EN 3D
ESQUINERO	4	PLA	IMPRESO EN 3D
TORSO3	1	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
TORSO6	1	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
SOPORTE	14	PLA	IMPRESO EN 3D
TORSO5	1	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
TORSO4	2	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
TORSO1	1	ALUMINIO 5050	FRESADO CNC
HSR-5990TG	1	PROVEDOR	PROVEDOR
HSR-5990TG UN EJE	1	PROVEDOR	PROVEDOR
SERVO_PAR	18	PROVEDOR	PROVEDOR
EJERODILLA2	4	TEFLÓN	TORNEADO
HORN HSR5990	3	PROVEDOR	PROVEDOR
ESLABON2_PAR	2	PROVEDOR	PROVEDOR
ESPARRAGOPIERNA	2	PROVEDOR	PROVEDOR
ESPARRAGO2	4	PROVEDOR	PROVEDOR
TOR1-8X1-4	20	PROVEDOR	PROVEDOR
TAPA	14	TEFLÓN	TORNEADO
EJERODILLA3	2	TEFLÓN	TORNEADO
ESPARRAGO	24	PROVEDOR	PROVEDOR

<b>TUERCA</b>	106	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>BASE_RODAMIENTO</b>	8	TEFLÓN	TORNEADO
<b>TORNILLO2.5_PAR</b>	270	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>TOR-1-8X1-2</b>	110	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>CONTROLADORSSC</b>	1	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>BISAGRA1</b>	1	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>BISAGRA</b>	1	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>RADX</b>	1	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>TORNILLO5-32</b>	4	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>AMORTIGUADOR</b>	4	TEFLÓN	TORNEADO
<b>BATERIA LIPO</b>	2	PROVEDOR	PROVEDOR
<b>ESLABON_PAR</b>	16	PROVEDOR	PROVEDOR

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### Conclusiones:

El diseño final del robot humanoide presentado cumple con los objetivos de este trabajo, tal como se indica en los siguientes puntos:

- Diseño morfológico compatible con la RoboCup: el diseño final presentado en este trabajo cumple las proporciones morfológicas de las reglas establecidas en la RoboCup Soccer, permitiéndole participar tanto en la categoría TeenSize como KidSize.
- Diseño enfocado a la manufactura: la estructura fue diseñada para que se pudiera maquinar dentro del laboratorio UNAMoids IIMAS, además se consideró que el ensamble fuera simple y sin dobleces, permitiendo el continuo mantenimiento del humanoide empleando los recursos de hardware previamente disponibles.
- Análisis FEA: la caracterización del aluminio 5050 propuesto como material estructural, proporcionó datos que permitieron elaborar una simulación más confiable del comportamiento mecánico de diversas piezas, validando así la estructura y permitiendo la optimización en sus geometrías disminuyendo la masa total del robot.

### **Trabajo futuro:**

Se espera que este prototipo sea la base de experimentación y retroalimentación para el equipo UNAMoids.

Se dejan disponibles en el laboratorio los diseños de la estructura para que se puedan hacer las mejoras que el equipo considere adecuadas. En caso que se requiera, es posible agregar un arnés para levantar al robot, puesto que el diseño del torso lo permite.

Por otra parte, es necesario incorporar a la estructura mecanismos que amortigüen los diversos impactos del robot especialmente en los coples del eje del servomotor, ubicados en la articulación del hombro y la cadera. Para el caso de los hombros un diseño de hombreras ligeras que no limiten los movimientos de la extremidad le serían de gran ayuda, en el caso del pie del robot suelas que favorezcan la tracción y amortiguamiento durante su marcha bípeda para que se puedan compensar las irregularidades del piso donde tengan lugar las pruebas.

Finalmente, si se quisiera modificar la altura total del robot, el diseño actual tiene un margen de variación simple el cual surte efecto cambiando únicamente el diseño del cuello, debiendo verificar que los rangos antropomórficos lo permitan.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvaro, J. G., Forner, A. C., Moreno, J. C., Turowska, E., & Pons, J. L. (2008). Síntesis de la marcha robótica mediante la aproximación del ciclo límite: el robot bípedo esbirro. *Science CSIC*, 54-109.
- American Honda Motor Co. Inc. (2016). *ASIMO by Honda: The World's Most Advanced Humanoid Robot*. Recuperado el 16 de septiembre de 2016, de <http://asimo.honda.com/default.aspx>
- Askeland, D. R. (c1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (3a ed.). México: International Thomson.
- Barrientos, A., Balaguer, C., Aracil, R., & Peñin, L. (2007). *Fundamentos de robótica* (2a ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Bekey, G., Ambrose, R., Kumar, V., Lavery, D., Sanderson, A., Wilcox, B., . . . Zheng, Y. (2008). *Robotics: State of the Art and Future Challenges*. London: Imperial College Press.
- Boston Dynamics. (2016). *Atlas - The Agile Anthropomorphic Robot*. Recuperado el 10 de septiembre de 2016, de [http://www.bostondynamics.com/robot\\_Atlas.html](http://www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html)
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. k. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de sigley* (8a ed.). Mexico: McGraw-hill.
- China CNC Zone. (2017). *User guide for CNC 3040 series*. China. Recuperado el 18 de 02 de 2017, de <http://www.chinacnczone.com/>
- Choong, E., Chee-meng, C., Aun-Neow, P., & Hong, G.-s. (March de 2003). Mechanical design of an anthropomorphic bipedal robot. *First Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control Environment and Management (HNICEM) International Conference*, (págs. 27-30). Manila, Philippine.
- Clarkson, H. M. (2003). *Proceso evaluativo musculoesqueletico* (1 ed.). Barcelona: PAIDOTRIBO.
- Conradt, J. (2001). *Online-Learning in Humanoid Robots. Diploma Thesis*. Recuperado el 26 de octubre de 2016, de Jörg Conradt's Homepage: <http://www.ini.uzh.ch/~conradt/publications/>
- CYS Model Technology Co., L. (2017). *CYS Model Technology Co.,LTD*. Recuperado el 14 de abril de 2017, de <http://www.cysmodel.com/showproducty.asp?c=20&a=107>
- DARPA. (11 de julio de 2013). *Darpa's Atlas robot unveiled*. Recuperado el 26 de mayo de 2016, de <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2013/07/11.aspx>
- DARPA. (2016). *DARPA Robotics Challenge*. Recuperado el 13 de septiembre de 2016, de <http://archive.darpa.mil/roboticschallenge/>
- Dr. Garcia, J. L., & Dr. Rodríguez, J. M. (2015). Equilibrio y estabilidad del cuerpo humano. En P. P. Soriano, *Biomecánica básica: aplicada a la actividad física y el deporte* (págs. 99-130). Barcelona: Paidotribo.

- Dr. Lisón, J. F., Dr. Sánchez, D. Z., & Dr. Vera, F. G. (2015). Bases anatómicas y fisiológicas del movimiento humano. En P. S. Pérez, & S. B. Llana, *Biomecánica básica : aplicada a la actividad física y el deporte* (págs. 209-2015). Barcelona: Paidotribo.
- Dra. Mademli, L., & Dr. Morey, G. (2015). La marcha humana y la carrera. En P. S. Pérez, & S. B. Llana, *Biomecánica básica: aplicada a la actividad física y el deporte*. (págs. 401-423). Barcelona: Paidotribo.
- Fabre, R., Gimbert, H., Gondry, L., Hofer, L., Ly, O., N'Guyen, S., . . . Rouxel, Q. (2016). *Rhoban Football Club -- Team Description Paper*. Recuperado el 19 de octubre de 2016, de Robocup Humanoid League:  
[https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/2d39c6b9b5d117d9488ec1b5cf630792e292e8c9/Rhoban\\_Football\\_Club\\_Humanoid\\_KidSize\\_2016\\_Specs.pdf](https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/2d39c6b9b5d117d9488ec1b5cf630792e292e8c9/Rhoban_Football_Club_Humanoid_KidSize_2016_Specs.pdf)
- Faller, A., & Schünke, M. (2006). *Estructura y función del cuerpo humano*. (1ª ed.). Badalona: Paidotribo.
- Farazi, H., Allgeuer, P., Ficht, G., & Behnke, S. (2016). *NimbRo TeenSize Team Description 2016*. Recuperado el 22 de septiembre de 2016, de RoboCup Humanoid League:  
[https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/b7b6cf21c417902f4b99b2e65a935fefa04d8824/NimbRo\\_TeenSize\\_Humanoid\\_TeenSize\\_2016\\_TDP.pdf](https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/b7b6cf21c417902f4b99b2e65a935fefa04d8824/NimbRo_TeenSize_Humanoid_TeenSize_2016_TDP.pdf)
- Fukuda, T., Hasegawa, Y., Sekiyama, K., & Aoyama, T. (2012). *Multi-Locomotion Robotic Systems: New Concepts of Bio-inspired Robotics*. Berlin Heidelberg: Springer.
- GrabCAD. (2017). Recuperado el 24 de marzo de 2017, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library>
- GRIZZLY INDUSTRIAL INC. (2014). *Owner's manual, Model G0709 14'' x 40'' gunsmithing lat*. Recuperado el 14 de 03 de 2017, de [http://www.grizzly.com/products/14-X-40-Gunsmithing-Gearhead-Lathe/G0709?utm\\_campaign=zPage&utm\\_source=grizzly.com](http://www.grizzly.com/products/14-X-40-Gunsmithing-Gearhead-Lathe/G0709?utm_campaign=zPage&utm_source=grizzly.com)
- Guizzo, E., & Ackerman, E. (2016). *IEEE Spectrum*. Recuperado el 11 de septiembre de 2016, de The Next Generation of Boston Dynamics' ATLAS Robot Is Quiet, Robust, and Tether Free: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/next-generation-of-boston-dynamics-atlas-robot>
- Harmonic Drive LLC. (2017). *Harmonic Drive High Precision Gear*. Recuperado el 16 de 4 de 2017, de Harmonic Drive: <http://www.harmonicdrive.net/technology>
- Hayashibara, Y., Minakat, H., Irie, K., Seki, Y., Yamamoto, R., Maekawa, D., . . . Sakamoto, H. (2016). *Qualification material for CIT Brains (Kids) (Kid Size)*. Recuperado el 21 de septiembre de 2016, de Robocup Humanoid League:  
[https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/808c9dcdc24010c8d063986e3842b286815aefcd/CIT\\_Brains\\_Kids\\_Humanoid\\_KidSize\\_2016\\_TDP.pdf](https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/808c9dcdc24010c8d063986e3842b286815aefcd/CIT_Brains_Kids_Humanoid_KidSize_2016_TDP.pdf)
- HITEC RCD USA, Inc. (2017). *Hitec Multiplex*. Recuperado el 10 de 2 de 2017, de <http://hitecrd.com/products/servos/discontinued-servos-servo-accessories/hsr-5990tg-hmi-ultra-premium-robot-servo/product>

- Hobby People. (24 de marzo de 2017). *Hobby People, Radio Control Hobby Shop*. Obtenido de [http://www.hobbypeople.com/shop/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=26046&language=en&zenid=51eb23454c5fb1aeba83b068d0cf17df](http://www.hobbypeople.com/shop/index.php?main_page=product_info&products_id=26046&language=en&zenid=51eb23454c5fb1aeba83b068d0cf17df)
- Honda Motor Co. (2016). *Honda Worldwide site*. Recuperado el 13 de septiembre de 2016, de <http://world.honda.com/ASIMO/technology/2011/index.html>
- Honda Motor Co., Ltd. (septiembre de 2007). *ASIMO Technical Information*. Recuperado el 24 de marzo de 2017, de ASIMO by Honda | The World's Most Advanced Humanoid Robot: <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf>
- Huan, Y., Dongdong, Y., WenXing, M., & Rong, X. (2016). *ZJUDancer Team Description Paper*. Retrieved noviembre 15, 2016, from Robocup Humanoid League: [https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/10ab3f6f63b8a2264c8690404cfc83ad5988e9ca/ZJUDancer\\_Humanoid\\_KidSize\\_2016\\_TDP.pdf](https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/10ab3f6f63b8a2264c8690404cfc83ad5988e9ca/ZJUDancer_Humanoid_KidSize_2016_TDP.pdf)
- Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K., & Yokoi, K. (2014). *Introduction to humanoid robotics*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Kapandji, I. A. (2006). *Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 2* (6ª ed.). MADRID ESPAÑA: PANAMERICANA.
- Kapandji, I. A. (2006). *Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana Tomo 1* (6ª ed.). MADRID ESPAÑA: PANAMERICANA.
- Kapandji, I. A. (2016). *Fisiología articular : esquemas comentados de mecánica humana Tomo 3* (6ª ed.). MADRID ESPAÑA: PANAMERICANA.
- KAWADA INDUSTRIES, INC. (2016). *KAWADA INDUSTRIES, INC*. Recuperado el 17 de septiembre de 2016, de <http://global.kawada.jp/mechatronics/hrp4.html>
- Kenji KANEKO, F. K. (2011). Humanoid robot hrp-4-humanoid robotics platform with lightweight and slim body. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* , 4400-4407.
- Kenji KANEKO, S. K. (2002). Design of advanced leg module for humanoid robotics project of METI. *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (págs. 38-45). IEEE.
- kottke, F. j., & lehmann, j. f. (c1993). *Krusen medicina fisica y rehabilitacion* (4ª ed.). (D. s. Martha c. boxaca, Trad.) Madrid: Médica Panamericana.
- Kuo, C. H., Chen, Y.-C., Chang, A.-H., Gaox, M.-L., & Huang, P.-C. (2016). *Team Description Paper: HuroEvolutionTN* . Recuperado el 23 de septiembre de 2016, de Robocup Humanoid League: [https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/1b91f33cd934a11995c6173e3ac7ae4b2cabcf0/HuroEvolutionTN\\_Humanoid\\_TeenSize\\_2016\\_TDP.pdf](https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/1b91f33cd934a11995c6173e3ac7ae4b2cabcf0/HuroEvolutionTN_Humanoid_TeenSize_2016_TDP.pdf)
- logitech. (2017). *logitech*. Recuperado el 9 de marzo de 2017, de <https://www.logitech.com/>

- MakerMex. (2017). *makermex impresoras 3D*. Recuperado el 12 de 03 de 2017, de <http://makermex.com/shop/product/impresora-3d-prusa-i3-89>
- Markoff, J. (11 de julio de 2013). *Modest Debut of Atlas May Foreshadow Age of 'Robo Sapiens'*. Recuperado el 20 de septiembre de 2016, de <http://www.nytimes.com/2013/07/12/science/modest-debut-of-atlas-may-foreshadow-age-of-robo-sapiens.html?mcubz=3>
- MASISA S.A. (2017). Recuperado el 27 de 07 de 2017, de MASISA: [http://www.masisa.com/mex/wp-content/files\\_mf/1466009882FTMASISAMDF06062016.compressed2.pdf](http://www.masisa.com/mex/wp-content/files_mf/1466009882FTMASISAMDF06062016.compressed2.pdf)
- MatWeb, L. (2016). *Aluminum 5050-H32*. Recuperado el 11 de 12 de 2016, de MatWeb: Online Materials Information Resource: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=264a79a330914c589bdeae866556cb3d&ckck=1>
- MatWeb, L. (2016). *Overview of materials for Nylon 66, Unreinforced*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2016, de MatWeb: Online Materials Information Resource: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=a2e79a3451984d58a8a442c37a226107>
- MatWeb, L. (10 de 12 de 2016). *Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced*. Obtenido de MatWeb: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdff6f41dd98f8eec3599eaa20>
- MatWeb, L. (2017). *AISI 310*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de MatWeb: Online Materials Information Resource: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=db1542ad8b2844d8a70d5421b459cb60>
- MatWeb, L. (2017). *DIAB Divinycell® H 80 Semi-rigid PVC Foam Core Material*. Recuperado el 7 de marzo de 2017, de MatWeb: Online Materials Information Resource: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=1fc325ff351f42a299ceb2f10885fc9b>
- Mejía, S. G., Scarpetta, J. R., & Rodríguez, E. A. (2015). Técnicas de control para el balance de un robot bípedo: un estado del arte. *Tecnura*, 133-156.
- Miralles, R. M. (2001). *Valoración del daño corporal en el aparato locomotor*. Barcelona: Masson.
- Moore, K. L., & Dalley, A. F. (2006). *Anatomía con orientación clínica* (5ª ed.). Barcelona, España.: Panamericaba.
- Oxford University Press. (2017). *Oxford Dictionaries*. Recuperado el 2017 de julio de 2017, de <https://en.oxforddictionaries.com/definition/robot>
- Plas, F. (1979). *La marcha humana :Cinesiología dinamica, biomecanica y potomecanica* (1ª ed.). (J. plaja, Trad.) Barcelona: Masson.

- Plexiglas® by Arkema. (2017). Recuperado el 3 de junio de 2017, de Plexiglas® acrylic sheet and acrylic resin products:  
<http://www.plexiglas.com/export/sites/plexiglas/.content/medias/downloads/sheet-docs/plexiglas-general-information-and-physical-properties.pdf>
- Radxa Limited. (2017). *Radxa*. Recuperado el 27 de 3 de 2017, de <http://wiki.radxa.com>
- Real Academia Española. (2017). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 3 de junio de 2017, de <http://dle.rae.es/?id=2yjoMSO>
- RoboCup. (2015). *RoboCup Soccer Humanoid League Rules and Setup*. Recuperado el 25 de agosto de 2016, de <https://www.robocuphumanoid.org/wp-content/uploads/HumanoidLeagueRules2015-06-29-with-changes.pdf>
- RobotShop inc. (2017). *Lynxmotion Robot Kits*. Recuperado el 4 de 41 de 2017, de <http://www.lynxmotion.com/p-395-ssc-32-servo-controller.aspx>
- Sadeghnejad, S., Baltés, J., Ramezani, S., Karimi, M., Valaei, A., Javadi, M., . . . Behjou, S. (2016). *AUTMan Humanoid TeenSize Team Description Paper*. Recuperado el 23 de noviembre de 2016, de RoboCup Humanoid League:  
[https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/cb7ac34640a610d48ff2834c6d5553315e644cd0/AUTMan\\_Humanoid\\_TeenSize\\_2016\\_TDP.pdf](https://www.robocuphumanoid.org/qualification/2016/cb7ac34640a610d48ff2834c6d5553315e644cd0/AUTMan_Humanoid_TeenSize_2016_TDP.pdf)
- Serna, H. R., & Aceves, L. A. (2005). From mechatronic design to the construction of a statically stable biped robot. *2nd IEEE Latin American Robotic Symposium and VII Simposio Brasileiro de Automatización Inteligente*, (págs. 85-85048). Sao Luis-MA, Brazil.
- Vable, M. (2006). *Mecánica de materiales* (1ª ed.). (E. C. Gonzáles, Trad.) México: Alfaomega.
- Waseda University, H. R. (2016). Recuperado el 18 de agosto de 2016, de Humanoid History - WABOT-: [http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato\\_2.html](http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html)

APÉNDICE

Figura 95. Resultado ensayo de tracción para las probetas con estrías en dirección horizontal.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES Y MANUFACTURA

Prueba de tracción para muestras planas

Test type: Tensile	Instron Corporation
Operator name: Adolfo Altamirano M.	Series IX Automated Materials Testing System 1.04
	Test Date: 07 Mar 2017
Sample Identification: ALS050HR	Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series	
Machine Parameters of test:	
Sample Rate (pts/sec): 5.00	Humidity ( % ): 50
Crosshead Speed (mm/min ): 5.000	Temperature (deg. C): 20

Dimensions:

	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3
Width (mm)	12.000	12.400	12.500
Thickness (mm)	2.0000	2.1000	2.0000
Spec gauge len (mm)	50.000	50.000	50.000
Grip distance (mm)	100.00	100.00	100.00

Out of 3 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcment at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcment at 0.2% Yield (mm)
1	7.680	15.360	5.613	233.9	9.150	18.30	4.4580	185.80	.9292
2	6.970	13.940	5.774	221.8	8.520	17.04	2.7300	104.90	.9611
3	4.620	9.240	5.573	223.0	6.110	12.22	.3866	15.47	.9116
Mean:	6.423	12.850	5.653	226.2	7.927	15.85	2.5250	102.00	.9340
Standard Deviation:	1.602	3.203	.106	6.7	1.605	3.21	2.0430	85.20	.0251

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)
1	1.858	3.870	161.3	13100.
2	1.922	3.974	152.7	13280.
3	1.823	3.934	157.4	13460.
Mean:	1.868	3.926	157.1	13280.
Standard Deviation:	.050	.053	4.3	185.

Figura 96. Gráfica esfuerzo (MPa) – deformación % para probetas con estrías en dirección horizontal.

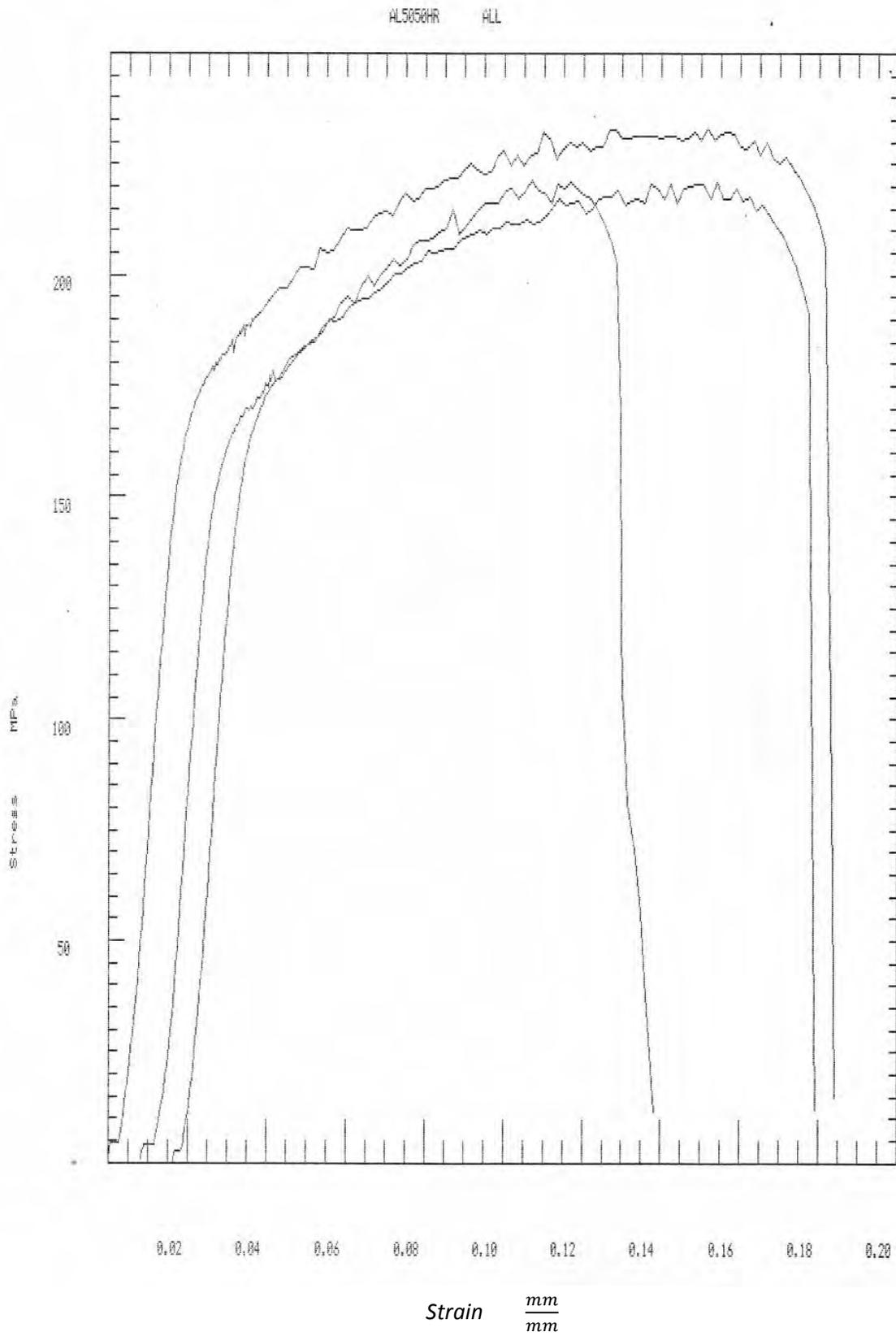


Figura 97. Resultado ensayo de tracción para las probetas con estrías en dirección vertical.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES Y MANUFACTURA

Prueba de tracción para muestras planas

Test type: Tensile	Instron Corporation
Operator name: Adolfo Altamirano M.	Series IX Automated Materials Testing System 1.04
	Test Date: 07 Mar 2017
Sample Identification: ALS050VR	Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series	
Machine Parameters of test:	
Sample Rate (pts/sec): 5.00	Humidity ( % ): 50
Crosshead Speed (mm/min ): 5.000	Temperature (deg. C): 21

Dimensions:

	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3
Width (mm)	12.060	12.540	12.500
Thickness (mm)	2.0400	2.1000	2.1000
Spec gauge len (mm)	50.000	50.000	50.000
Grip distance (mm)	100.00	100.00	100.00

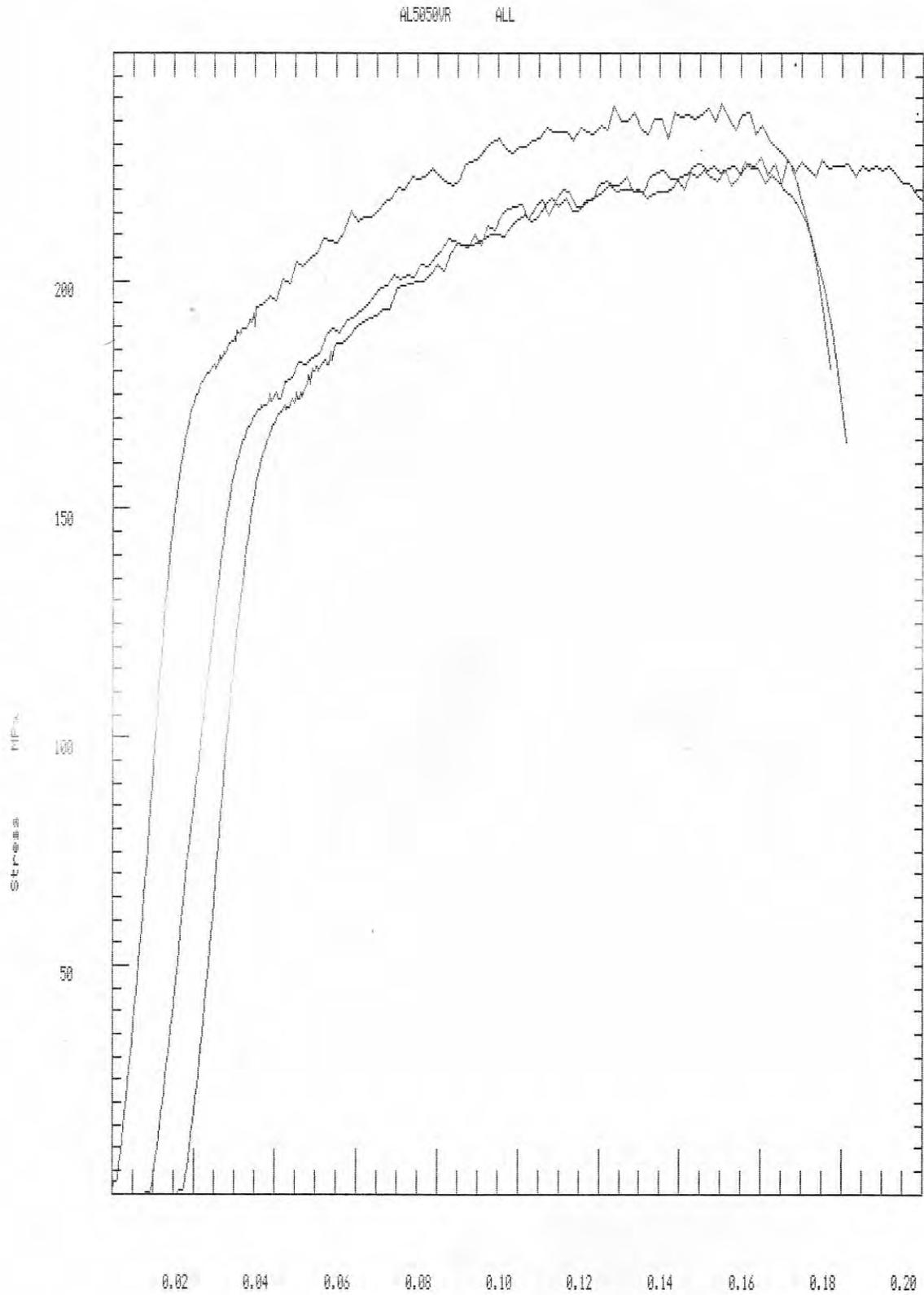
Out of 3 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcmnt at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displcmnt at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displcmnt at 0.2% Yield (mm)
1	7.260	14.52	5.891	239.5	8.850	17.70	4.413	179.4	.8976
2	7.130	14.26	5.976	227.0	8.690	17.38	4.051	153.9	1.1290
3	8.490	16.98	5.976	227.7	9.780	19.56	4.470	170.3	.9144
Mean:	7.627	15.25	5.948	231.4	9.107	18.21	4.311	167.9	.9802
Standard Deviation:	.750	1.50	.049	7.0	.589	1.18	.227	12.9	.1288

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)
1	1.795	4.091	166.3	12280.
2	2.257	4.224	160.4	8677.
3	1.829	3.934	149.9	11690.
Mean:	1.960	4.083	158.9	10880.
Standard Deviation:	.258	.145	8.3	1932.

Figura 98. Gráfica esfuerzo (MPa) – deformación % para probetas con estrías en dirección vertical.



Strain  $\frac{mm}{mm}$

Tabla 21. Reacciones y momentos en las juntas de la pieza humero.

pas o	J006_i_ FX	J006_i_ FY	J006_i_ FZ	J006_i_ FM	J006_i_ TX	J006_i_ TY	J006_i_ TZ	J006_i_ TM	J007_i_ FX	J007_i_ FY	J007_i_ FZ	J007_i_ FM	J007_i_ TX	J007_i_ TY	J007_i_ TZ	J007_i_ TM	
0	0.279	0.052	0.609	<b>0.672</b>	7.894	-82.124	3.046	<b>82.559</b>	-0.299	-0.048	-0.571	<b>0.646</b>	1.473	-13.711	0.435	<b>13.797</b>	
1	0.347	0.028	0.415	<b>0.542</b>	3.885	-83.796	2.088	<b>83.912</b>	-0.361	-0.024	-0.384	<b>0.528</b>	1.083	-7.601	-0.610	<b>7.702</b>	
2	0.499	0.169	0.478	<b>0.711</b>	29.088	-	4.511	<b>109.330</b>	-0.501	-0.159	-0.446	<b>0.689</b>	1.862	-13.422	3.812	<b>14.076</b>	
3	-0.001	-2.314	-0.272	<b>2.330</b>	-	400.089	45.886	-56.429	<b>406.646</b>	0.101	2.032	0.223	<b>2.047</b>	-19.233	-21.920	-21.578	<b>36.277</b>
4	3.631	0.000	0.231	<b>3.639</b>	-0.509	-	591.587	7.414	<b>591.634</b>	-3.351	0.000	-0.222	<b>3.359</b>	0.474	-87.950	-6.304	<b>88.177</b>
5	3.653	0.001	0.232	<b>3.660</b>	-0.460	-	587.920	7.476	<b>587.967</b>	-3.371	0.000	-0.223	<b>3.379</b>	0.481	-96.233	-6.335	<b>96.442</b>
6	3.671	0.001	0.233	<b>3.678</b>	-0.455	-	580.865	7.530	<b>580.914</b>	-3.389	0.000	-0.224	<b>3.397</b>	0.483	-	-6.359	<b>104.218</b>
7	3.690	0.001	0.232	<b>3.697</b>	-0.453	-	571.056	7.591	<b>571.106</b>	-3.407	0.000	-0.223	<b>3.415</b>	0.482	-	-6.385	<b>111.558</b>
8	3.708	0.001	0.231	<b>3.715</b>	-0.436	-	558.250	7.646	<b>558.302</b>	-3.425	-0.001	-0.221	<b>3.432</b>	0.480	-	-6.402	<b>118.371</b>
9	0.619	-0.035	0.360	<b>0.717</b>	-6.769	-82.904	5.072	<b>83.335</b>	-0.629	0.036	-0.341	<b>0.716</b>	-0.047	-17.260	-2.881	<b>17.499</b>	
10	0.629	-0.057	0.222	<b>0.670</b>	-9.443	-83.643	8.374	<b>84.590</b>	-0.632	0.057	-0.197	<b>0.665</b>	-1.032	-14.499	-3.387	<b>14.925</b>	
11	0.008	-0.154	0.487	<b>0.511</b>	-23.019	836.591	-	185.185	<b>857.151</b>	0.410	0.156	-0.481	<b>0.651</b>	-3.530	-	200.799	<b>777.378</b>
12	-22.124	0.002	0.282	<b>22.126</b>	-0.411	5611.647	-	968.489	<b>5694.608</b>	22.316	-0.002	-0.263	<b>22.317</b>	0.614	-	959.284	<b>2354.356</b>
13	-20.938	0.002	0.216	<b>20.939</b>	-0.261	4695.542	-	922.946	<b>4785.389</b>	21.134	-0.002	-0.197	<b>21.135</b>	0.478	-	914.252	<b>1958.464</b>
14	-20.040	0.002	0.159	<b>20.041</b>	-0.154	3879.749	-	889.365	<b>3980.380</b>	20.244	-0.002	-0.141	<b>20.244</b>	0.357	-	881.199	<b>1621.806</b>
15	-19.333	0.002	0.111	<b>19.333</b>	-0.059	3140.103	-	863.622	<b>3256.699</b>	19.545	-0.002	-0.094	<b>19.546</b>	0.264	-	855.969	<b>1337.026</b>
16	-18.743	0.002	0.073	<b>18.743</b>	-0.026	2461.025	-	842.444	<b>2601.222</b>	18.964	-0.002	-0.058	<b>18.964</b>	0.172	-	835.444	<b>1103.838</b>
17	-18.153	0.002	0.041	<b>18.153</b>	0.032	1827.041	-	820.999	<b>2003.027</b>	18.383	-0.002	-0.028	<b>18.383</b>	0.122	-	814.602	<b>925.319</b>
18	-17.640	0.003	0.017	<b>17.640</b>	0.063	1246.944	-	802.318	<b>1482.762</b>	17.877	-0.002	-0.005	<b>17.877</b>	0.088	-	796.565	<b>816.838</b>
19	-17.064	0.002	-0.004	<b>17.064</b>	0.058	710.382	-	780.588	<b>1055.443</b>	17.308	-0.001	0.014	<b>17.308</b>	0.009	54.375	775.848	<b>777.751</b>
20	-16.494	0.002	-0.021	<b>16.494</b>	0.067	223.210	-	758.902	<b>791.047</b>	16.744	-0.002	0.029	<b>16.744</b>	-0.003	266.466	754.918	<b>800.565</b>
21	-15.975	0.002	-0.034	<b>15.975</b>	0.069	-	-	738.743	<b>769.681</b>	16.229	-0.002	0.041	<b>16.229</b>	-0.035	456.859	735.689	<b>866.001</b>
22	-15.935	0.005	-0.037	<b>15.936</b>	-0.042	-	-	739.590	<b>959.935</b>	16.199	-0.004	0.042	<b>16.199</b>	0.054	630.019	736.879	<b>969.491</b>
23	-15.304	0.001	-0.061	<b>15.304</b>	0.096	-	-	726.942	<b>1017.195</b>	15.562	-0.001	0.065	<b>15.563</b>	-0.106	529.860	710.459	<b>886.286</b>
24	-14.879	0.001	-0.068	<b>14.879</b>	0.113	-	-	711.506	<b>1275.338</b>	15.141	-0.001	0.071	<b>15.141</b>	-0.130	680.450	694.649	<b>972.393</b>
25	-14.453	0.001	-0.075	<b>14.453</b>	0.094	-	-	706.976	<b>1536.602</b>	14.717	-0.001	0.077	<b>14.718</b>	-0.133	817.622	678.309	<b>1062.360</b>
26	-14.070	0.000	-0.082	<b>14.070</b>	0.151	-	-	703.03	<b>1787.552</b>	14.337	0.000	0.083	<b>14.337</b>	-0.167	942.958	663.510	<b>1153.003</b>
27	-13.606	0.001	-0.087	<b>13.606</b>	0.102	-	-	700.09	<b>2007.287</b>	13.875	-0.001	0.088	<b>13.875</b>	-0.160	1049.662	645.430	<b>1232.222</b>
28	-13.466	0.000	-0.092	<b>13.467</b>	0.134	-	-	700.09	<b>2249.970</b>	13.737	0.000	0.092	<b>13.737</b>	-0.178	1166.378	639.773	<b>1330.319</b>
29	-13.043	0.001	-0.097	<b>13.043</b>	0.077	-	-	700.09	<b>2429.973</b>	13.315	-0.001	0.096	<b>13.315</b>	-0.173	1251.570	623.055	<b>1398.079</b>
30	-12.823	0.000	-0.101	<b>12.823</b>	0.164	-	-	700.09	<b>2622.717</b>	13.097	0.000	0.100	<b>13.097</b>	-0.199	1342.754	614.351	<b>1476.623</b>

Tabla 22. Reacciones debido al contacto 3D del antebrazo con el suelo.

Time						
TIME_TIME,TIME	G001_FX,Force(abs)	G001_FY,Force(abs)	G001_FZ,Force(abs)	G001_TX,Torque(abs)	G001_TY,Torque(abs)	G001_TZ,Torque(abs)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.067	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.133	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.233	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.267	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.333	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.367	5.586	0.000	0.000	0.000	-756.038	205.291
0.400	24.984	0.000	0.000	0.000	-3085.796	918.253
0.433	23.827	0.000	0.000	0.000	-2635.371	875.591
0.467	22.983	0.000	0.000	0.000	-2231.268	844.345
0.500	22.344	0.000	0.000	0.000	-1861.276	820.542
0.533	21.829	0.000	0.000	0.000	-1517.603	801.214
0.567	21.307	0.000	0.000	0.000	-1191.791	781.539
0.600	20.859	0.000	0.000	0.000	-889.976	764.512
0.633	20.342	0.000	0.000	0.000	-606.227	744.902
0.667	19.820	0.000	0.000	0.000	-344.764	725.043
0.700	19.343	0.000	0.000	0.000	-106.476	706.773
0.733	19.416	0.000	0.000	0.000	98.516	708.051
0.767	18.703	0.000	0.000	0.000	50.700	682.742
0.800	18.315	0.000	0.000	0.000	246.018	667.650
0.833	17.913	0.000	0.000	0.000	426.933	652.021
0.867	17.552	0.000	0.000	0.000	593.681	637.824
0.900	17.104	0.000	0.000	0.000	742.332	620.497
0.933	16.981	0.000	0.000	0.000	892.698	614.979
0.967	16.568	0.000	0.000	0.000	1016.163	598.916
1.000	16.364	0.000	0.000	0.000	1140.631	590.462

Tabla 23. Fuerzas y momentos en la junta j002 con velociadd de 50 rpm.

	Time						
Time Step	TIME_TIME,TIME	J002_FX,Force(abs)	J002_FY,Force(abs)	J002_FZ,Force(abs)	J002_TX,Torque(abs)	J002_TY,Torque(abs)	J002_TZ,Torque(abs)
0	0.000	0.167	0.670	642.990	111968.499	1172.431	-1377.014
1	0.016	10.249	0.006	-54.845	-8777.368	5021.139	-1466.840
2	0.032	32.803	0.009	-51.606	-8221.111	14146.004	-4986.346
3	0.048	51.049	0.020	-39.588	-6190.825	20553.668	-7800.853
4	0.064	59.364	0.037	-22.637	-3319.811	21975.782	-8988.095
5	0.080	57.922	0.050	-8.099	-796.879	19326.213	-8587.805
6	0.096	55.664	0.059	0.809	882.770	16545.646	-8051.493
7	0.112	62.496	0.069	11.070	2859.012	15904.369	-8942.477
8	0.128	66.832	0.078	20.226	4574.426	14120.014	-9309.198
9	0.144	53.687	0.067	9.325	2839.569	11180.694	-6885.442
10	0.160	45.540	0.058	-0.256	1412.835	10126.507	-5413.228
11	0.176	41.644	0.055	-3.984	1059.822	9266.972	-4650.306
12	0.192	37.291	0.052	-7.316	825.358	8528.190	-3772.963
13	0.208	32.684	0.046	-13.611	108.207	8905.501	-2818.134
14	0.224	29.437	0.037	-22.779	-1099.148	10709.186	-2070.050
15	0.240	28.123	0.027	-33.404	-2573.689	13504.398	-1635.682
16	0.256	28.553	0.017	-44.424	-4147.975	16773.342	-1495.723
17	0.272	89.247	0.006	-55.145	-5692.603	22786.663	-11476.347
18	0.288	-13.604	0.266	218.495	42166.414	8447.095	5208.289
19	0.304	49.921	0.007	-53.610	-5220.659	17744.818	-4691.375
20	0.320	52.649	44.679	46889.981	3409645.576	-13114856.702	7354.726
21	0.336	53.499	-23.689	-24954.598	-1872583.686	9484784.303	-14320.457
22	0.352	52.729	0.001	-59.761	-5880.903	14588.862	-5328.166
23	0.368	49.009	0.003	-57.423	-5353.917	12284.389	-4862.399
24	0.384	-5445.585	24.727	25925.214	4450328.563	-7393622.137	923284.984
25	0.400	-1443.774	16.124	16884.591	2899519.545	-4894057.413	250038.161
26	0.416	-1606.740	15.158	15869.591	2727890.316	-4199455.195	275437.527
27	0.432	-2519.563	24.690	25885.948	4445827.358	-6397379.225	430685.201
28	0.448	1218.826	-0.017	-77.909	-8464.240	-278199.190	-199418.642
29	0.464	65.353	-1.090	-1205.208	-194193.206	249300.922	-11297.882
30	0.480	-973.843	-0.365	-442.827	-67541.932	362089.324	164355.263

Tabla 24. Traslado de cargas de la pieza en la región tibia-peroné.

pas o	J002_j_ FX	J002_j_ FY	J002_j_ FZ	J002_j_ FM	J002_j_ TX	J002_j_ TY	J002_j_ TZ	J002_j_ TM	J015_i_ FX	J015_i_ FY	J015_i_ FZ	J015_i_ FM	J015_i_ TX	J015_i_ TY	J015_i_ TZ	J015_i_ TM
0	-7.141	0.000	0.382	7.151	0.032	-	-5.952	1249.70	7.141	0.000	0.000	7.141	0.000	0.000	0.000	0.000
1	-1.858	0.000	0.382	1.897	0.032	-	-1.549	325.64	1.858	0.000	0.000	1.858	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-4.225	0.000	0.382	4.243	0.032	-	-3.522	740.09	4.225	0.000	0.000	4.225	0.000	0.000	0.000	0.000
3	-6.573	0.000	0.382	6.584	0.032	-	-5.480	1150.4	6.573	0.000	0.000	6.573	0.000	0.000	0.000	0.000
4	-8.897	0.000	0.382	8.905	0.032	-	-7.418	1555.5	8.896	0.000	0.000	8.896	0.000	0.000	0.000	0.000
5	-11.190	0.000	0.382	11.197	0.032	-	-9.333	1954.1	11.190	0.000	0.000	11.190	0.000	0.000	0.000	0.000
6	-13.449	0.000	0.382	13.454	0.032	-	-11.220	2344.9	13.449	0.000	0.000	13.449	0.000	0.000	0.000	0.000
7	-15.671	0.000	0.382	15.676	0.032	-	-13.079	2727.4	15.671	0.000	0.000	15.671	0.000	0.000	0.000	0.000
8	-17.857	0.000	0.382	17.862	0.032	-	-14.910	3101.3	17.857	0.000	0.000	17.857	0.000	0.000	0.000	0.000
9	-20.009	0.000	0.382	20.013	0.032	-	-16.715	3466.7	20.009	0.000	0.000	20.009	0.000	0.000	0.000	0.000
10	-22.131	0.000	0.382	22.134	0.032	-	-18.497	3824.0	22.130	0.000	0.000	22.130	0.000	0.000	0.000	0.000
11	-24.226	0.000	0.382	24.230	0.031	-	-20.260	4173.7	24.226	0.000	0.000	24.226	0.000	0.000	0.000	0.000
12	-26.303	0.000	0.383	26.305	0.031	-	-22.010	4516.7	26.302	0.000	0.000	26.302	0.000	0.000	0.000	0.000
13	-28.365	0.000	0.383	28.367	0.031	-	-23.752	4853.5	28.364	0.000	0.000	28.364	0.000	0.000	0.000	0.000
14	-30.418	0.000	0.383	30.420	0.031	-	-25.490	5184.9	30.417	0.000	0.000	30.417	0.000	0.000	0.000	0.000
15	-32.468	0.000	0.383	32.470	0.031	-	-27.230	5511.4	32.467	0.000	0.000	32.467	0.000	0.000	0.000	0.000
16	-34.519	0.000	0.383	34.521	0.031	-	-28.975	5833.6	34.518	0.000	0.000	34.518	0.000	0.000	0.000	0.000
17	-36.574	0.000	0.383	36.576	0.031	-	-30.728	6151.7	36.573	0.000	0.000	36.573	0.000	0.000	0.000	0.000
18	-38.636	0.000	0.383	38.638	0.031	-	-32.491	6465.7	38.635	0.000	0.000	38.635	0.000	0.000	0.000	0.000
19	-40.706	0.000	0.383	40.707	0.030	-	-34.267	6775.7	40.705	0.000	0.000	40.705	0.000	0.000	0.000	0.000
20	-42.784	0.000	0.383	42.786	0.030	-	-36.055	7081.5	42.783	0.000	0.000	42.783	0.000	0.000	0.000	0.000
21	-44.873	0.000	0.383	44.875	0.030	-	-37.857	7382.9	44.872	0.000	0.000	44.872	0.000	0.000	0.000	0.000
22	-46.970	0.000	0.383	46.972	0.030	-	-39.672	7679.3	46.969	0.000	0.000	46.969	0.000	0.000	0.000	0.000
23	-49.077	0.000	0.383	49.079	0.030	-	-41.503	7970.8	49.076	0.000	0.000	49.076	0.000	0.000	0.000	0.000
24	-51.194	0.000	0.383	51.196	0.029	-	-43.348	8257.0	51.193	0.000	0.000	51.193	0.000	0.000	0.000	0.000
25	-53.321	0.000	0.383	53.323	0.029	-	-45.208	8537.7	53.320	0.000	0.000	53.320	0.000	0.000	0.000	0.000
26	-55.462	0.000	0.383	55.464	0.029	-	-47.088	8813.1	55.461	0.000	0.000	55.461	0.000	0.000	0.000	0.000
27	-57.618	0.000	0.383	57.620	0.029	-	-48.987	9083.1	57.617	0.000	0.000	57.617	0.000	0.000	0.000	0.000
28	-59.794	0.000	0.383	59.795	0.029	-	-50.911	9348.0	59.792	0.000	0.000	59.792	0.000	0.000	0.000	0.000
29	-61.991	0.000	0.383	61.993	0.028	-	-52.861	9608.0	61.990	0.000	0.000	61.990	0.000	0.000	0.000	0.000
30	-64.222	0.000	0.383	64.223	0.028	-	-54.849	9864.4	64.220	0.000	0.000	64.220	0.000	0.000	0.000	0.000

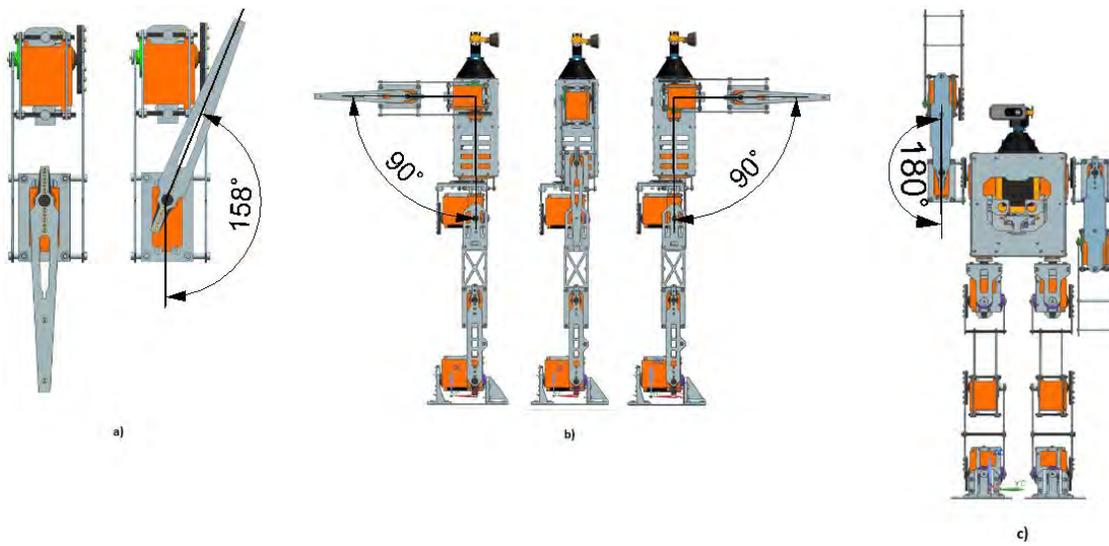


Figura 99. Movimientos del brazo. a) desplazamiento angular del codo respecto al eje X se muestra también su posición inicial de referencia. b) movimientos de rotación del brazo en el eje X de la articulación del hombro, en el centro se muestra la posición de referencia su desplazamiento es condicionado por el rango angular que entrega el servomotor. c) rango de rotación sobre el eje Y de la articulación del hombro.

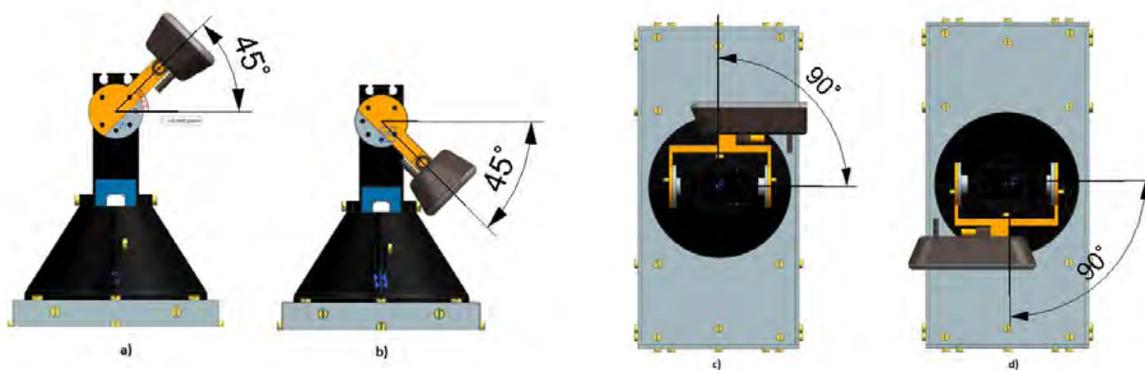


Figura 100. Movimiento angular de la cabeza correspondiente al raquis cervical. a) y b) Amplitud de rotación sobre el eje X. c) y d) rango de rotación sobre el eje Z.

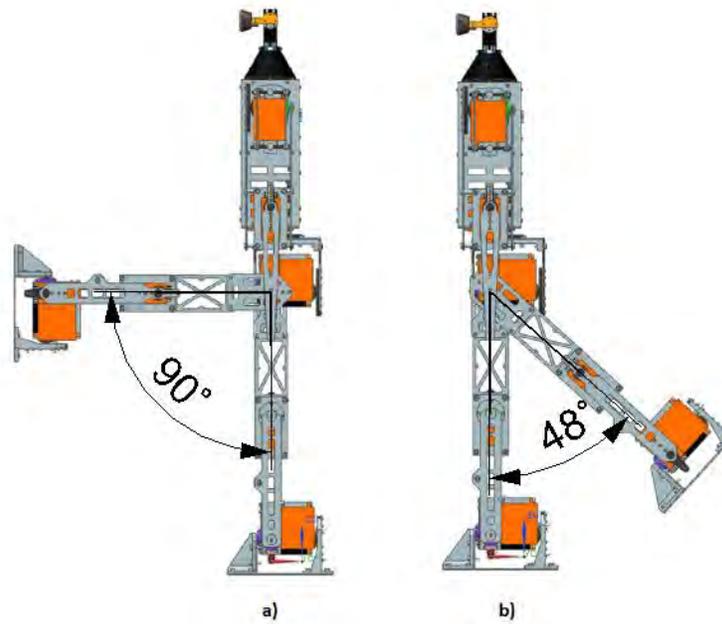


Figura 101. Rotación de la articulación de la cadera en el eje X, a) movimiento de flexión de la articulación de la cadera b) movimiento de extensión sobre el eje X en la articulación. análoga a la coxofemoral humana se considera negativo respecto a la posición de referencia.

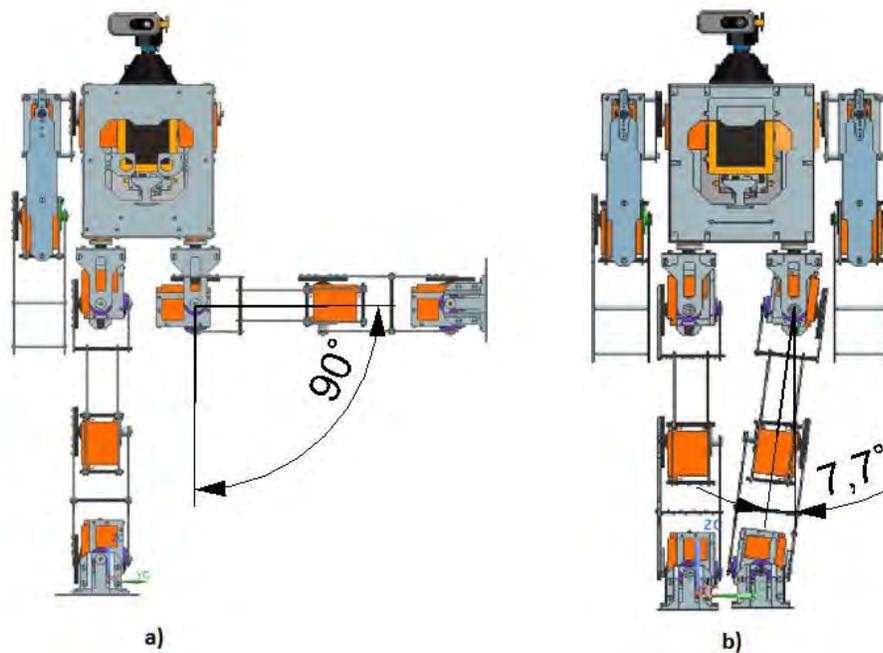


Figura 102. Movimientos de las articulaciones coxofemorales sobre el eje Y a) movimiento de abducción b) movimiento de aducción el cual fue condicionado por la otra pierna puesto que restringe su desplazamiento.

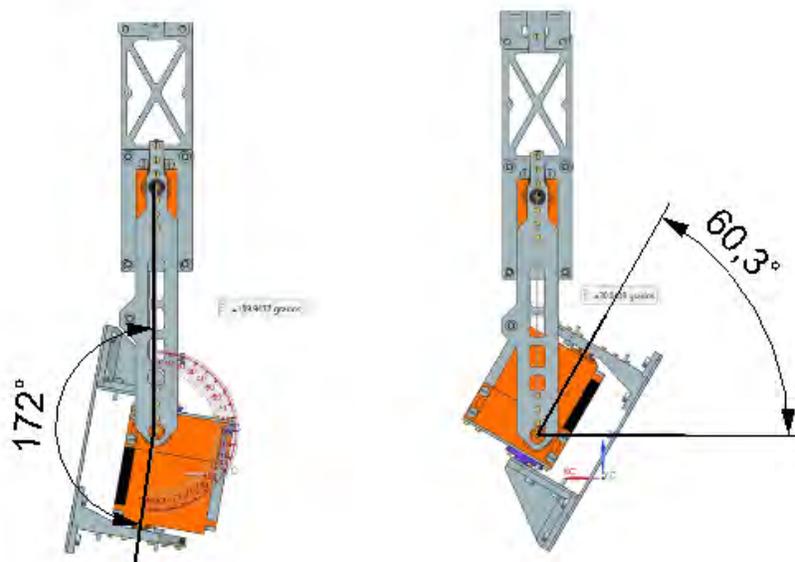


Figura 103. Movimiento de flexo-extensión del tobillo sobre el eje X.

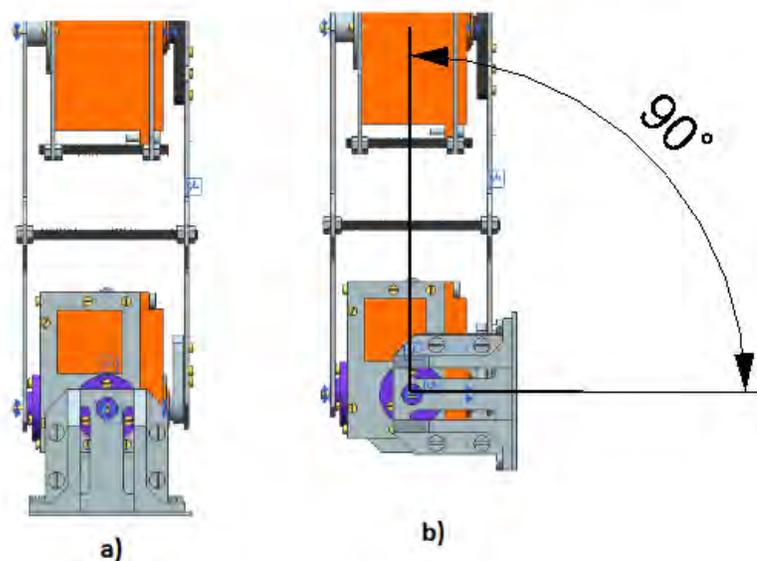


Figura 104. Rotación del pie sobre el eje Y. a) se indica la posición de referencia y en b) se muestra el ángulo máximo condicionado por la morfología del robot.

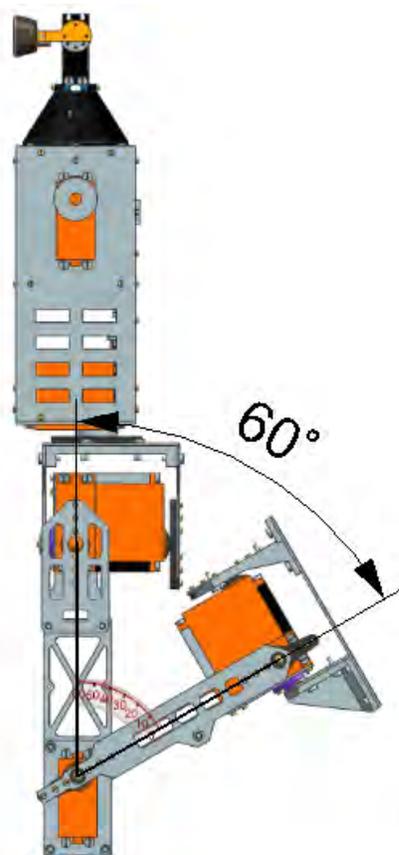
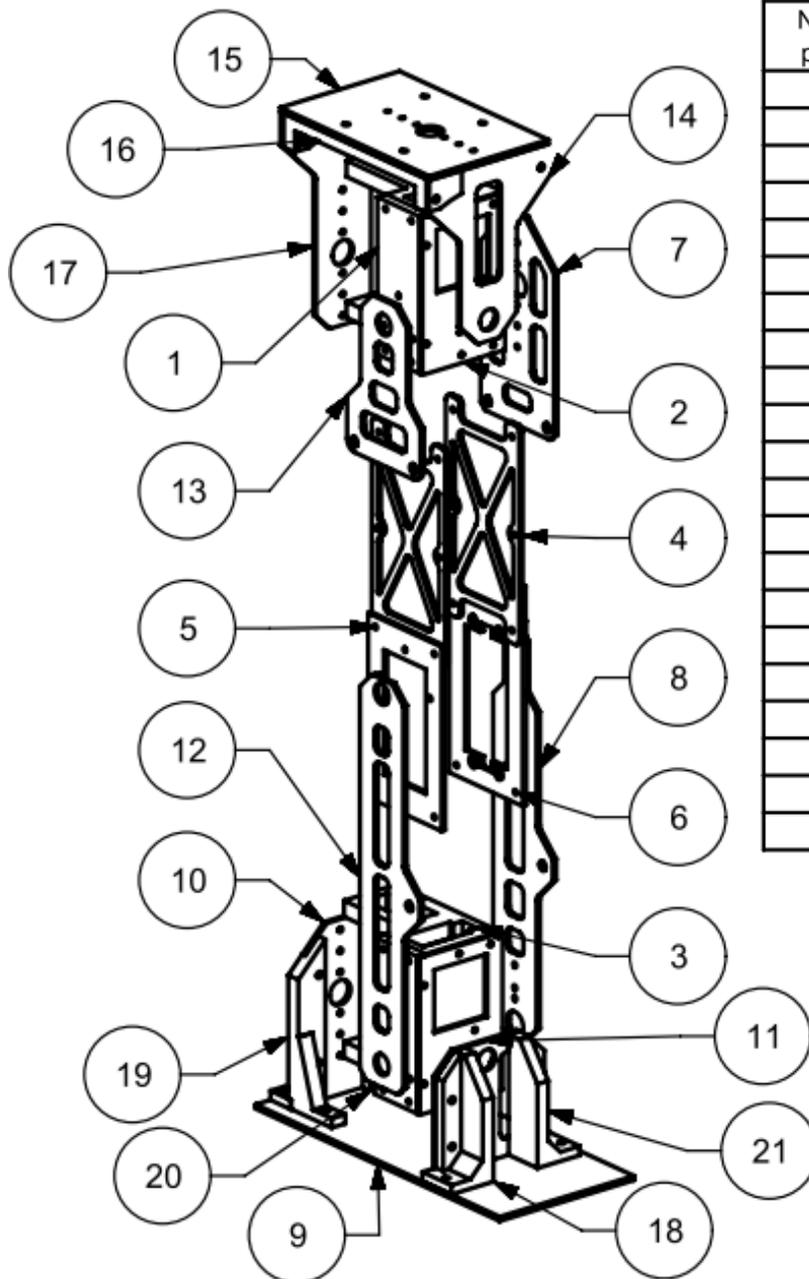


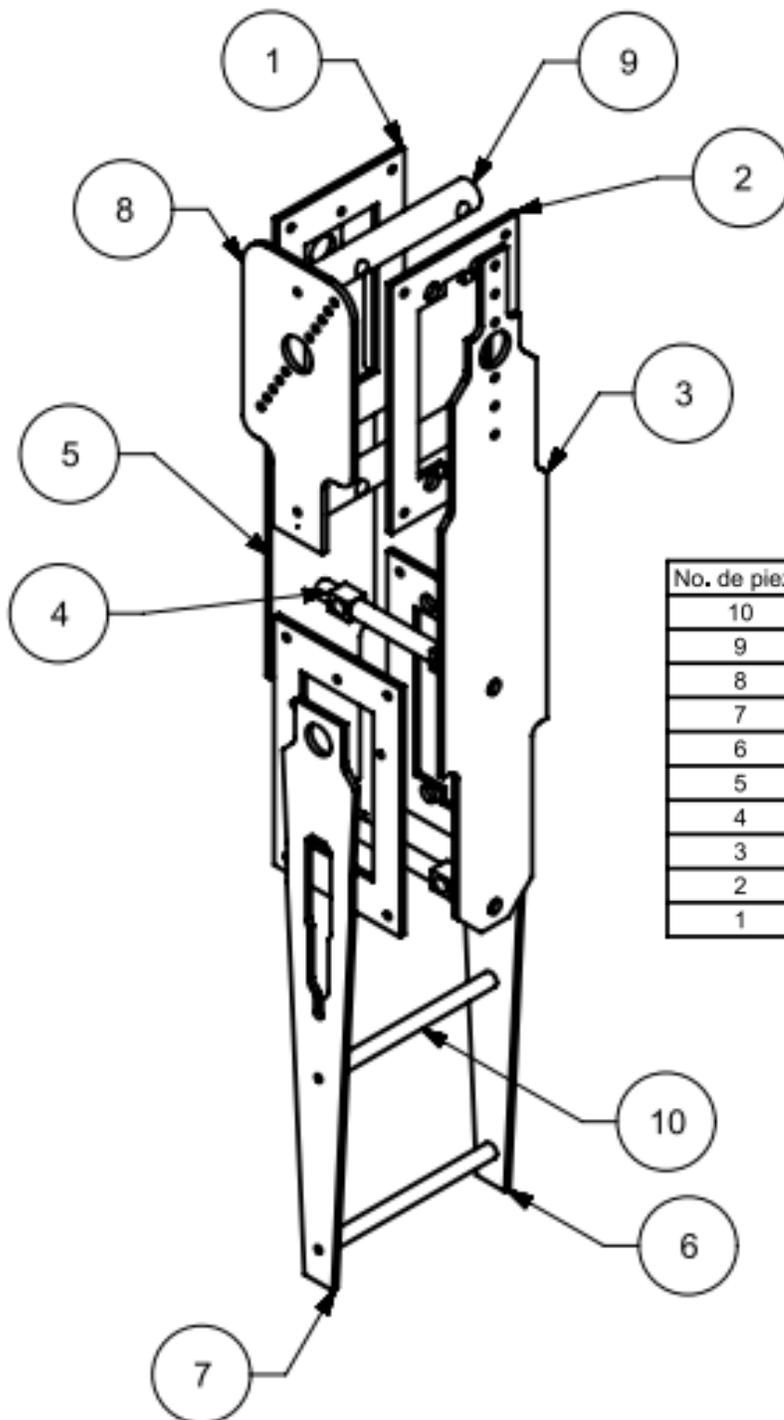
Figura 105. Movimiento de flexión. Se observa el desplazamiento angular máximo de la rodilla sobre el eje X.

## Componentes estructurales de la pierna.



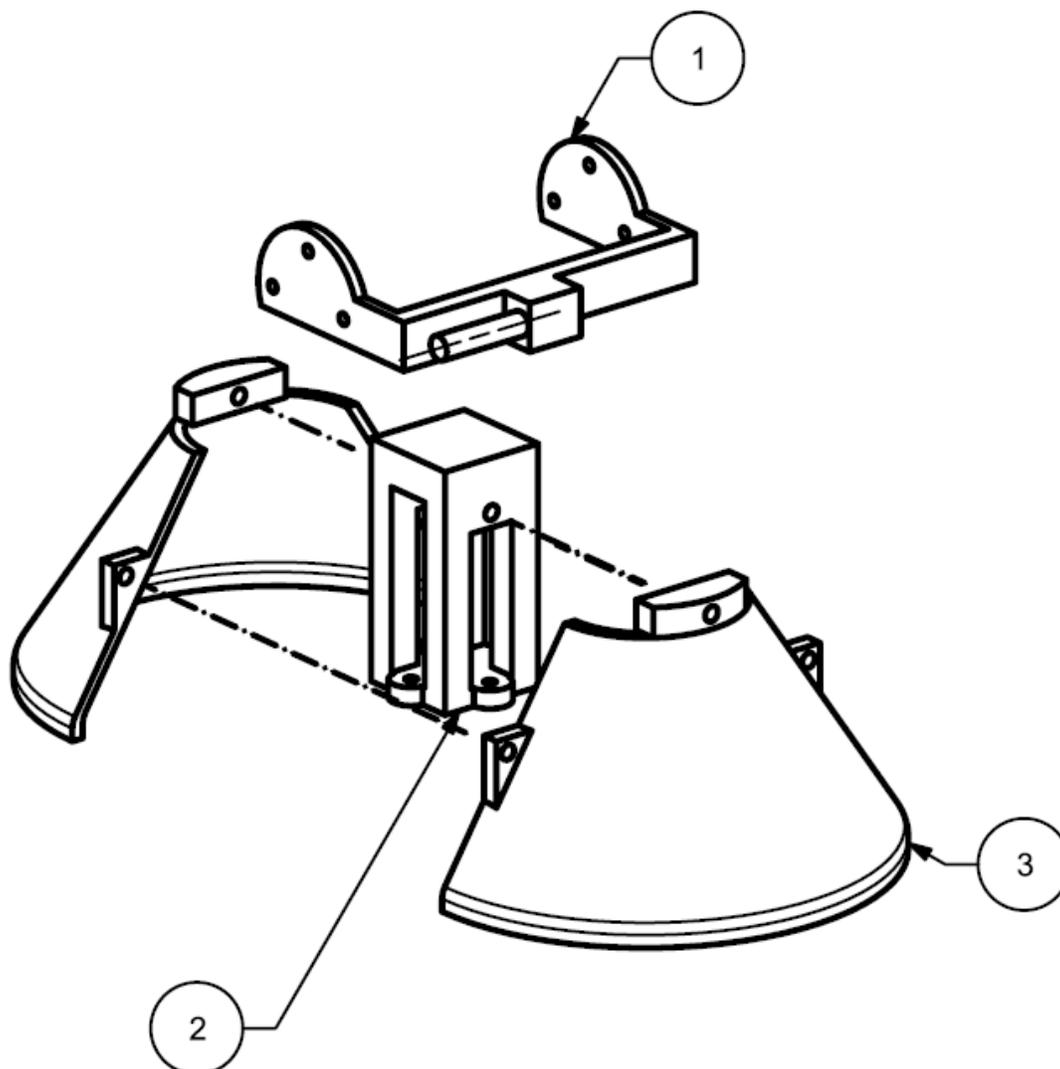
No de pieza	Nombre de la pieza	Cantidad
21	MIRROR_PIE1_0	1
20	MIRROR_Z15_0	1
19	Z15	1
18	PIE1	1
17	Z14	1
16	Z13	2
15	Z12	1
14	Z11	1
13	Z1B	1
12	Z8OP	1
11	Z7	1
10	Z6	1
9	Z3	1
8	Z2OP	1
7	Z1	1
6	LAMINA1	1
5	LAMINA3	1
4	GEMELO	2
3	PLACAA	4
2	PLACAC	2
1	PLACAD	2

## Componentes estructurales del brazo.



No. de pieza	Nombre de la pieza	Cantidad
10	W	2
9	P7	2
8	P6	1
7	P5OP	1
6	P4OP	1
5	P3OP	1
4	P2	2
3	P1OP	1
2	LAMINA1	2
1	LAMINA3	2

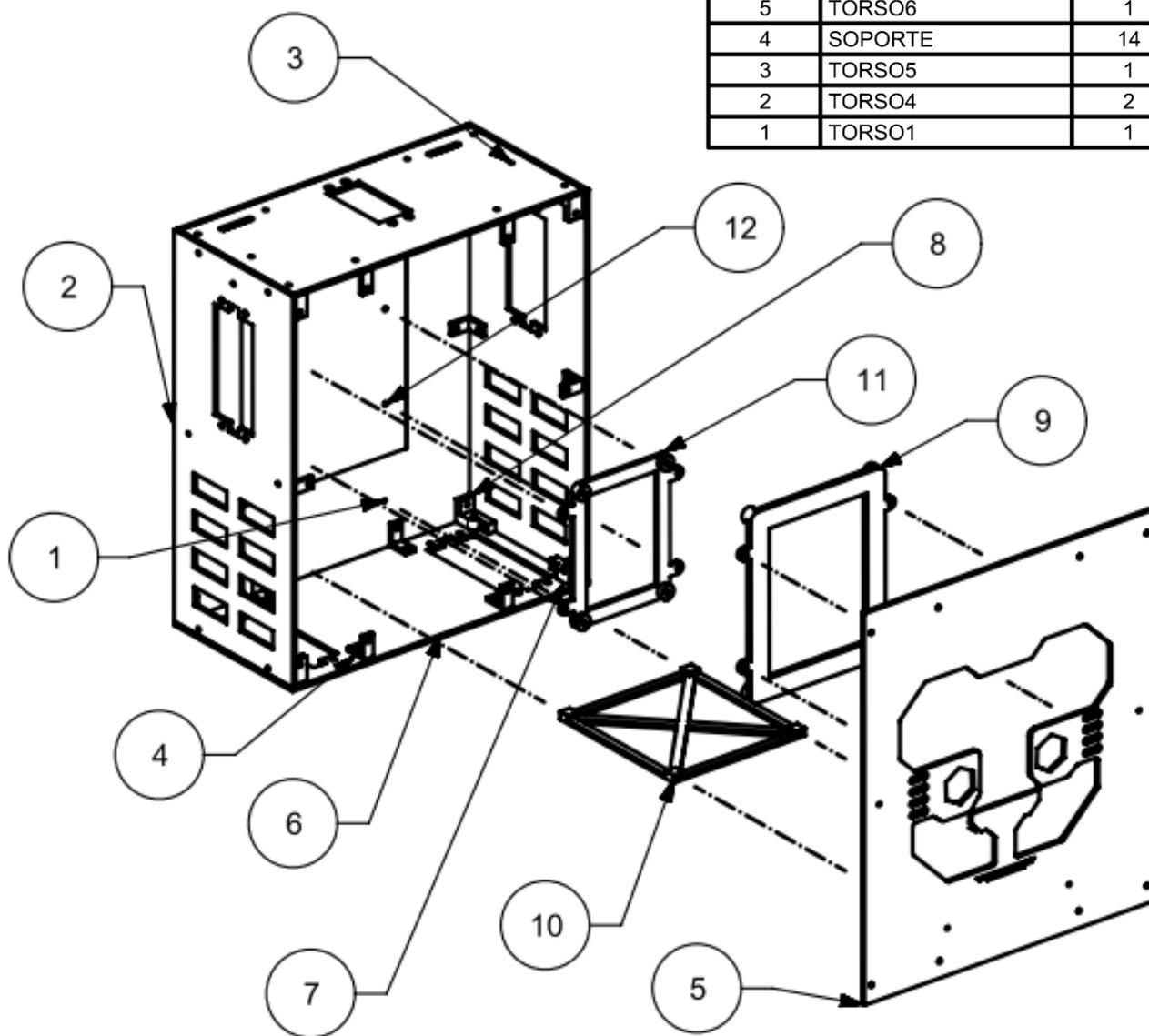
## Componentes estructurales de la cabeza.



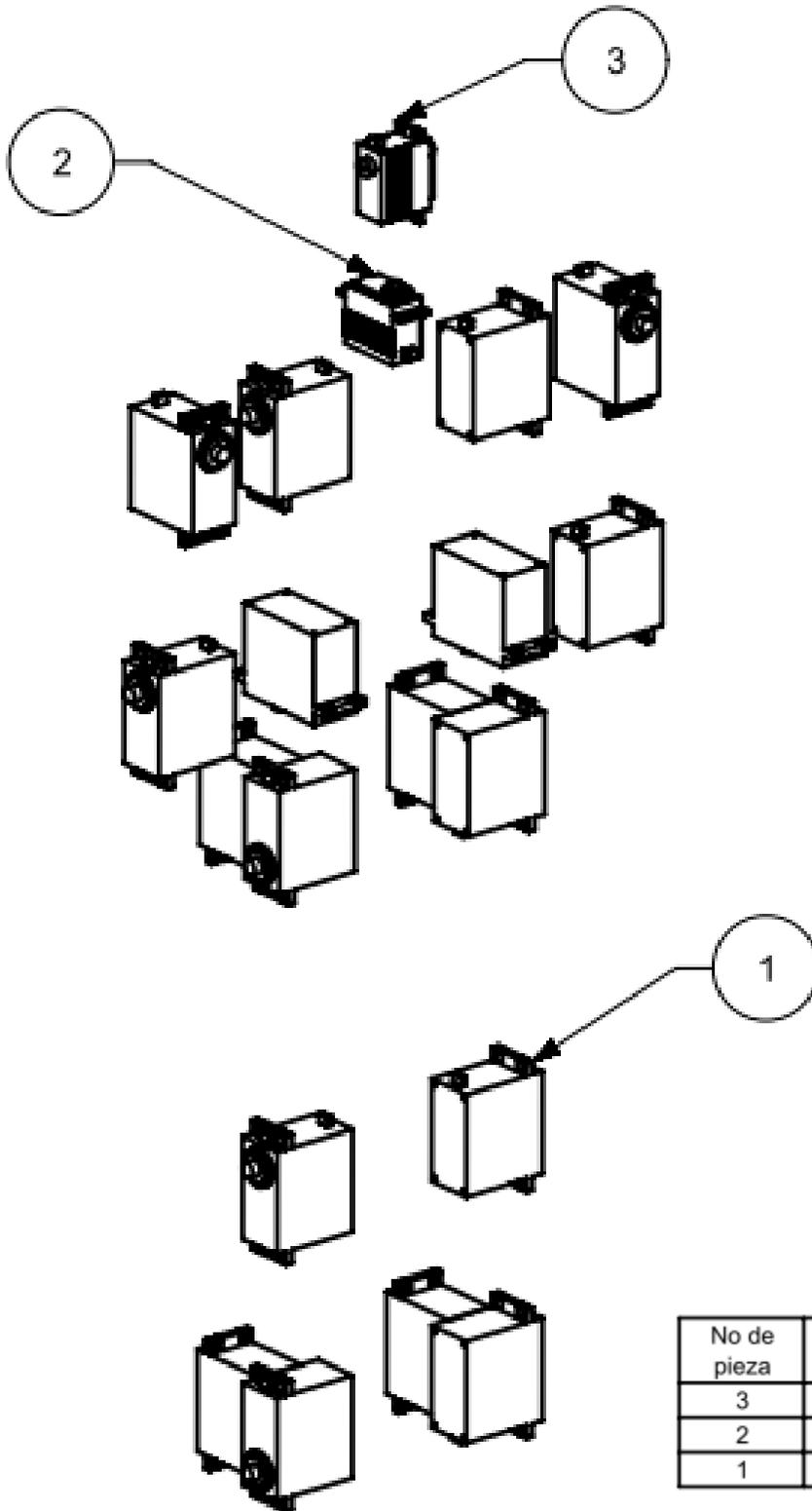
No. de pieza	Nombre de la pieza	Cantidad
3	CUELLOI	2
2	CUELLO1	1
1	CABEZA	1

## Componentes estructurales del torso.

No de pieza	Nombre de la pieza	Cantidad
12	TAPATORSO	1
11	SOPORTESSC	1
10	BASES-BATERIAS	1
9	SOPORTERAXDA	1
8	MIRROR_ESQUINERO_0	4
7	ESQUINERO	4
6	TORSO3	1
5	TORSO6	1
4	SOPORTE	14
3	TORSO5	1
2	TORSO4	2
1	TORSO1	1

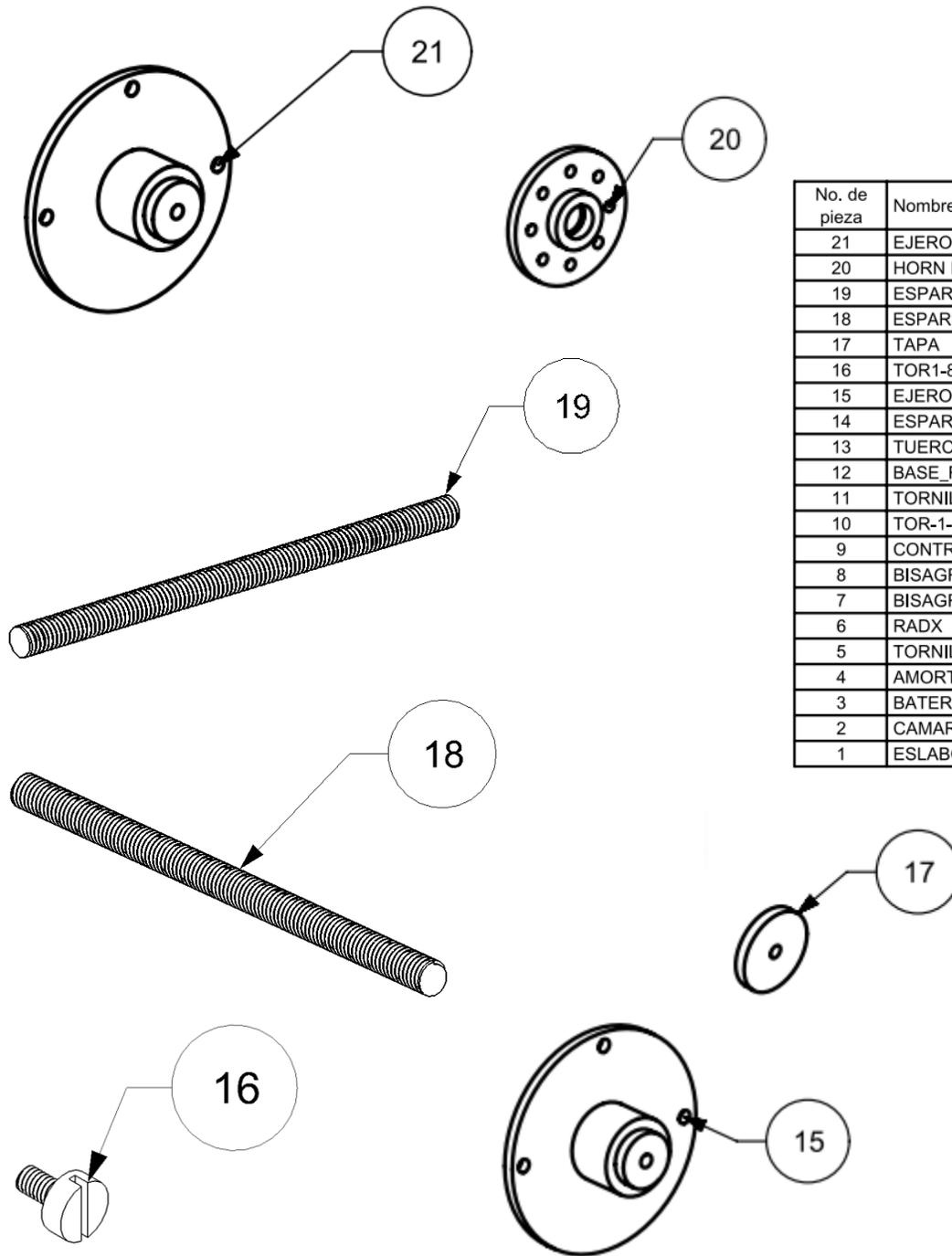


## Actuadores.



No de pieza	Nombre de la pieza	Cantidad
3	HSR-5990TG	1
2	HSR-5990TG UN EJE	1
1	SERVO_PAR	18

Otros componenetes.



No. de pieza	Nombre de la pieza	Cantidad
21	EJERODILLA2	4
20	HORN HSR 5990	3
19	ESPARRAGO 2	4
18	ESPARRAGOPIERNA	2
17	TAPA	14
16	TOR1-8X1-4	20
15	EJERODILLA3	2
14	ESPARRAGO	24
13	TUERCA	106
12	BASE_RODAMIENTO	8
11	TORNILLO 2.5_PAR	270
10	TOR-1-8X1-2	110
9	CONTROLADORSSC	1
8	BISAGRA1	1
7	BISAGRA	1
6	RADX	1
5	TORNILLO5-32	4
4	AMORTGUADOR	4
3	BATERIA LIPO	2
2	CAMARALOGITECH	1
1	ESLABON_PAR	16

