



Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Tesis para obtener el título de

Ingeniero en Mecatrónica.

”Diseño y construcción de una plataforma robótica humanoide antropomórfica a escala 4:1.”

Presenta: C. Oliver Rodríguez Núñez.
Director de tesis: Dr. Felipe Trujillo Romero.

Dedicado a mis padres, hermana y amigos.

Índice general

1. Introducción.	1
1.1. Estado del arte.	4
1.2. Planteamiento del problema.	8
1.3. Justificación.	9
1.4. Hipótesis.	10
1.5. Objetivos.	10
1.5.1. Generales.	10
1.5.2. Particulares.	11
2. Metodología de diseño.	13
2.1. Descripción de la metodología de diseño adecuada a las necesidades del proyecto acerca del desarrollo del robot humanoide.	16
2.1.1. Primer Etapa: Definición del problema.	16
2.1.2. Segunda etapa: Desarrollo del diseño mecánico.	17
2.2. Aplicación de la metodología al proyecto humanoide Suchí.	24
2.3. Diseño del sistema humanoide	26
2.3.1. Estudio de posiciones desfavorables.	27
2.3.2. Diseño preliminar.	27
3. Diseño a detalle.	31
3.1. Cálculo de sollicitaciones mecánicas.	31
3.2. Elementos del sistema robótico humanoide.	31
3.3. Planta de pie segmentado.	35
3.4. Validación mediante una Co-simulación en ADAMS-MATLAB/SIMULINK.	36
4. Configuración cinemática.	41
4.1. Cinemática de los robots humanoides.	41
4.2. Generación de trayectorias para el andar.	58
5. Evolución mecánica.	63
5.1. Renderizado, ensamble y piezas del humanoide Suchí.	63
5.1.1. Maquinado y ensamble del humanoide Suchí.	65

6. Resultados.	71
6.1. Simulaciones en SOLIDWORKS Motion.	71
6.2. Resultados de las co-simulaciones ADAMS-MATLAB.	80
6.3. Pruebas en la plataforma real.	85
7. Conclusiones.	89

Índice de figuras

1.1.	Un ciclo de la marcha normal: Fase de apoyo.	3
1.2.	Un ciclo de la marcha normal: Fase de oscilación.	3
1.3.	DarwinOP.	5
1.4.	a) Robonova (Izquierda). b)Robot HOAP-1 (Centro). c)Robot KHR-2 (Derecha).	5
1.5.	Robot H6. a)Uniones del modelo. b) El robot H6 con el pie segmentado.	6
1.6.	a)Robot HR-2(izquierda), b)TWNHR-IV(derecha).	7
1.7.	a)Grados de libertad de ROBIAN , b)Planos de diseño de ROBIAN, c)Estructura construida de ROBIAN.	7
2.1.	Etapa I. Definición de tareas prioritarias.	17
2.2.	Etapa II. Desarrollo del diseño mecánico.	18
2.3.	Descripción del diseño conceptual.	25
2.4.	Proporciones antropométricas de ser humano escaladas 4:1.	26
2.5.	Primer modelo CAD erogado del dimensionado antropométrico.	30
3.1.	servomotor Dynamixel AX-12+ utilizado.	32
3.2.	Disposición de terminales del servomotor AX-12+.	32
3.3.	Circuito interfaz entre el microcontrolador y el servomotor.	33
3.4.	Disposición de las posiciones válidas.	33
3.5.	Tarjeta de control, Arduino UNO.	34
3.6.	Se muestran las medidas de interés un pie humano para el interés del proyecto. (Imagen editada a partir de la "Figure 1" del artículo (Kwon y Park.)).	36
3.7.	Bloques que representan el modelo generado por MSC ADAMS.	37
3.8.	Modelo dinámico a bloques del sistema.	38
3.9.	Bloques para la generación de trayectorias.	39
3.10.	Bloques del la cinemática inversa de la pierna izquierda.	39
3.11.	Bloques del la cinemática inversa de la pierna derecha.	40
3.12.	Bloques del la cinemática inversa de los brazos.	40
4.1.	Ubicación de las Juntas y sus variables designadas.	43
4.2.	Marcos referenciales de la pelvis y las cadenas cinemáticas.	44
4.3.	Marcos referenciales de las uniones.	45
4.4.	Longitudes de los eslabones y sus variables designadas.	47

4.5. Ubicación de las articulaciones y sus variables designadas.	48
4.6. Ubicación de los eslabones y sus variables designadas (perspectiva lateral).	49
4.7. Ubicación de las variables designadas para simplificar el desarrollo de la cinemática inversa.	50
4.8. Ubicación de los eslabones y sus variables designadas.	51
4.9. Cinemática inversa de la pierna derecha: marcos referenciales y vectores resultantes que indican la distancia entre ellos.	52
4.10. Pierna derecha: Vista frontal.	53
4.11. Ubicación de los eslabones y sus variables designadas para el análisis de la cinemática inversa.	54
4.12. Ubicación de los eslabones y sus variables designadas para el análisis de la cinemática inversa.	55
4.13. Ubicación de los eslabones y sus variables designadas para el análisis de la cinemática inversa.	56
4.14. Parámetros para las trayectorias de la cadera y del pie libre.	59
4.15. Rotación de las piernas en el plano frontal.	60
5.1. Render de Suchí en cuerpo entero.	63
5.2. Render de torso del sistema humanoide.	64
5.3. Render de: a) Brazo derecho del sistema humanoide, b) Brazo izquierdo.	64
5.4. Render de: a) Pierna derecha del sistema humanoide, b) Pierna izquierda del sistema humanoide.	65
5.5. Render de la parte superior e inferior del sistema humanoide Suchí, indicando sus GDL.	66
5.6. Centro de gravedad del sistema humanoide Suchí.	66
5.7. a) Cortador de carburo vertical de bola 3/32, b) Cortador de carburo vertical plano de 1/8.	67
5.8. Placa de aluminio montada sobre la máquina CNC.	67
5.9. a) Máquina CNC en marcha. b) Máquina CNC puesta en marcha ejecutando los primeros cortes de contorno.	67
5.10. a) Estructura de tren inferior ensamblada. b) Robot humanoide Suchí con actuadores energizados y en equilibrio estable.	68
5.11. Pie segmentado para incorporar en Suchí.	68
6.1. Posición desfavorable del inciso (a) descrita en el apartado 2.1.2.	72
6.2. Posición desfavorable para subir escalón.	73
6.3. Posición desfavorable inclinado en todo su conjunto.	74
6.4. Posición desfavorable en una sola pierna.	75
6.5. Posición en sentadilla.	76
6.6. Posición alzando el brazo derecho.	76
6.7. Torque requerido al servomotor th12 alzando una tasa con el brazo derecho: a) Con un peso soportador por el servomotor de 520 gramos. b) Con un peso de 700 gramos.	77
6.8. Posición alzando una tasa con el brazo derecho.	77
6.9. Valores en radianes para el actuador θ_{11}	78

6.10. Valores en radianes para el actuador θ_{13}	78
6.11. Valores en radianes para el actuador θ_{15}	79
6.12. Valores para la trayectoria de la pelvis en el eje X del plano sagital.	80
6.13. Valores en radianes para el actuador $\theta_{9,10}$	81
6.14. Valores en radianes para el actuador $\theta_{17,18}$	81
6.15. Suchí ejecutando una sentadilla.	82
6.16. Suchí erguido en ventana de co-simulación.	82
6.17. Cinco instantes en el movimiento del sistema robótico humanoide para ejecutar de forma fallida una sentadilla usando los brazos como contrapeso para mantener el centro de masa en su centro geométrico de apoyo.	83
6.18. Cuatro instantes en los que el sistema robótico humanoide ejecuta exitosamente una sentadilla usando los brazos como contrapeso para mantener el centro de masa en su centro geométrico de apoyo.	83
6.19. Gráfico que describe la componente angular pitch del acelerómetro ubicado en la pelvis al realizar la sentadilla.	84
6.20. Fases de movimiento de la unión pasiva en simulación (SOLIDWORKS MOTION).	85
6.21. Cinco instantes en el desplazamiento de las uniones que conforman el tren inferior del sistema robótico humanoide.	85
6.22. Limite del balanceo en el plano frontal.	86
6.23. Se muestran las medidas del pie humano del humanoide Suchí.	87
6.24. Fases de movimiento de la unión pasiva en la plataforma real.	87
7.1. Suchí con cabeza montada.	91

Índice de tablas

2.1. Ángulos de movilidad de Suchí comparados con los del ser humano. (K., H. y M) . .	29
7.1. Presupuesto de Suchí.	90
7.2. Comparativa de precios.	91

Capítulo 1

Introducción.

Con la revolución industrial los seres humanos iniciaron el desarrollo de máquinas complejas para facilitar la realización de los trabajos arduos, difíciles y peligrosos. Sus primeros usos fueron en tareas que requerían esfuerzos físicos y mucho tiempo para completarse.

El desarrollo de dispositivos electrónicos capaces de procesar información, permitió la automatización de procesos de producción y una optimización en el procesamiento de información, surgiendo nuevas líneas de investigación como lo es la robótica.

La robótica se puede definir como la rama de la tecnología que estudia todos los aspectos involucrados en la construcción y operación de robots(E.). El término robot fue utilizado por primera vez en 1921, por el escritor Checo Karel Capek (1890-1938) en su obra (R.U.R) *Rossum's Universal Robot* y proviene de la palabra eslava *robota* que hace referencia a trabajo forzado (K. y D.).

El estudio de la robótica ha tenido un amplio crecimiento en los últimos años, llevando al hombre a construir máquinas capaces de realizar distintas tareas repetitivas o con cierto grado de complejidad de manera automática.

Los avances en ciencia y tecnología han permitido el desarrollo de la robótica aplicada a diversos aspectos en el ámbito social e industrial, en los últimos años, sin embargo, es gracias a las necesidades de la industria, milicia y del entretenimiento que la robótica ha tenido su esplendor. Hoy en día, en el ámbito académico e industrial las instituciones se esfuerzan por ofrecer robots que asistan a los hogares, oficinas, talleres, englobándose estos en lo que se denomina robótica de servicio. Para su fácil adaptación al entorno productivo, es viable que este tipo de robots cuenten con morfología humana.

A estos robots que operan fuera de la industria se les conoce como robots de servicio. La IFR (Federación Internacional de Robótica) define un robot de servicio como “*aquel que opera de manera semi autónoma o completamente autónoma, y realiza servicios útiles para el bienestar de las personas excluyendo las operaciones de fabricación*”. Este tipo de robots pueden, a su vez, dividirse en robots de servicio personales y robots de servicio profesionales, dependiendo de su función y uso (of Robotics).

El enfoque en la creación de robots de servicio se ha incrementado considerablemente en los últimos años permitiendo la adaptación de máquinas a entornos diseñados para uso humano. Según datos de la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe, Comisión Económica de las N.U. para Europa), el valor estimado de los robots de servicio personales de entretenimiento

vendidos en 2011 fue alrededor de 538 y para robots personales profesionales de investigación de 744 millones de dólares (Executive Summary of World Robotics 2011 Service Robots.).

La estructura mecánica de los robots de servicio puede llegar a ser muy diferente de un robot a otro: pueden ser móviles, semi fijos, y fijos; pueden implementar locomoción a base de ruedas u orugas, pueden ser submarinos, bípedos e incluso voladores. Recientemente los robots humanoides bípedos han tenido un auge importante debido a que presentan ventajas significativas con respecto a los robots a ruedas u orugas entre las cuales se pueden encontrar (M):

- **Movilidad:** La posibilidad de cambiar de dirección sobre su eje principal de cuerpo moviendo sus apoyos en movilidad. Pueden girar sobre los ejes principales de su cuerpo sin la necesidad de levantar las patas apoyadas con solo mover sus articulaciones.
- **Superación de obstáculos:** Un robot con patas puede superar obstáculos a baja altura en relación a su cuerpo.
- **Suspensión activa:** Posee suspensión por adaptación por la adaptación mediante la variación de la altura de su cuerpo con la posición de sus patas a un terreno irregular.

Los avances logrados en la investigación robótica humanoide en los últimos años han sido notables. Las demostraciones de trabajo realizadas con sistemas antropomórficos, así como sofisticadas habilidades en su movilidad están creando una nueva generación de robots autónomos diseñados para cooperar e interactuar con los seres humanos. (K. y col., “Development of humanoid robot HRP-3P”) (K. y col., “Integrated motion control for walking, jumping and running on a small bipedal entertainment robot”) (Y. y col., “The intelligent ASIMO: system overview and integration”).

En la construcción de robots de servicio, enfocados en la morfología humanoide surge la necesidad del desarrollo de un sistema que asemeje de forma natural, óptima, el comportamiento y movimientos del ser humano con el fin de promover las investigaciones enfocadas al control de dicho sistema aprovechando las virtudes del andar humano. Con el fin de obtener un mínimo grado de error, en sus tareas asignadas para que posteriormente se convierta en un sistema autónomo encaminado en el desarrollo y la especialización en diversas tareas asignadas. Con esto se lograría la sustitución de mano de obra humana, o realización de operaciones de alto riesgo, que requieran el manejo de herramientas con diseño para fisionomías humanas.

En la actualidad el desarrollo e investigación de sistemas humanoides se centran más en conseguir una locomoción bípeda, que en la cognición de este sistema, dando origen a muchas líneas de investigación para poder obtener un sistema estable y adaptable a su entorno, que de igual forma pretende imitar al andar natural humano.

Han surgido diversas metodologías de desarrollo de prototipos orientados principalmente a la investigación así como a la robótica de servicio. En el ámbito de la investigación se trabaja con mecanismos a escala, puesto que es una forma económica de tener acceso a una plataforma de desarrollo que cumpla con los requerimientos antropométricos para poder implementar técnicas de control de estabilidad.

Una de esas líneas de investigación ha sido orientada hacia el creciente interés en la funcionalidad del pie en la marcha normal humana. A diferencia de los métodos existentes que representan

el pie como una sola barra rígida, se han estudiado modelos multi-segmentados de pie para evaluar los efectos de este tipo de estructuras sobre la marcha humana para aplicaciones clínicas de rehabilitación (M. y M) en el andar de adolescentes (Q., Y. y L.) y niños (Q. y col.).

Los resultados muestran que el modelo de pie segmentado con una articulación rotacional en el plano sagital de los metatarsianos (M.) tiene varias ventajas en comparación con la estructura con modelo de pie rígido, las siguientes características son notables: la velocidad de marcha, la amplitud del ángulo de la articulación, el cambio en la velocidad angular y la energía de salida. Además, los estudios biomecánicos realizados sobre extremidades inferiores de diez cadáveres humanos (Okita. y col.), indican (mediante la comparación de sistemas simulados y reales) que el pie humano no puede ser considerado como un único cuerpo rígido sin movimiento intrínseco.

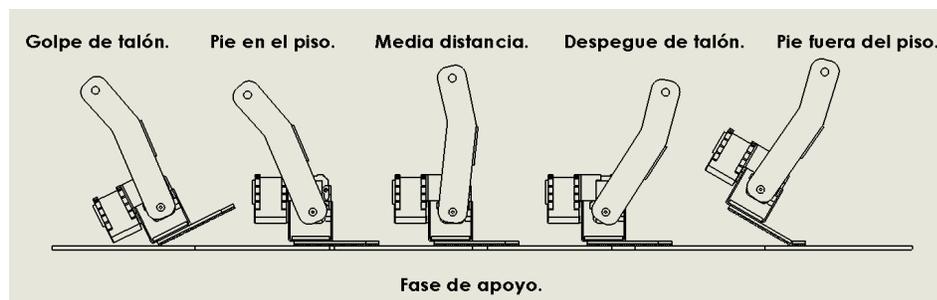


Figura 1.1: Un ciclo de la marcha normal: Fase de apoyo.

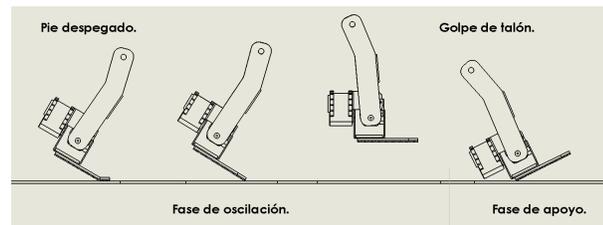


Figura 1.2: Un ciclo de la marcha normal: Fase de oscilación.

El andar normal con el pie humano es un patrón cíclico de los movimientos corporales que se repite una y otra vez paso a paso. Cada ciclo de la marcha se inicia con golpe de talón (SA) cuando el talón toca el suelo, y termina con el siguiente toque (SA) de la misma pierna. Los cuatro instantes importantes en cada ciclo son: Golpe de talón (HS), Pie en el piso (FF), Talón despegado (HO) y Pie fuera del piso (TO). Cada ciclo puede dividirse en dos fases principales: la fase de apoyo (veasé 1.1) y la fase de oscilación (veasé 1.2) (T, J y F.). La fase de apoyo comienza en el momento de (SA) y termina en el momento de despegue de los dedos (TO) cuando la parte delantera del pie empuja fuera del suelo. La fase de impulso comienza en el momento (TO) y termina en la próxima (SA). La fase de apoyo ocupa el 60 % del ciclo de la marcha e incluye cuatro sub fases: 1) (HS) a Pie en el piso (FF); 2) (FF) de Media distancia (MS); 3) (MS) en Talón despegado. (HO); 4) (HO) a (TO).

1.1. Estado del arte.

Desde la década de 1980 se han construido máquinas de fisionomía similar a los humanos; las cuáles se tornaron año tras año mas sofisticadas. Después de años de investigación y desarrollo, los primeros robots humanoides hicieron su aparición en la década de 1990. La construcción y desarrollo de robots de servicio, es un gran reto tecnológico, pues deben de cubrir en gran medida las necesidades de trabajo o investigación, que se les exija, volviéndolos cada vez más versátiles. Son muchos los proyectos e investigaciones que se están desarrollando actualmente a nivel mundial y se agranda la lista si se toman en cuenta los desarrollados en años atrás en el tiempo. Por tal motivo se tratará de resumir mencionando los principales proyectos con mayor trascendencia desde los 90's hasta la fecha que se han desarrollado a nivel mundial y nacional.

Se iniciará esta revisión desde un sistema robótico actual. El robot HRP-4C (K. y col., "Cybernetic human HRP-4C") el cual fue mostrado por primera vez al público en marzo de 2009. El principal uso de este robot era destinado al entretenimiento tal como actuar como maestro de ceremonias en un evento o como modelo en un desfile de modas. HRP-4C ya había sido utilizado en este tipo de eventos, en un esfuerzo para aclarar su utilidad para fines de entretenimiento. El enfoque a este sector ocasionó la necesidad de implementar la capacidad de tener un andar bípedo mas natural lo que dio lugar las mejoras de hardware principalmente la adopción de un nuevo pie con una articulación segmentando los dedos del pie ("Hardware improvement of Cybernetic Human HRP-4C for entertainment use.").

La plataforma robótica DARWIN-OP (Fig.1.3)(Dynamic Anthropomorphic Robot with Intelligence Open Platform) (T. y col.) es un robot humanoide de la empresa Robotis. Cuenta con diversas características como lo son: 1 Giróscopo de 3 ejes, 1 acelerómetro de 3 ejes, 2 sensores ópticos, conexión ethernet, conexión WiFi, micrófonos, cámara de alta definición y canal externo de audio. Con 45 cm de altura, y un procesador Intel Atom Z530 a 1.6 GHz con 4 GB de memoria flash integrada. Se integra de 20 servomotores MX-28 marca Dynamixel. Como sistema de control cuenta con dos tarjetas: 1 PC y 1 CM-730, la primera se encarga de todas las interfaces con las que cuenta el robot, mientras la segunda, del control de los motores servos.

La empresa Hitec construyó el robot Robonova. Esta plataforma mide 40 cm de altura, con un peso aproximado de 2.50kg y cuenta con 16 grados de libertad: 3 en cada brazo y 5 en cada pierna. La electrónica que lleva consigo permite conectarle diversos dispositivos como giroscopios y sensores de ultrasonidos, además cuenta con el software necesario para su programación y la realización de pruebas. Es una de las primeras opciones para las escuelas en la enseñanza de robótica humanoide, gracias a su versatilidad y flexibilidad. La Figura (1.4a) muestra al robot Robonova.

La compañía Fujitsu también incursionó en el área de humanoides en el año 2003 con el HOAP-1 (Miniature Humanoid Robot HOAP-1.) (véase la figura 1.4b) por sus siglas (Humanoid Open Architecture Platform), tiene la capacidad de aprendizaje provisto de una red neuronal para el control de locomoción evitando así la modelación cinemática, dinámica o la generación de trayectorias estables con el uso de criterios complejos, además de utilizar RTLinux con un sistema operativo en tiempo real. Tiene un peso de 6 Kg. y una altura de 48 cm con una velocidad de caminata a 2 km/h. este robot recibió el premio de innovación tecnológica de la sociedad de robótica japonesa. Posee 20 GDL.

Otro desarrollo es el robot KHR-2 (Kim, Park y Oh) Es construido por la empresa japonesa

KONDO y que tiene como predecesor al KHR-1 (Ill-W. y col.). Su altura es de 120cm y pesa 56kg. Los 47 GDL que posee están distribuidos de la siguiente manera: 6 en la cabeza, 8 en cada brazo, 1 en el tronco y 12 en cada pierna. Al igual que el Robonova (Robonova 1 el robot humanoide para todos los públicos.), es muy popular en las escuelas de robótica humanoide, pues permite agregarle diversos sensores conectándolos directamente a su tarjeta electrónica. También, su estructura mecánica permite personalizar el robot agregando diferente piezas. En la Figura (1.4c) se muestra el robot KHR-2.



Figura 1.3: DarwinOP.

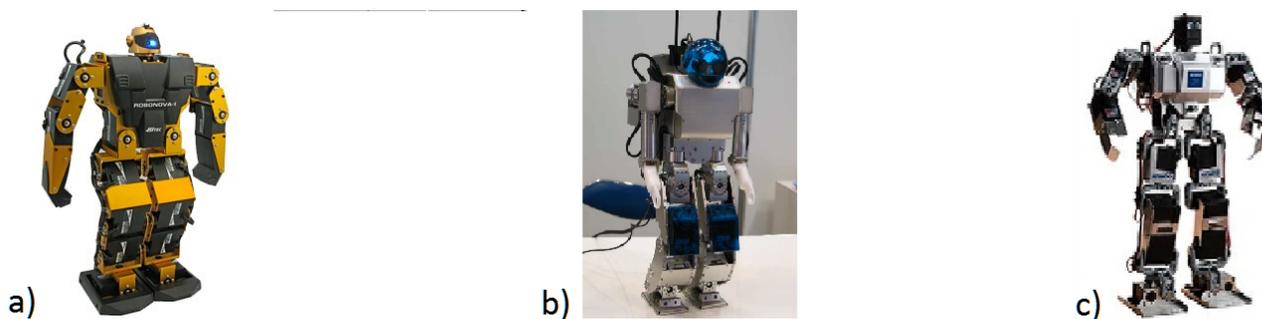


Figura 1.4: a) Robonova (Izquierda). b) Robot HOAP-1 (Centro). c) Robot KHR-2 (Derecha).

En el 2002, la Universidad de Tokyo en su departamento de mecano-informática en conjunto con el laboratorio "Digital Human" (AIST), desarrolla un robot humanoide llamado H6 (véase Fig.1.5b) (K. y col., "Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots"), con características antropométricas en los pies, resaltando las ventajas que representa para la locomoción bípeda el desarrollo de una planta del pie segmentada e integrada en un sistema humanoide de tamaño real. En (figura 1.5a) se muestran las uniones del modelo.

El robot Bunny Bot (J. y col., "BunnyBot: Humanoid Platform for Research and Teaching") fue desarrollado por la Universidad de Plymouth. La plataforma humanoide BunnyBot se ha diseñado

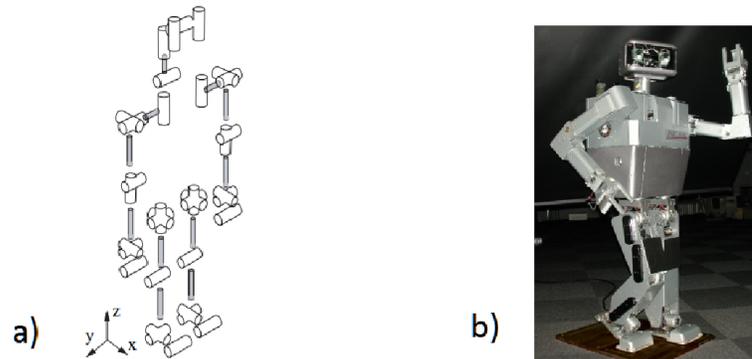


Figura 1.5: Robot H6. a) Uniones del modelo. b) El robot H6 con el pie segmentado.

con tres objetivos principales en mente:

- La creación de una plataforma humanoide asequible.
- Para impulsar la enseñanza e investigación en la universidad
- Para crear una plataforma de la competencia.
- Debido al costo bastante bajo del robot (2,000 Euros) la universidad fue capaz de construir humanoides suficientes para la enseñanza de una sala de clase entera.

Este Bunny-Bot tiene servo motores para mover la cabeza, los ojos y los oídos. Mediante la adición de una boca y de los ojos cejas le es posible producir expresiones faciales. La cabeza es como la forma de un conejo de dibujos animados, de ahí el nombre BunnyBot. La idea fue evitar el problema *uncanny valley* (Mori. y col.). Puesto que las características de dibujos animados y rasgos faciales exagerados son más propensos a ser juzgados dentro de lo amigable (Sarah.) y por tanto, facilitar la interacción humano-robot.

Por su parte Almir Heralic construyó el robot HR-2 (Humanoid Robot HR-2.) en el 2005 en la Universidad Tecnológica de Chalmers en Goteborg, Suecia. Tiene una altura de 30 cm y cuenta con 22 GDL: 2 en la cabeza, 4 en cada brazo y 6 en cada pierna. Para el procesamiento de los algoritmos el robot utiliza una computadora siempre conectada a él por medio de un enlace serial. Esto presenta una ventaja cuando se desarrollan e implementan los algoritmos, pero resta al robot autonomía y movilidad en su ambiente. Para este robot se han desarrollado estrategias de visión e interacción que lo hacen muy completo. Así por ejemplo, es capaz de hablar y su sistema de visión estereoscópico le permite reconocer rostros e identificar si se trata de un hombre o mujer. Otra capacidad es la de imitar a una persona, a la cual le enseña cómo debe mover determinado objeto, acto seguido el robot confirma que ha entendido y realiza el mismo movimiento. La Figura 4.9a muestra el robot HR-2.

El robot TWNHR-IV (C. y col., “Mechanical Desing of Small-Size Humanoid Robot: TWNHR-VI.”) fue construido en la Universidad de Tamkang de la ciudad de Taipei, Taiwan. Mide 46 cm de alto y 25 cm de ancho, con un peso de 3.1 kg. Cuenta con 26 grados de libertad: 2 en la cabeza, 2

en el cuerpo, 4 en cada brazo y 7 en cada pierna. Una característica en su diseño es la utilización de 2 motores para la articulación de la rodilla para mejorar la solidez de la pierna. El robot TWNHR-IV es capaz de mantener el equilibrio cuando camina o cuando está detenido en una superficie en movimiento; esto lo logra con un controlador basado en lógica difusa, que recibe las señales de un acelerómetro de 3 ejes. La Figura 4.9b muestra al robot TWNHR-IV y la configuración de sus 26 GDL.

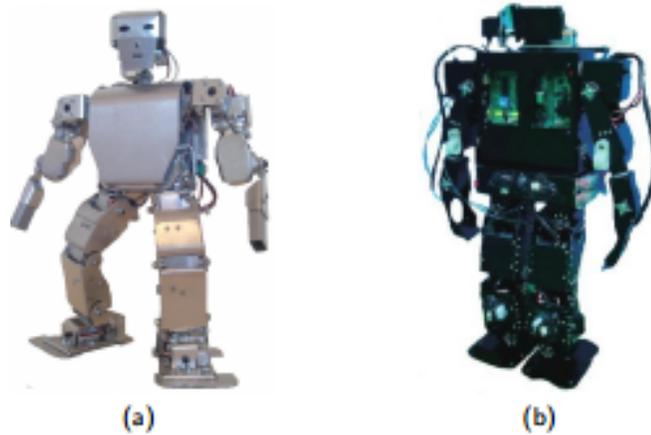


Figura 1.6: a) Robot HR-2(izquierda), b) TWNHR-IV(derecha).

Finalmente se describe la implementación del robot ROBIAN (A. y col.). El cual es un sistema bípedo que incluye uniones pasivas en la planta del pie; implementadas con resortes en torsión para lograr aproximar su marcha a la del ser humano; su diseño se desarrolló en base a estudios biomecánicos de cuerpo humano. En la figura 1.7 se muestran las tres etapas de desarrollo de ROBIAN.

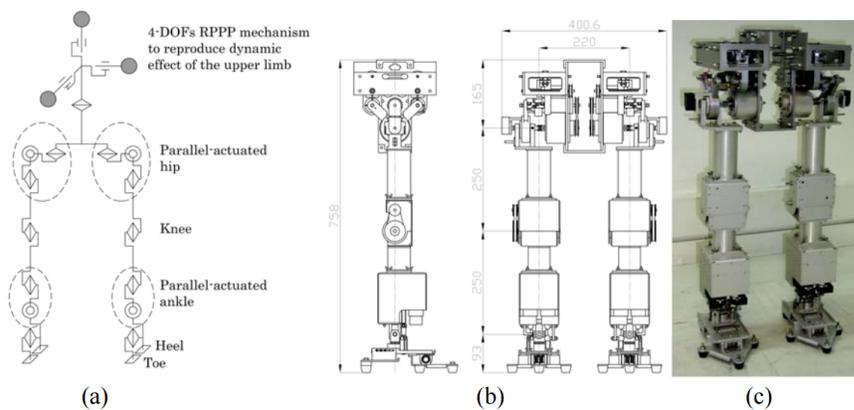


Figura 1.7: a) Grados de libertad de ROBIAN, b) Planos de diseño de ROBIAN, c) Estructura construida de ROBIAN.

1.2. Planteamiento del problema.

En años recientes diversas instituciones académicas con líneas de investigación en la robótica han desarrollado sistemas antropomórficos con novedosas implementaciones enfocadas al desarrollo de mecanismos bípedos para simular la caminata humana con un enfoque funcional. Estos mecanismos se desarrollan principalmente para la ejecutar un andar basado en el punto de momento cero (ZMP) (C y A). A partir de este enfoque se han desarrollado numerosos métodos de control automático para el seguimiento de trayectorias en el plano sagital del andar bípedo, así como para el plano frontal donde se abstrae un modelo de péndulo invertido (D.A., C.A. y Ángeles A.); puesto que facilitan su aplicación ante una mayor estabilidad provista por el sistema.

La caminata humana bípeda realmente es inestable, pero a su vez provee al cuerpo de mayor agilidad, así como de capacidades motoras para alcanzar velocidades relativamente altas (Okita. y col.). Esta característica es muy útil en el desempeño de un sistema humanoide; dotándole de adaptabilidad a diversos entornos y situaciones.

Actualmente la mayoría de humanoides se constituyen con 6 *Grados De Libertad* (GDL) en sus piernas: 3 de la de cadera, 1 de la rodilla y 2 en el tobillo; con ese número de GDL no es posible imitar de forma exacta la marcha humana natural. Por lo tanto, es necesaria la adición de un GDL redundante en cada una de las plantas del pie para poder lograr un movimiento aproximado al de la marcha humana natural.

Debido principalmente a lo comentado en los párrafos anteriores, se plantea el diseño y desarrollo de un sistema humanoide con planta de pie segmentado para ser empleado en líneas de investigación enfocadas al andar bípedo antropométrico natural. El último segmento que conforma el modelo del pie segmentado servirá para distribuir la reacción puntual ejercida sobre la última unión redundante, disminuir el esfuerzo para evitar un desgaste por una fuerza concentrada en la unión del pie segmentado, así como para proporcionar de un impulso en la liberación de energía potencial almacenada en el resorte de torsión ubicado en la unión que une al último segmento pasivo (para conformar la planta del pie). Este diseño se plantea para las futuras aplicaciones en el desarrollo de algoritmos de locomoción bípeda natural. El diseño antropométrico no contemplará la estructura de las manos (gripper) ni de la cabeza, pero serán tomadas en cuenta las longitudes de los brazos y antebrazos; considerará orificios y especificaciones en la estructura para dar lugar a futuras implementaciones.

Una de las características fundamentales del sistema robótico humanoide a diseñar, será su capacidad de ensamble modular para erogar en un sistema abierto a modificaciones y mejoras por parte del usuario. Por lo cual al no tener manos ni cabeza el usuario podrá adaptar cualquier gripper o herramienta en los extremos finales de los brazos del sistema humanoide; de igual manera para la parte de la cabeza donde se podrá incorporar un sensor o una carcasa más elaborada; lo anterior siempre y cuando sea de proporciones adecuadas al sistema.

Además se pretende que los elementos que conforman al sistema sean los mejores en relación costo/beneficio; para lo cual se buscarán materiales y elementos de bajo costo. A su vez se escalarán las dimensiones antropométricas (T. y G.) del sistema robótico humanoide a una relación 4:1 para obtener un sistema con características necesarias para la investigación.

Partiendo de medidas antropométricas escaladas se iniciará el diseño de un prototipo virtual integrando los elementos mecánicos, electromecánicos que conformarán a dicho sistema. Lo mencionado anteriormente se llevará acabo mediante el empleo de una metodología para el desarrollo de

robots humanoides (M).

Se contempla el uso de software de simulación especializado en el estudio de los pares motores máximos demandados por el sistema en posiciones críticas; posiciones en las cuales el sistema se podría encontrar y demandar el máximo valor de momento de fuerza para el servo motor ubicado en esa unión para su correcta movilidad. Además se pretende estimar la carga máxima adicional que el humanoide pudiera soportar. Partiendo de los valores del momento de fuerza máximo se determinará si los servomotores que se tienen en disposición (AX-12) cumplirán con su tarea; en caso contrario se plantea el rediseño en los eslabones del sistema humanoide para lograr el correcto desempeño de los servo motores.

Para controlar el posicionamiento de las extremidades de un sistema humanoide se realizará el cálculo de la cinemática directa e inversa del sistema humanoide (O. y B.) (En la sección 1.4.2 se describen las características de estos cálculos). Con lo que se pretende validar el correcto funcionamiento del sistema humanoide a diseñar. En este punto se debe aclarar que el modelado cinemático omitirá las uniones redundantes pasivas que conforman cadenas cinemáticas que comprenden el tren inferior del sistema humanoide.

En una cadena cinemática con eslabones contruidos con materiales livianos respecto a su tamaño, las fuerzas originadas por la inercia de las masas puntuales ubicadas en dichos eslabones no afectan el desempeño funcional en la ejecución de las tareas de posicionamiento de las extremidades. Con lo cual se pretende una implementación física del estudio cinemático del sistema sin necesidad de una caracterización dinámica del modelo.

Una vez creado el prototipo virtual será llevado a una plataforma de simulación robótica en donde se pretende validar el funcionamiento deseado del sistema robótico humanoide para su posterior implementación física. Una vez conformado el sistema físico y validado el funcionamiento entre lo eléctrico-electrónico, se plantea reproducir las pruebas funcionales de las simulaciones en el prototipo físico; determinando las posibles razones de las discrepancias que llegaran a presentarse entre los resultados de simulación y los de la implementación física.

1.3. Justificación.

El alto costo en el mercado de plataformas robóticas humanoides comerciales con características deseadas por las instituciones académicas y el desafío tecnológico que representa el desarrollo de un robot de esta naturaleza; es motivación para que los centros de investigación y universidades del mundo tengan líneas de investigación orientadas a la construcción de robots de tipo académico. El objetivo de este trabajo de tesis fue contribuir con un diseño propio de plataformas robóticas para la implementación de diversas técnicas en locomoción, navegación y visión.

La Universidad Tecnológica de la Mixteca actualmente no cuenta con ningún prototipo funcional para aplicar algoritmos y técnicas de control robótico sobre la locomoción bípeda antropométrica considerando las plantas de los pies segmentados.

Mediante el desarrollo de esta investigación se brindará a los laboratorios pertinentes de un sistema humanoide modular, con la posibilidad de tomarlo como planta para experimentar nuevas técnicas de control sobre el andar bípedo. Además puede servir como material de apoyo de materias afines que utilicen los componentes del sistema para demostraciones prácticas de lo aprendido

teóricamente. Dado que en la oferta de estudio de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, existe una cantidad considerable de asignaturas donde el sistema humanoide sería de gran utilidad en la motivación a los alumnos al proporcionar un prototipo funcional. El alumno podrá verificar de forma práctica y visual el resultado de sus desarrollos teóricos en asignaturas tales como:

- **Sistemas de control:** En la implementación de técnicas de control con retroalimentación al proveer un sistema con morfología humanoide al cual se le pueden aplicar técnicas sencillas de control de los servomotores al usar la retroalimentación del acelerómetro, así como tareas de estabilidad orientadas al control de un péndulo invertido en el plano frontal de la locomoción bípeda.
- **Diseño digital:** Al prototipo funcional, se le podrá adaptar un sistema digital (FPGA), y con ello tener una plataforma de pruebas manejando las entradas digitales obtenidas de los sensores, cámara web, y mediante módulos digitales tener salidas a los servomotores para un fin en específico.
- **Programación de microcontroladores:** Con el microcontrolador integrado en la tarjeta de control que será el sistema controlador central del robot, se podrán aplicar prácticas orientadas a reafirmar el aprendizaje en la programación a bajo y alto nivel de microcontroladores, teniendo entradas de las lecturas de los sensores y como salidas los servomotores.
- **Robótica:** En la materia resulta cómodo para los estudiantes no perder tiempo en el desarrollo de un sistema robótico, y poder centrarse en la implementación de técnicas de análisis robótico considerando las cadenas cinemáticas abiertas como sistema robótico fijo, o el conjunto humanoide como sistema robótico móvil.

Finalmente, esto marca un inicio en lo que confiere a investigaciones en el desarrollo de técnicas de control orientadas a sistemas con morfología humanoides, por parte de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

1.4. Hipótesis.

Después de revisar los diferentes elementos que constituye el diseño de un robot humanoide. Para el desarrollo del tema de tesis se planteó la siguiente hipótesis:

” Es posible diseñar y construir un sistema robótico humanoide con características antropomórficas y antropométricas de bajo costo.”

1.5. Objetivos.

1.5.1. Generales.

Diseñar, simular y construir la estructura mecánica de un robot humanoide antropométrico a escala 4:1, para dotar de una plataforma experimental en el estudio e investigación de técnicas

de control en locomoción bípeda que exploten las ventajas antropomórficas de un pie humano segmentado en la planta y tobillo, así mismo caracterizar el prototipo final mediante un modelado matemático de las cadenas cinemáticas con el fin de mostrar su funcionalidad.

1.5.2. Particulares.

- Construir una plataforma humanoide a escala 4:1 para la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de locomoción bípeda, con plantas de los pies antropométrico y procesos cognitivos.
- Emplear herramientas computacionales de apoyo para obtener una caracterización de propiedades mecánicas y físicas del sistema robótico, las cuales serán muy útiles de ser necesario tener un modelado del sistema completo en aplicaciones de control automático.
- Programar tareas básicas de prueba en el sistema, para comprobar su funcionalidad y comparar los alcances en simulación con los del sistema físico.
- Realizar una comparativa entre los resultados obtenidos a nivel simulador y nivel prototipo.
- Desarrollar por lo menos una práctica de laboratorio, para demostrar la funcionalidad del sistema.

Capítulo 2

Metodología de diseño.

El término de diseño que se plantea en el desarrollo de este trabajo de tesis hace referencia a toda actividad relacionada con el desarrollo de una idea de producto.

Se define bajo el término *diseño total* a la actividad sistemática desarrollada para satisfacer una necesidad y que cubre todas las etapas desde la identificación de necesidad hasta la venta el producto (S).

El International Council of Societies of industrial Design (ICSID) lo define como: Una actividad creativa cuyo propósito es establecer las cualidades multi facéticas de objetos, procesos, servicios y sus sistemas, en todo ciclo de vida. Por lo tanto, es el factor principal de la humanización innovadora de las tecnologías, y el factor crítico del intercambio cultural y económico (definition.).

Se puede decir de manera generalizada que el objeto del diseño, consiste en:

- La satisfacción de una necesidad, tomando en cuenta las variables que intervienen y cómo relacionarlas.
- Posteriormente analizar las restricciones relacionadas con, por ejemplo: Limitaciones impuestas por factores externos de orden físico y funcional.

Se entiende como modelo de diseño la forma en que el diseñador representa a un proceso (F y V). Se hará una breve descripción de aquellos modelos más importantes tratando de describir sus diferentes etapas y fases en que se desarrollan durante un proceso de diseño; de tal manera que de ellos se puedan obtener las bases teóricas para el desarrollo de la metodología aquí propuesta.

En el presente trabajo de tesis propuesto surgió la necesidad de seguir una metodología de trabajo, la cual permitiría tener una serie de pautas para el desarrollo del proyecto, con el fin de obtener un punto de validación para cada una de las etapas hasta finalizar el trabajo de tesis.

La definición de la metodología de diseño se realizó mediante la identificación de los procedimientos a desarrollar, así como, con él planteamiento de una serie de reglas y criterios. Los cuáles permitieran poder finalizar de manera óptima el proceso de diseño del un robot humanoide a escala 4:1.

Dicha metodología hizo posible observar lo realizado y consecuentemente validar si se estaban cumpliendo los objetivos propuestos o en caso contrario replantear el proceso de diseño.

En consecuencia, para el desarrollo de esta tesis se propuso seguir una metodología análoga a la desarrollada en (M); basada en la descripción e integración del desarrollo de un robot humanoide a tamaño humano real (RH-1). Proyecto que fue desarrollado por un grupo de trabajo interdisciplinario de la Universidad Carlos III de Madrid.

En el diseño de un robot humanoide existen una gran cantidad de variables a tener en cuenta y generalmente el diseñador con el afán de generar un robot lo más polifuncional posible, no aborda el problema desde un punto de vista realista. Entonces se puede decir que el problema se dirige hacia dos dimensiones: una relacionada con el conocimiento de las variables y una segunda relacionada con la falta de un método específico para enlazar el diseño de este sistema con las variables.

Concretamente, el objetivo de este proceso de diseño es la sinergia de todos los subsistemas que conforman al robot como lo son: el sistema actuador, hardware que le brinda forma y los sensores.

La cuantificación de estas especificaciones funcionales es sometida a un análisis, de esta forma se puede modificar la concepción original o por el contrario reafirmarla y proporcionar un conjunto de datos de salida para la siguiente fase. Como datos de salida de esta primer etapa, se deberían obtener especificaciones acerca de la solución aceptable y características técnicas a cumplir.

El proceso de diseño consiste en transformar datos basados en condiciones, necesidades y requisitos relacionados con la descripción de una estructura, esto con el objetivo de satisfacer dicha descripción. Es un proceso de retroalimentación por parte del diseñador (persona que lleva a cabo el proceso de los datos) donde hace uso de su experiencia y aprendizaje adquirido con anterioridad, para dar lugar a una solución que una vez concebida cumpla con las expectativas requeridas.

A continuación se incluye una breve descripción de los principales métodos surgidos en el diseño concurrente para brindar de un fundamento científico a la metodología empleada. Éstos métodos integran las acciones a realizar durante el proceso de diseño de un humanoide, explicando en forma resumida y concisa las principales propuestas de modelos (descriptivos, cognitivos, y computacionales); ya que si bien el método que se sigue en esta tesis no cumple los lineamientos que define en específico a alguno de ellos, se sirve de sus características.

Modelos de diseño.

- Modelos descriptivos. Este modelo es muy básico pero permite identificar las fases del diseño que son comúnmente aceptadas por la mayoría de los investigadores.
 - *Fase de diseño conceptual.* Se buscan conceptos o principios de solución al problema, para lo cual se analiza el problema identificado, se sintetiza una o varias posibles soluciones y se evalúan con respecto a especificaciones o restricciones impuestas. Se generan principios de solución pero no son lo suficientemente válidas como para obtener la respuesta al problema. Esta etapa requiere de abstracción y creatividad del diseñador encaminado a generar estructuras válidas.
 - *Fase de diseño preliminar.* Se obtienen formas específicas, materiales propuestos y planos de conjunto con dimensiones generales, que representan al producto como un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces y acoplamientos.
 - *Fase de diseño de detalle.* Generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto final. La elaboración de planos de detalle, la determinación de

etapas de fabricación, la identificación de proveedores, etc. Esta fase es la más desarrollada a nivel empresarial.

En las tres fases se observa de forma clara los distintos aspectos de interés en la práctica del diseño. La primera es de interés para los investigadores del diseño que buscan mejores métodos para abordar la tarea; la segunda es de interés principalmente para los académicos que quieren forjar profesionales capaces de concretar soluciones, y la tercera es de interés para la industria que quiere materializar productos innovadores.

Existen otros modelos descriptivos mucho más elaborados, pero en esencia sigue existiendo un acuerdo en la importancia de aquellas bases descritas (J).

- Modelos prescriptivos. Estos modelos además de describir, dan pautas para desarrollar cada una de las fases y etapas durante el proceso de diseño. Las principales características de este modelo son:
 - La necesaria interacción de tantas disciplinas (técnicas o no) como sea necesario para resolver el problema.
 - Una definición clara de las especificaciones de diseño que serán tomadas en cuenta durante todo el proceso.
 - El continuo acercamiento a la solución mediante una retroalimentación del modelo que conduce a estudios intercalados de divergencia (generando conceptos) y convergencia (evaluación sistemática).
- Modelos cognitivos. Los modelos cognitivos buscan hacer una descripción formal de la forma en la que actúa el conocimiento del individuo que diseña.

Tal como se comenta en (B. y J.), la representación del proceso de diseño será siempre incompleta y estará enmarcada en los dos niveles más simples de modelado. La dificultad de construir modelos que representen la actividad cognitiva del diseñador obedece a que la acción de diseñar es una clase de aprendizaje donde las habilidades y las capacidades son adquiridas después de aprender técnicas, asimilar conocimiento e inspeccionar experiencias exitosas del pasado. El diseñador inicia el proceso nombrando o identificando los aspectos relevantes de la situación, pasando a estructurar el problema en cierta manera, haciendo movimientos hacia una solución y reflexionando en esos movimientos la estructura construida.

- Modelos computacionales.

El modelo computacional busca mostrar cómo un mecanismo para el diseño puede incluir razonamiento tanto sobre el problema, como sobre la solución, en forma paralela. Mediante un algoritmo genético que utiliza conceptos de espacios de búsqueda y representación de individuos por genotipo/fenotipo, que interactúan con operadores de cruzamiento, mutación, selección, reproducción y refinamiento. En general se acepta que la actividad de diseño se divide en dos categorías de procesos mentales y de acciones, los cuáles son: el análisis y la síntesis (H., P. y H).

2.1. Descripción de la metodología de diseño adecuada a las necesidades del proyecto acerca del desarrollo del robot humanoide.

De acuerdo a la literatura revisada en el estado del arte, el éxito logrado de los proyectos humanoides desarrollados se debe al seguimiento de una metodología. Entonces el diseño debe partir del profundo conocimiento, comprensión de las características y requerimientos que necesitará satisfacer, así como, realizando una retroalimentación sobre la manera en que se interrelacionan cada uno de los subsistemas que le conforman. La cuestión clave es cómo plasmar las especificaciones técnicas para reflejar la funcionalidad requerida y viceversa.

Se describirán a continuación el planteamiento de las etapas metodológicas empleadas en el desarrollo de este trabajo de tesis.

2.1.1. Primer Etapa: Definición del problema.

Se garantiza la clara especificación y comprensión del conjunto de tareas prioritarias a realizar por el robot. Lo mencionado anteriormente es fundamental puesto que el éxito del robot como tal, reside en que el prototipo sea capaz de realizar las tareas para las que fue concebido.

La primer etapa de definición del problema, puede organizarse de la siguiente manera:

1. Se debe realizar una lista de las tareas prioritarias a realizar por el robot humanoide.
2. Se buscará el procedimiento de diseño más conveniente para realizar aquellas tareas prioritarias.
3. Se realizará un análisis funcional a través del objetivo general y particulares con el fin de establecer prioridades entre los diferentes requisitos que realizará el robot.

En la figura 2.1, se observa de forma esquemática la metodología a seguir para conseguir completar las tareas de la primer etapa. Según el enfoque final hacia donde se lleva la tarea, se ha de identificar un conjunto de tareas básicas o imprescindibles. Lo cual guía a una correcta identificación de las tareas que se van a considerar como prioritarias.

En la etapa de validación se pretende homogeneizar las ideas principales con cierta coherencia para poder partir de una base sólida.

En la fase de análisis funcional de las especificaciones, se trata de estudiar de forma cuantitativa las necesidades a cubrir. Cada una de las tareas requeridas planteará diversas características con respecto: a la carga a soportar, los grados de libertad necesarios, dispositivos sensoriales.

De este análisis se extraen las especificaciones cuantitativas. Por ejemplo: rangos de valores generales posibles para las distintas variables implicadas que aseguren la funcionalidad requerida para la ejecución de las tareas definidas para el robot.

La cuantificación de estas especificaciones funcionales es sometida a un análisis funcional, pudiendo modificar la concepción original o por el contrario reafirmarla y proporcionar un conjunto de datos de salida para la siguiente fase. Como datos de salida de esta primer etapa se obtendrán especificaciones acerca de la solución aceptable y características técnicas a cumplir.

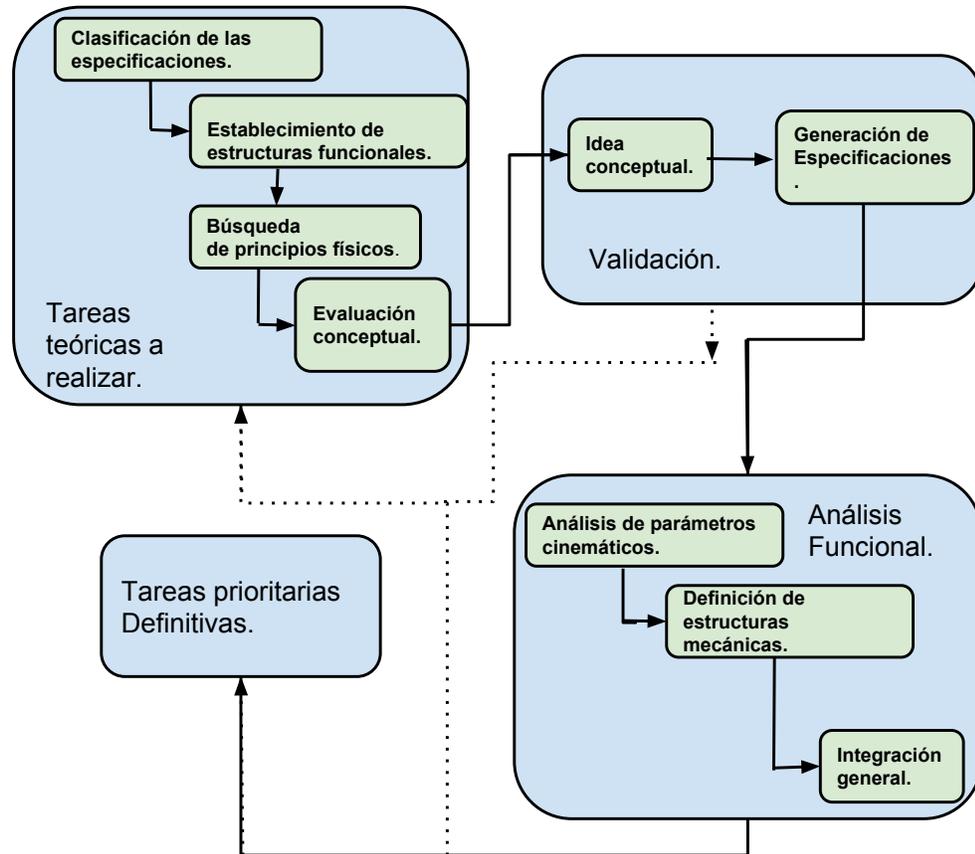


Figura 2.1: Etapa I. Definición de tareas prioritarias.

Como bases de esta etapa, se tomarán:

1. Datos de un estudio antropométrico (W. y G.).
2. La forma de realizar las tareas a cumplir.
3. El análisis de los parámetros cinemáticos.

La especificación de las tareas implica pasar del concepto abstracto de la realización misma de cada actividad a un concepto más práctico, tomando en cuenta las limitaciones mecánicas que se pueden llegar a presentar.

2.1.2. Segunda etapa: Desarrollo del diseño mecánico.

El presente trabajo de tesis pretende ahondar en las actividades centradas en la búsqueda de soluciones al diseño mecánico; para lograr un diseño antropométrico funcional.(G. y P.)

En la figura 2.2 se presenta la metodología a seguir para completar las tareas de la etapa II. Se aprecian tres fases principales:

1. El diseño conceptual.
2. El diseño detalle.
3. El diseño mecánico del prototipo.

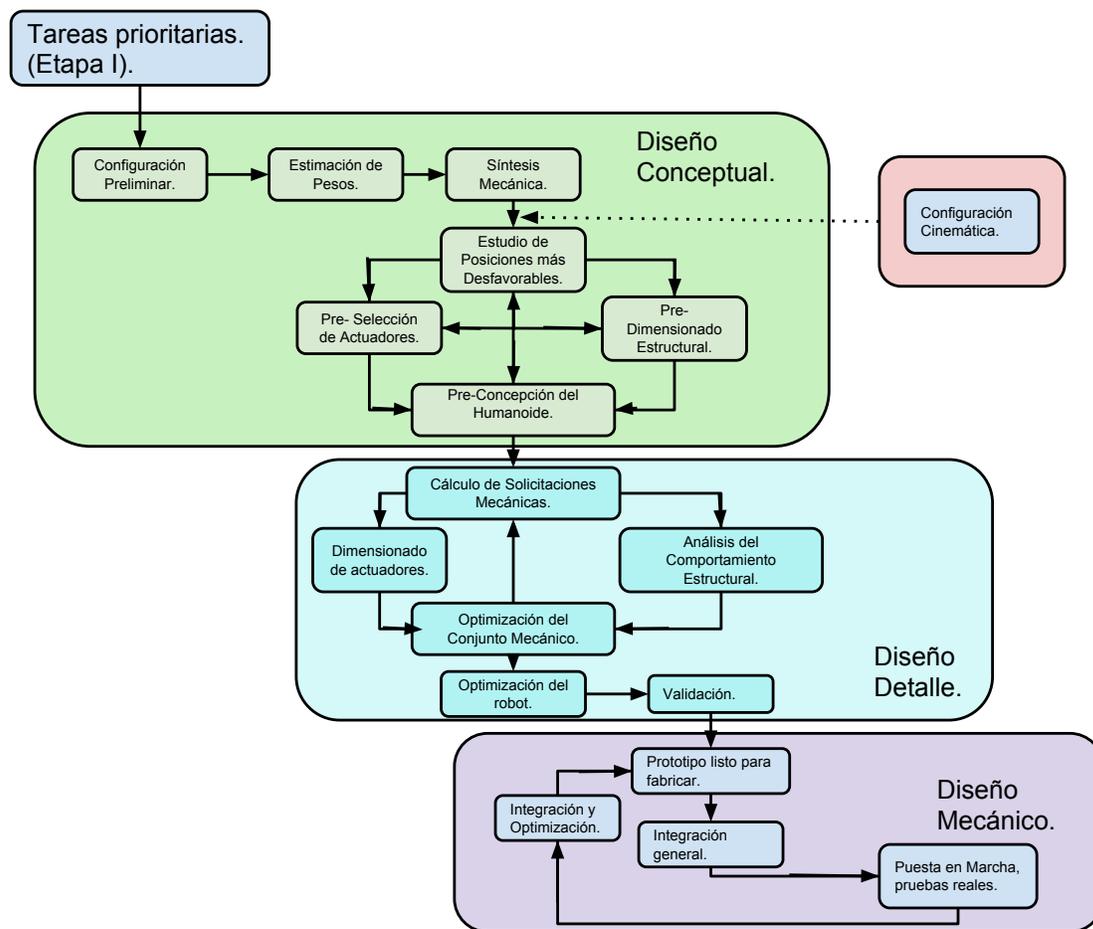


Figura 2.2: Etapa II. Desarrollo del diseño mecánico.

El sentido descendente de dicha gráfica indica también su evolución temporal durante el proceso de diseño. Sin embargo, tenemos algunos procesos de iteración (mostrados en la figura 2.2).

Los bucles se repetirán las veces que sean necesarios; puesto que a medida que se conoce con mejor detalle el modelo del robot se van definiendo más aspectos y más características (trayectorias, pesos, componentes, etc.).

Esto es por que se dispone de más información para obtener la mejor de las soluciones y con ello aumentar la precisión de las tareas prioritarias previamente definidas.

Además se tendrán en cuenta las variables del peso aportado por el hardware de control, baterías seleccionadas y componentes sensoriales.

Con la ejecución de las tareas anteriores que engloban el diseño a detalle, se produce una transición del modelo creado en un mundo virtual a un prototipo existente en la realidad.

Para poder describir este método de forma más meticulosa, se seguirá la figura 2.2 de un modo estructurado con el fin de interrelacionar las distintas variables y aspectos involucrados. En cada etapa, se deberá de especificar la actividad que se desarrolla; esto con el fin de poder llevar un control en la ejecución de la metodología.

Diseño conceptual.

- Configuración preliminar. En esta etapa los datos de entrada para el sistema serán los datos obtenidos de la primer etapa de este proceso.

Para ello se definen los parámetros que caracterizan al robot partiendo de las especificaciones funcionales acerca de las tareas que va a realizar:

1. Se diseñará la forma antropométrica del robot como un conjunto de cadenas cinemáticas.
2. Elegir una configuración preliminar determinando el número de GDL, tipo y su ubicación en el humanoide (esto según su configuración cinemática). Dicha configuración se construirá considerando algunos criterios de simplicidad como:
 - El número mínimo necesario. Este número basado en información procedente del análisis del ser humano: Estudios ergonómicos, observando trabajos realizados por centros de investigación.
 - Una configuración con rangos, ángulos de trabajo y de alcance para el robot en su conjunto.

De forma general, se puede afirmar que la elección del número de grados de libertad condiciona la destreza del robot, por ejemplo requieren como mínimo 6 GDL para posicionar y orientar el extremo de cualquier manipulador en el espacio (K., H. y M).

- Síntesis mecánica.

Antes de comenzar con el diseño estructural o del conjunto actuador, se ha de completar el análisis cinemático que permitirá saber los parámetros cinemáticos, es decir, longitud de los eslabones y el recorrido o ángulos de giro para cada eje.

Una vez conocidos estos parámetros mecánicos se puede comenzar el diseño y concepción del humanoide.

Dentro de las herramientas que se tienen para determinar los parámetros que representan la configuración cinemática pueden ser expresados de forma muy diversa (Denavit Hartenberg) con el objetivo final de obtener parámetros de las distintas articulaciones del humanoide para

que pueda alcanzar distintas posiciones de trabajo, que a su vez va relacionado lógicamente con el desplazamiento de éste por sus distintos espacios de tarea.

Aquí también, como sucesión de la primer etapa, es muy recomendable complementar este estudio mediante una simulación 3-D, adoptando los movimientos deseados.

Se debe de aclarar que hasta este punto no se determina ningún valor en concreto como solución; si no que se plantea un rango de valores, dentro de un espectro de valores máximos y mínimos, válidos para la aplicación.

Esto se hará cuando se tengan definidas las medidas generales. Entonces, se incorporará al modelo una estimación de los materiales estructurales (mecánicos, electromecánicos y electrónicos) que se usarán, para tener una idea del peso total.

Finalmente resulta práctico y útil conjuntar todo lo anterior en la concepción de un diseño con gran detalle mediante el uso de un software de diseño asistido por computadora. Lo que permitirá tener un enfoque realista del problema.

Se insertará el modelo virtual del prototipo en un escenario simulando las fuerzas de gravedad sobre su hardware, estas simulaciones permitirán al diseñador identificar restricciones o posibles problemas relacionados con la movilidad y el punto de equilibrio en estado estacionario.

- Estudio de las posiciones desfavorables.

Como puede observarse en el figura 2.2 el bloque que lleva por nombre el de esta sección sirve de base y tiene correlación con otros, entre los cuales se encuentran: El análisis estático del humanoide en algunas uniones y la selección de los actuadores. Debe existir una integración sinérgica entre dichos parámetros evocando de esta manera a una pre-concepción del humanoide.

Por lo que el objetivo que se persigue aquí es determinar unos valores de partida para realizar estos cálculos, con lo que podemos dividir este análisis en dos áreas de interés:

- Locomoción: Se debe conocer la potencia solicitada durante cada tarea, verificar el tiempo de trabajo del valor nominal de potencia de los motores y comprobar en cuales casos existe una mayor demanda mayor.
- La identificación de aquellos movimientos donde los motores precisan aportar una potencia mayor durante un tiempo corto. Con el fin de asegurar que en cualquier movimiento que realice el robot no se van a superar los pares estáticos resultantes máximos que pueden llegar a erogar los motores ubicados en las uniones.

- Pre-concepción del Humanoide. Durante esta etapa conceptual del dimensionamiento del robot, se deberá tener la suficiente información para comenzar a realizar cálculos sobre el robot.

Se hará uso de herramientas de software CAD para realizar una simulación robótica en un entorno lo más realista posible.

- Cálculo de solicitaciones mecánicas. Puede decirse que un porcentaje muy alto del éxito tecnológico que tenga el robot, dependerá de la exactitud con la que se realicen los cálculos relacionados con estas dos etapas.

Diseño a detalle.

- Selección de actuadores. Una correcta selección de los actuadores adecuados es fundamental para que las articulaciones del robot humanoide realicen los movimientos deseados para cada tarea prioritaria.

Dentro de los aspectos más relevantes a valorar a la hora de seleccionar un grupo actuador, podemos citar (A., “Metodología de Diseño de Asistenciales. a Robot Portátil Asibot.”):

1. *Precisión:* Se ha de tener en cuenta que la precisión de la cadena cinemática no se vea disminuida por la falta de resolución del encoder, así mismo se considerará una velocidad de respuesta adecuada. El tamaño, peso y forma del actuador son críticos y normalmente imponen severas restricciones; son además importantes el rendimiento, fiabilidad, el tiempo de vida esperado.
2. *Tipo de motor:* El más utilizado sigue siendo el motor de corriente continua aunque actualmente está siendo reemplazado por los motores brushless. Dado el abaratamiento de la electrónica de control y requisitos de velocidad no tan elevados, se hace común el uso de servomotores.
3. *Fuente de alimentación disponible:* Se ha de tener en cuenta, la compatibilidad con el resto de sistemas, la facilidad de manejo, documentación para su conexión y puesta en marcha.

De forma más puntual, los parámetros fundamentales que se buscan en los motores acorde a las necesidades de este proyecto:

1. Peso [Kgf], volumen [m^3] y geometría.
2. Par continuo: T_{cont} [$N * m$].
3. Par máximo: T_{max} [$N * m$].
4. Tensión de alimentación: V_{bus} [V].
5. Corriente continua, (I_{cont}) y máxima o de pico (I_{pico}) [A].

Para este caso de diseño se parte de la preselección de los actuadores AX-12 (sus características se exponen en la sección de diseño a detalle); esto es, por que forman parte material disponible asignado al proyecto.

Con esta selección se tienen dos parámetros fijos dentro del bucle de la sección de diseño a detalle (en la figura 2.2); uno son los valores de par motor máximo, peso de los servomotores en conjunto y las posiciones desfavorables propuestas. Con estos valores se realizará una evaluación del pre-dimensionado estructural y en caso de ser necesario se aplicará un re-diseño de la dimensión estructural.

- Dimensionado y optimización del conjunto mecánico.

El objetivo de este punto es integrar las dimensiones mecánicas que presentan los actuadores, componentes electrónicos, así como el diseño final del pie segmentado; los cuales conformarán el conjunto mecánico del sistema robótico. Esto para obtener un diseño CAD aún más detallado y funcional del sistema robótico humanoide.

- Análisis dinámico.

1. *Cálculo de la cinética*: El cálculo de la cinética del sistema robot completo proporciona datos necesarios para la caracterización completa del sistema y la aplicación de técnicas de control automático. Sin embargo será omitido, dado que resulta una tarea compleja, la cual dista de los objetivos delimitados en el planteamiento de este proyecto.

- Validación.

Desde un punto de vista mecánico, el principal objetivo que se plantea es conseguir integrar de la forma más compacta y ligera posible los componentes electromecánicos. Esto se ha de conseguir manteniendo la configuración cinemática seleccionada tanto en dimensiones y GDL, así como considerando las particularidades de cada componente.

Para cada subsistema se han de definir unos criterios de decisión, para determinar si la solución es mejorable o no y estudiar de que forma afectan los posibles cambios al resto de subsistemas.

En cada iteración del ciclo de diseño tras la fase de optimización se procede a comprobar cada uno de los aspectos de diseño, tanto a nivel mecánico como electromecánico.

Se verifica que cumplen a nivel individual con la función asignada y en el conjunto del prototipo, que cada subsistema funciona de acuerdo a las especificaciones y no afecta negativamente a los demás. Se comprueba entonces que todos los subsistemas contribuyen apropiadamente al desempeño de la funcionalidad requerida con la mejor efectividad.

A su vez que se procede a la validación de la arquitectura de control a bordo del robot en paralelo con el desarrollo del prototipo mecánico virtual del robot, se habrán desarrollado los módulos de cálculo cinemático para la resolución del problema cinemático directo e inverso y el módulo generador de trayectorias. Estos módulos son relativamente independientes a la configuración final de la arquitectura, se empiezan a definir tras la decisión de la configuración cinemática.

Con la validación del prototipo se puede iniciar la fabricación.

Diseño mecánico.

- Tercer etapa: Evaluación de la solución.

Se distinguen a lo largo del proceso descrito, dos tipos de validaciones: Técnicas y funcionales.

Las primeras se refieren a la elección de distintos parámetros o variables de diseño propias del funcionamiento de los equipos. Este tipo de comprobaciones son propias de cada tecnología y se realizarán mayoritariamente en la segunda etapa de desarrollo de la solución.

El segundo tipo de validación que se va a efectuar mayoritariamente en la primera etapa y tercer etapa. Está evalúa la solución técnica presentada ya sea en la fase de modelo, prototipo virtual y después de su implementación física. Esta validación funcional es más compleja sobre todo en la primera fase, pues la solución a evaluar carece de los detalles necesarios para completar la evaluación.

Aquí se procede a la evaluación del diseño respecto a los requisitos. La evaluación, que debe estar presente durante todo el ciclo de vida con la intención de proporcionar un retorno de información que contribuya a mejorar el diseño, también determinará si se han alcanzado los objetivos especificados y se verificará, en su caso, el uso a largo plazo del producto.

En esta tercer etapa se dispone de un prototipo perfectamente operativo, analizándose los resultados. La evaluación del robot debe ser realizada en estrecha consideración sinérgica de todos los módulos que conforman al robot.

En esta etapa se van a producir muchos datos de información relevantes para futuros desarrollos. Es cuando el robot humanoide desarrollado podrá ser evaluado funcionalmente en su utilidad. Así como identificar sus puntos débiles y aciertos.

Definición del nombre para él sistema robótico humanoide.

Un punto importante para este proyecto, es el requerimiento de encontrar un nombre para el sistema humanoide. Se indagó sobre posibles nombres que relacionen al sistema con su entorno geográfico. Puesto que la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) se ubica geográficamente en la región de la Mixteca alta. Por ello se buscaron nombres derivados de dicho complejo dictal ¹ viables para el robot.

Es por ello que tras revisar un diccionario del complejo dictal de la Mixteca alta (de Farris) se optó por el término Suchí que traducido al español significa niño. Por lo que se decidió nombrar de esta manera al robot humanoide a desarrollar.

¹El Mixteco es en realidad una macrolengua que engloba diversas lenguas emparentadas entre sí. Estas lenguas pertenecen al área lingüística mesoamericana y específicamente a la familia otomangue. Asimismo, algunos sugieren que las lenguas mixtecas conforman el grupo mixtecano. El mixteco tiene sus orígenes hace cerca de tres mil años y es actualmente hablado en los estados mexicanos de Oaxaca, Guerrero y Puebla por casi 500 mil personas. Al igual que otras lenguas indígenas, las diferentes expresiones del mixteco dan una importancia crucial a la entonación, la cual puede diferenciar a las palabras y atribuirles distintos significados.

2.2. Aplicación de la metodología al proyecto humanoide Suchí.

Como ya se ha comentado, el objetivo de esta tesis es el desarrollo de un humanoide con características antropométricas a escala 4:1, así como características funcionales para cumplir tareas que lo hagan útil como material didáctico para la investigación y aplicación de nuevas técnicas en el control del andar bípedo. De igual manera debe cumplir con la capacidad mecánica de adaptarse a diferentes entornos con la gracia y prestancia de un ser humano normal. Lo anterior le permite realizar actividades desde las más básicas, como mantenerse en equilibrio hasta moverse con rapidez. Para lograr esto deberá analizar a cada momento su entorno para realizar actividades como transporte y manipulación de objetos.

Para poder lograr este objetivo fue necesario seguir una metodología para su construcción. Anteriormente se presentó dicha metodología desde un aspecto meramente teórico. Ahora en el presente capítulo se describirán los aspectos técnicos del desarrollo del robot humanoide como se muestra en el esquema de la figura (2.3).

Definición de las tareas prioritarias a realizar por el robot.

Dado que se requería que el robot a desarrollar fuese lo más análogo a la morfología humana con el fin de aprovechar las bondades que le brindan estas características únicas en su locomoción y con ello poder ejecutar sus tareas prioritarias. Las cuales consisten principalmente en imitar de la mejor manera posible del ser humano. Para poder lograr dicha tarea, el sistema robótico humanoide debía contar con:

1. Diseño antropométrico.
2. Escala 4:1.
3. Planta de pie segmentado.
4. Funcionalidad para futuras aplicaciones de control antropométrico.

Diseño conceptual.

Este tipo de ingenios mecánicos tienen dos grandes subsistemas divididos en cadenas cinemáticas definidas como tren inferior y tren superior. Por su parte la cadena inferior está formada por las piernas y su función primordial es proporcionar la locomoción de todo el robot a través del entorno de acción. La cadena superior está formada por los brazos y la cabeza. La estructura de unión de esos dos subsistemas está constituida por la cadera.

Al igual que en el ser humano la parte superior está constituida por un par de brazos. Los cuales a su vez se pueden abstraer como dos manipuladores robóticos los cuales le brindan de versatilidad para realizar diversas tareas.

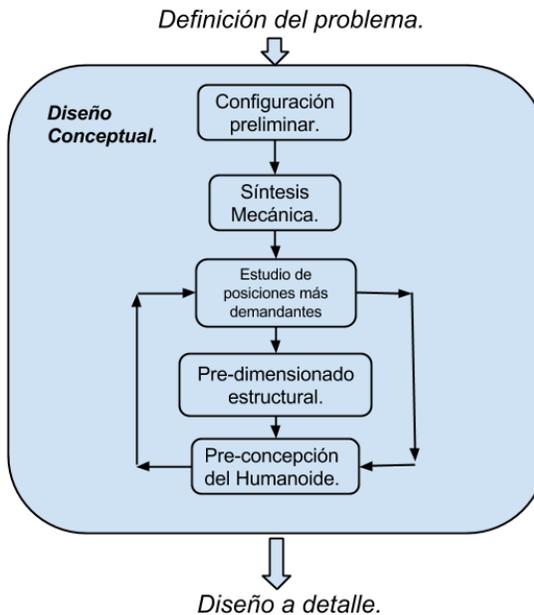


Figura 2.3: Descripción del diseño conceptual.

Estructura del cuerpo humano.

Uno de los más apasionantes retos que se ha impuesto la ingeniería en las últimas décadas ha sido lograr que un robot humanoide pueda ejecutar actividades cotidianas de manera análoga a como él las realiza.

Por lo que uno de los aspectos más complejos de estos robots es la locomoción bípeda. En este caso el principal problema viene a ser el procesamiento del control dinámico en tiempo real para mantener el equilibrio del robot.

El modelo a imitar es el cuerpo humano, el cual es una compleja estructura integrada por numerosos sistemas funcionales, sostenidos por una estructura ósea de 210 huesos, un centenar de articulaciones y grupos musculares (Moore y col.). La colaboración entre huesos y músculos le hace posible al ser humano mantener su postura y llevar a cabo diversas actividades.

El objetivo es tratar de describir aquellas analogías físicas y mecánicas a las que frecuentemente se recurre para entender el funcionamiento del cuerpo humano y a partir de ellas obtener los modelos que ayudarán a lograr el diseño del humanoide.

Configuración preliminar.

Una vez determinadas las actividades a realizar por el sistema robótico se procede a determinar una configuración preliminar, mediante la determinación del número de GDL, su ubicación y su disposición.

Según la configuración cinemática se consideraron criterios de simplicidad para intentar que fuesen el mínimo necesario. Basándonos en información procedente del análisis del ser humano, a

partir de estudios ergonómicos, se escogió una configuración con rangos, ángulos de trabajo y de alcance para el robot en su conjunto (K., H. y M.).

2.3. Diseño del sistema humanoide

Las proporciones de Suchí se basan en los datos biomecánicos de la forma humana. La figura 2.4 muestra las proporciones de las dimensiones del plano frontal de un percentil 50 masculino basado en datos de una encuesta en los Estados Unidos (W. y G.). Las dimensiones se muestran en milímetros e indican los tamaños apropiados de las características anatómicas cuando se escala hasta una altura total de 587 mm (proporción 4:1).

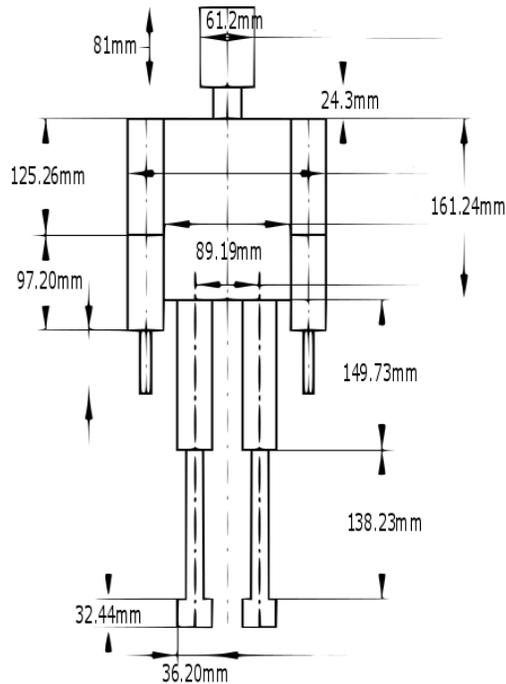


Figura 2.4: Proporciones antropométricas de ser humano escaladas 4:1.

El diseño preliminar se realizó en el software CAD SolidWorks partiendo del modelo de los servomotores AX-12. El software de diseño CAD a utilizar se eligió por la familiaridad que se tiene con su herramienta de *SolidWorks motion* en la experiencia adquirida a través de los cursos de la carrera en Ingeniería Mecatrónica.

2.3.1. Estudio de posiciones desfavorables.

Desde un punto de vista más práctico se calcularon las sollicitaciones mecánicas que en el caso particular del proyecto son las exigencias a los actuadores involucrados en la ejecución de posturas más demandantes. Dichas posturas se extraen de la metodología que se toma como referencia en este trabajo de tesis; partiendo de experimentaciones propuestas (en el artículo (Y. y col., “Planning walking patterns for a biped robot”)), se consideran las siguientes posiciones:

1. Plano sagital:

- En el momento en que está por apoyar el pie en el suelo: Sería un instante antes de pasar de la fase de apoyo simple a fase de apoyo doble.
- Movimiento hipotético que el robot realiza al subir un escalón: Se consideró esta postura porque en este momento se solicita un mayor esfuerzo de torque en los actuadores de la cadera.

2. Plano frontal:

- Inclinandose en su conjunto hacia su lado izquierdo: Máximo ángulo de pivote teórico del Motor 10 con un ZMP válido.
- Alejamiento de la pierna izquierda: El ángulo máximo soportado por el actuador.

A manera de complemento, se evaluó al sistema ejecutando otras posiciones como: Una sentadilla libre y con peso extra. Esto, puesto que presentan demandas a los servomotores que deben superar sin problemas para poder cumplir con sus tareas prioritarias.

2.3.2. Diseño preliminar.

Para dar inicio al diseño de la estructura que conforma al sistema robótico humanoide se deben considerar un par de puntos importantes, como lo son los materiales de construcción que brindan de una estructura mecánica al robot y su diseño; buscando con esto un balance en su estructura antropométrica.

- *Materiales de construcción:* Los materiales empleados en la construcción de la estructura del robot deben ser ligeros y lo suficientemente resistentes; esto con el fin de obtener una estructura rígida. El diseño de los elementos mecánicos tuvo un gran impacto en el alcance de dicho objetivo.
- *Balance:* Para muchos autores, conseguir un adecuado balance es la consideración más importante a la hora de diseñar mecánicamente un robot humanoide (la Guia I. y col.). El objetivo primordial de todo diseño en la locomoción bípeda es asegurarse de que el robot al caminar alcanzará el equilibrio dinámico. Los métodos de control se utilizan para alcanzar el equilibrio dinámico, no obstante el diseño mecánico debe ser estructurado de tal manera que cualquier movimiento requerido para balancear el robot sea pequeño. Así, estos movimientos podrán ser

hechos rápidamente sin la generación de grandes pares inerciales que por lo general desestabilizarían al robot. Para alcanzar esto, el centro de masa debe ser colocado lo más bajo posible para estabilizar el robot inercialmente. Con el diseño antropométrico se pretende obtener un centro de masa similar al del ser humano promedio. Esto provee de estabilidad al sistema robótico diseñado.

Además de las consideraciones anteriores, se identificaron los rangos de movimiento de las articulaciones del ser humano para tomarlos de referencia. (Véase cuadro 2.1)

El diseño de la estructura antropomórfica se puede dividir en dos partes:

1. Estructura y distribución de los GDL en los brazos.
2. Estructura y distribución de los GDL en las piernas.

Para los brazos se requirieron simplemente movimientos que imitaran al del ser humano en tareas como: Andar, realizar extensiones en el plano frontal, lateral. Con estas bases, se seleccionó un brazo con movilidad sagital y frontal en el hombro, movilidad frontal en el codo.

En cuanto a la distribución de los GDL en las piernas se opta por una estructura con 6 GDL(Lim, Tajima y Kensuke) (J. y col., “Development of a dynamic biped walking system for humanoid development of a biped walking robot adapting to the humans’ living floor”) (Park, Kim y Oh) en cada una de las piernas del robot bípedo y una unión pasiva extra para segmentar la planta del pie, la cual garantizaba la movilidad necesaria para conseguir una marcha próxima a la humana. (D.)

Conclusión de la etapa del diseño conceptual.

Siguiendo la metodología adaptada al desarrollo, se resume que el objetivo principal es la construcción de un robot humanoide con las siguientes características:

1. Tendrá una altura aproximada de 587 mm acorde a las medidas escaladas de un ser humano promedio y adaptadas a los elementos definidos previamente de la morfología del sistema robótico.
2. Se diseñará una unión pasiva para cada una de las plantas de sus pies.
3. Su estructura será lo más ligera posible.

En la figura 2.5 se muestra el primero modelo generado mediante una herramienta de software CAD; esto se llevó acabo partiendo de las especificaciones del diseño conceptual obtenidas hasta este capítulo.

Articulación.	Eje.	Suchí.	Humano.
Cabeza	R P Y	<i>N.I.</i> <i>N.I.</i> <i>N.I.</i>	$-50^{\circ}a50^{\circ}$ $-50^{\circ}a60^{\circ}$ $-70^{\circ}a70^{\circ}$
Hombro	R P Y	$-5^{\circ}a185^{\circ}$ $-150^{\circ}a150^{\circ}$ <i>N.I.</i>	$-90^{\circ}a0^{\circ}$ $-180^{\circ}a50^{\circ}$ $-90^{\circ}a90^{\circ}$
Codo	R P Y	$-125^{\circ}a125^{\circ}$ <i>N.I.</i> <i>N.I.</i>	$-155^{\circ}a0^{\circ}$ $-54^{\circ}a25^{\circ}$ $-70^{\circ}a70^{\circ}$
Cintura	R P Y	<i>N.I.</i> <i>N.I.</i> <i>N.I.</i>	$-50^{\circ}a50^{\circ}$ $-30^{\circ}a45^{\circ}$ $-40^{\circ}a40^{\circ}$
Cadera	R P Y	$-95^{\circ}a95^{\circ}$ $-90^{\circ}a60^{\circ}$ $-70^{\circ}a70^{\circ}$	$-45^{\circ}a20^{\circ}$ $-125^{\circ}a15^{\circ}$ $-45^{\circ}a45^{\circ}$
Rodilla	P	$-70^{\circ}a70^{\circ}$	$0^{\circ}a130^{\circ}$
Tobillo	R P Y	$-90^{\circ}a90^{\circ}$ $-90^{\circ}a85^{\circ}$ <i>N.I.</i>	$-20^{\circ}a30^{\circ}$ $-20^{\circ}a45^{\circ}$ <i>N.I.</i>

Cuadro 2.1: Ángulos de movilidad de Suchí comparados con los del ser humano. (K., H. y M)

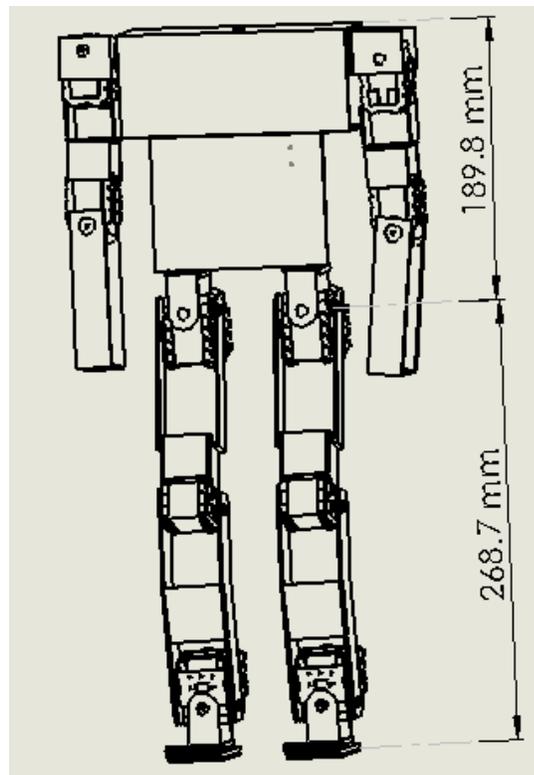


Figura 2.5: Primer modelo CAD erogado del dimensionado antropométrico.

Capítulo 3

Diseño a detalle.

Este capítulo se centra en el desarrollo de la metodología descrita previamente en este documento de tesis. Aquí se presenta un enfoque más detallado del diseño del robot humanoide Suchí y tiene como finalidad describir el proceso para obtener una validación aprobatoria del diseño desarrollado para posteriormente dar inicio a la construcción del robot humanoide.

3.1. Cálculo de solicitaciones mecánicas.

Con la estructura final en el software de modelado CAD, se tuvo la oportunidad de generar un análisis de los pares motores solicitados por las posiciones desfavorables propuestas, para obtener una validación que asegurará una óptima movilidad para las tareas a las que está enfocado el sistema robótico humanoide (véase el capítulo de resultados). Esto último se realizó haciendo uso de la herramienta de simulación SOLIDWORKS MOTION; donde se le ubican motores rotativos a las 18 uniones del sistema robótico. Posteriormente realizando un estudio de movimiento con análisis del mismo se obtuvieron datos acerca del par motor a vencer para ejecutar algún desplazamiento angular.

3.2. Elementos del sistema robótico humanoide.

A continuación se listan los elementos principales que conforman al sistema robótico humanoide.

- Sevomotores.
- Tarjeta central de control.
- Batería.
- Giroscopio.
- Estructura.

- *Servomotores AX-12+*. El servo Dynamixel AX-12+ (figura 3.1) es mucho más que un servo digital, es un componente electrónico sofisticado. Esto debido a que cada servo tiene la capacidad de controlar su velocidad, temperatura, posición, tensión y carga soportada. El algoritmo de control utilizado para mantener la posición de cada servo motor puede ajustarse individualmente, permitiendo el control retro alimentado de la velocidad y la carga que soporta cada actuador. Cada uno de los actuadores Dynamixel AX-12+ tienen un microcontrolador que puede ejecutar tareas específicas al recibir 50 diferentes comandos, la mayoría de los cuales fijan o leen parámetros que definen su comportamiento. El típico servo de radio control que sólo es capaz de establecerse en un "ángulo objetivo" (dado por una señal PWM), pero estos motores pueden ser utilizarlos como un actuador inteligente que posee sensores. Incluso es posible leer el estado del motor como puede ser la posición actual, la corriente consumida, o la variación de la temperatura del servo con la carga aplicada en el mismo, lo que permite un control retro alimentado sofisticado que actúa sobre el par que soporta cada articulación del robot. Esto tiene aplicaciones, por ejemplo en los robots bípedos, ya que sin necesidad de acelerómetros, se pueden conseguir efectos de equilibrio manteniendo al sistema dentro de su ZMP. (Dynamixel).



Figura 3.1: servomotor Dynamixel AX-12+ utilizado.

Estos motores cuentan con 2 arneses en la parte posterior, en los cuales los pines están conectados punto a punto como se muestra en la figura 3.2 (Dynamixel).

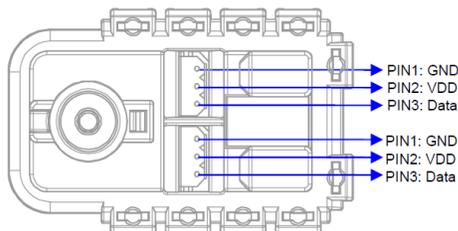


Figura 3.2: Disposición de terminales del servomotor AX-12+.

La comunicación de los motores es serial asíncrona a 1 megabit por segundo. Además la comunicación puede ser Half Duplex para la cual se necesita construir un circuito como el de la figura 3.3 (Dynamixel).

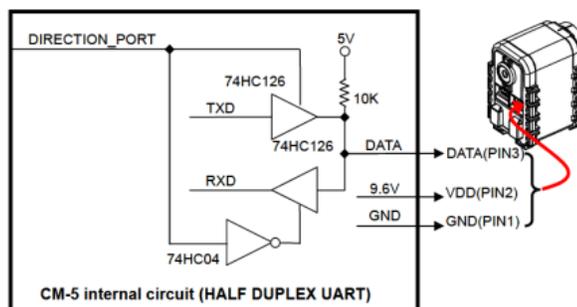


Figura 3.3: Circuito interfaz entre el microcontrolador y el servomotor.

Para la posición se cuenta con una resolución de 1024 pasos para 300 grados, en la figura 3.5 se muestra la posición de cada paso.

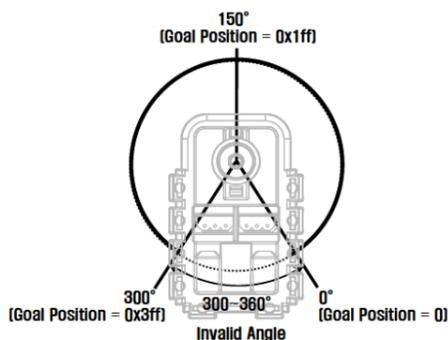


Figura 3.4: Disposición de las posiciones válidas.

También cabe resaltar que el servo motor es capaz de ser programado para girar de manera continua y puede entregar un par máximo de $1800 N * mm$.

- *Tarjeta central de control.* Es el controlador central que realizará el procesamiento necesario para el comando de instrucciones de la movilidad de los actuadores del sistema, así como la lectura e interpretación de las señales censadas en el mundo del robot por los dispositivos de entrada. Un ejemplo de este tipo de tarjetas de control lo forma la familia Arduino (La familia arduino.).

Arduino (véase en la figura 3.5) es una plataforma prototipo de código abierto, que usa un micro controlador de alta velocidad de la serie ATMEGA, incluyendo software y hardware flexible y fácil de usar. Su interfaz y entorno de programación son muy simples y fáciles de comprender. Arduino puede ser usada de manera independiente o conectándola a una PC a través de USB o Wi-Fi permitiendo una interacción con la PC.

Arduino MEGA 2560. En el blog de internet ((Arduino y dynamixel Ax-12.)) los autores (desarrolladores independientes) proporcionan una serie de librerías documentadas las cuales que hacen posible una comunicación y control estables de los servo motores Dynamixel AX-12+. Lo que facilitará la tarea de enfocarnos en programación pertinente para las pruebas funcionales del sistema robótico.



Figura 3.5: Tarjeta de control, Arduino UNO.

- *Batería.* Una batería es un dispositivo electroquímico el cual almacena energía en forma química. Cuando se conecta a un circuito eléctrico, la energía química se transforma en energía eléctrica.

Litio-Ion: las baterías de litio, junto quizá a las de hidruro metálico son las que van encontrando un mayor consenso en cuanto a su potencial y un mayor esfuerzo en su investigación y desarrollo a nivel mundial. Se usará una batería de este tipo en primer lugar por que el litio es el metal más ligero y esto da lugar a una alta capacidad específica (La alternativa al plomo y al cadmio.), lo que permite obtener la misma energía con un peso muy inferior.

Por lo mencionado anteriormente, se propone el empleo de la batería recargable tipo LiPo para alimentar los actuadores. Esta batería es de 11,1V y una capacidad de 1000 mAh. Además cuenta con control embebido para proteger de sobrecargas, sobre descargas y exceso de corriente.

- *Giróscopio.* Para obtener datos acerca de la orientación en el espacio de nuestra plataforma robótica humanoide. Se optó por incorporar un sensor giroscópico. El sensor usado fue el Gyro GS-12 (GS-12.) de 2 ejes, el cual proporciona las siguientes prestaciones y características:
 - Entrega valores de la velocidad angular.
 - Peso: 2,8 gr.
 - Dimensiones: 23 mm x 23 mm x 10 mm.
 - Temperatura de operación: -40° a 85°.
 - Rango de velocidad angular medida: -300°/s.
 - Tensión de operación recomendada: 4,5 V a 5,5 V.

- *Estructura.*

Respecto al material elegido para la fabricación de la estructura se utilizó aluminio 6061 que cumple con las características planteadas anteriormente como material ligero y de rigidez suficiente para mantener firme la estructura.

De acuerdo a los datos arrojados por la herramienta de cálculos físicos de SOLIDWOKRS la estructura final de aluminio que conformará al sistema robótico humanoide tiene un peso de 0.972 Kg; el peso de los servomotores es de 0.054 Kg, sumando un peso total aproximado de 1.944 Kg en la estructura final del sistema humanoide Suchí.

Como siguiente paso para comparar al modelo virtual contra el modelo real, se realiza un pesaje total en una báscula de cada uno de los eslabones maquinados que conforman la estructura, se obtuvo un peso total de 0.998 Kg, y si a este peso se le adiciona el peso de los servomotores, tornillería, así como del cableado en general se obtiene un peso total 1.98 Kg para el sistema robótico.

Tras los datos obtenidos se observa una ligera variación de 36 gramos entre el modelo virtual y el real, la cual puede considerarse prácticamente nula.

3.3. Planta de pie segmentado.

Una característica del pie humano es el arco medial, definido por la relación de la altura del pie (de la articulación talocrural (C. y col., “Tobillo o articulación talocrural: articulación troclear formada por el astrágalo y la región distal de la tibia y el peroné (2a. parte)”) a la planta del pie) a la longitud del punto de palanca del pie (desde articulación talocrural hasta la cabeza de la metatarsianos) (véase fig.3.6).

En un estudio biomecánico que parte de la comparación del pie humano promedio con el de un chimpance promedio (W.J. y R.H.); se hace notar que la relación antropométrica en el ser humano promedio es de $\frac{H_f}{L} = 0,33$. Como se menciona en la introducción de este documento de tesis; dicha relación es la óptima para que el ser humano obtenga las virtudes de velocidad en su marcha.

En el estudio realizado en (Wang y col.) se concluye a partir de la comparación entre el modelo de pie rígido y segmentado; que el andar para un modelo con la longitud del pie pequeña (en relación a la longitud de las piernas) es mas lento en un modelo con los pies segmentados que con un modelo con planta de pies rígidos, sin embargo, la velocidad del modelo de pie segmentado es más grande cuando el pie es de un largo suficiente y sobre todo cuando la relación $\frac{H_f}{L}$ es cercana a 0.3.

De igual relevancia cabe resaltar que el hecho de tener una planta segmentada beneficia tanto a la velocidad de la marcha, como a la estabilidad del sistema. En (Kwon y Park.) se muestra como $\frac{2}{3}$ del peso del cuerpo recae sobre la reacción F_2 y $\frac{1}{3}$ en F_1 ; mecánicamente el peso de esta reacción aumenta en la fase de despliegue del pie en el ciclo de caminado. El segmento del diseño que representa la distancia c en la fig.3.6 cumple la función de distribuir la reacción y con ello brindar más estabilidad al tratar de imitar el andar natural humano.

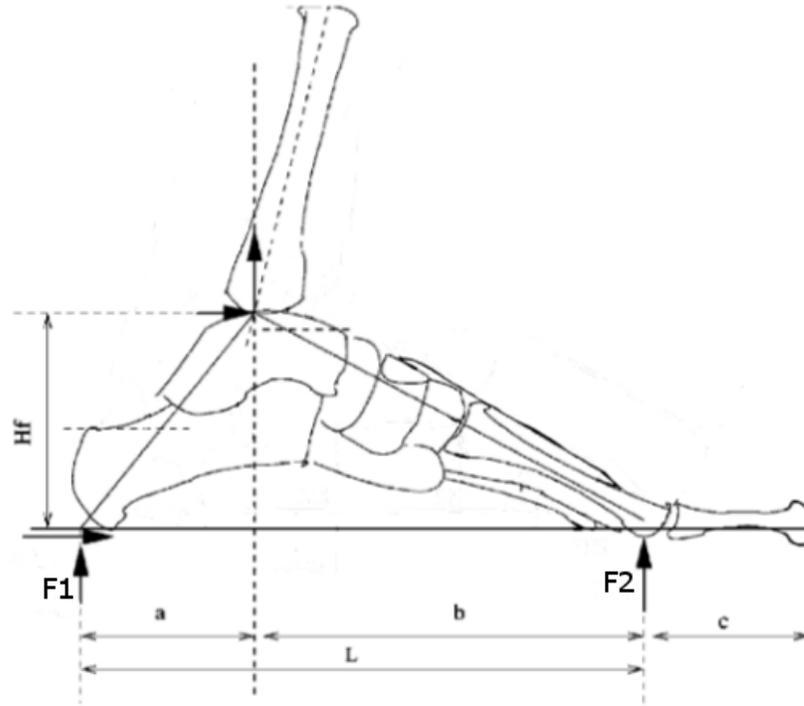


Figura 3.6: Se muestran las medidas de interés un pie humano para el interés del proyecto. (Imagen editada a partir de la "Figure 1" del artículo (Kwon y Park.)).

3.4. Validación mediante una Co-simulación en ADAMS-MATLAB/SIMULINK.

Una vez completo el diseño antropométrico del sistema humanoide, se hace uso de dos herramientas de software para la simulación del sistema. El primero es el software de simulación mecánico MSC ADAMS, el cual ofrece una amplia gama de paneles de herramientas para obtener un amplio análisis de resultados en simulación mecánica. El segundo software de simulación es el software de análisis matemático MATLAB, que brinda de amplias posibilidades para la implementación de controladores, así como obtención y procesamiento de datos. Se puede llevar a cabo una co-simulación entre ambos softwares para cumplir el propósito del proyecto en lo que confiere a la simulación del sistema robótico.

Una co-simulación entre ADAMS y MATLAB/SIMULINK consiste en la construcción de un ambiente de desarrollo para experimentar con un sistema multi cuerpo virtual. Donde ADAMS se encarga de resolver el sistema de ecuaciones diferenciales del sistema mecánico, MATLAB evalúa los parámetros deseados en las ecuaciones de la cinemática inversa para arrojar los ángulos deseados; esto en un entorno a bloques en SIMULINK.

Para dar inicio a la co-simulación se exportó el modelo multicuerpo desarrollado en SOLID-

WORKS, posteriormente en el entorno de ADAMS se implementaron las uniones para que las piezas constituyeran las cadenas de eslabones que conforman el desarrollo cinemático.

Tras establecer el tipo de actuadores para las uniones rotativas; se procedió a configurarlos como entradas del sistema multicuerpo. Si bien es cierto que Adams nos brinda un gran conjunto de variables como salidas de control sólo se toman un acelerómetro y los 18 encoders.

Modelo en SIMULINK.

En el entorno de modelado a bloques que integra MATLAB, se genera un modelo dinámico del sistema multi-cuerpo.

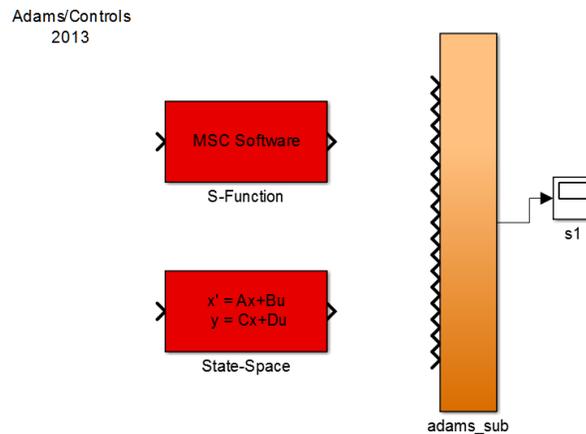


Figura 3.7: Bloques que representan el modelo generado por MSC ADAMS.

El bloque de SIMULINK llamado *adams_sub* (véase fig.3.7) es el archivo exportado desde ADAMS que contiene el modelo dinámico del sistema y todos los parámetros para la simulación. La figura 3.8 muestra el interior del bloque *adams_sub* de bloques que muestran el multiplexor de los datos de entrada para el bloque del modelo dinámico del humanoide y a su vez el demultiplexor para la salida.

Los bloques de *Adams_uout*, *Adams_yout*, *Adams_tout* que se muestran en la figura 3.8 son las entradas, salidas y el tiempo de simulación respectivamente.

Módulo para la generación de trayectorias.

Se implementaron los bloques pertinentes para las ecuaciones que constituyen la generación de trayectorias (véase fig.3.9). Como entradas a estos bloques se tiene el tiempo de simulación, así como los ocho parámetros requeridos para caracterizar el andar del robot. Y como salidas se tienen los parámetros X, Y, Z del marco referencial ubicado en la cadera.

Se crearon posteriormente bloques que contienen los códigos de las ecuaciones desarrolladas para la solución de la cinemática inversa de las cadenas cinemáticas del tren inferior del robot humanoide Suchí (véase fig.3.10, fig.3.11), así como de los brazos (véase fig.3.12).

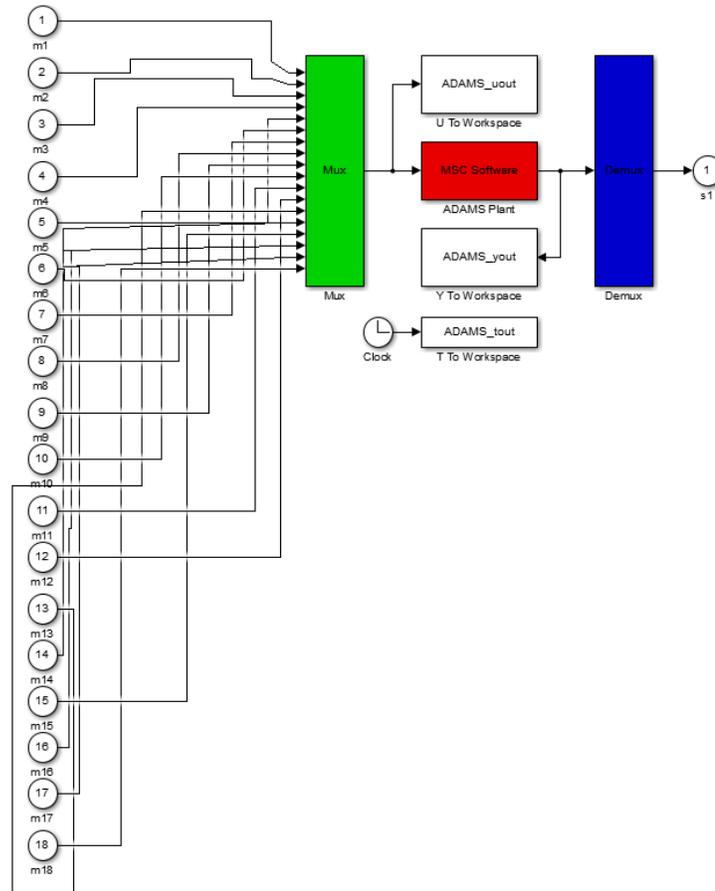


Figura 3.8: Modelo dinámico a bloques del sistema.

Las entradas de los bloques que representan las cadenas cinemáticas del tren inferior vienen dadas por las salidas del sistema generador de trayectorias; y a su vez las salidas de estos bloques son los ángulos necesarios para que roten los actuadores, generando así el andar bípedo en el robot humanoide Suchí.

Los ángulos obtenidos por los bloques de la cinemática inversa, serán entradas para el modelo dinámico del sistema multi cuerpos.

El sistema a bloques que se implementó servirá para realizar pruebas acerca del desempeño de conjunto generador de trayectorias y corroborar el correcto funcionamiento de la cinemática inversa para las cadenas cinemáticas que conforman al sistema robótico.

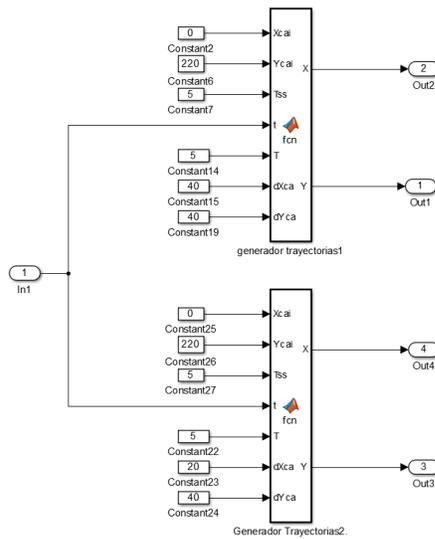


Figura 3.9: Bloques para la generación de trayectorias.

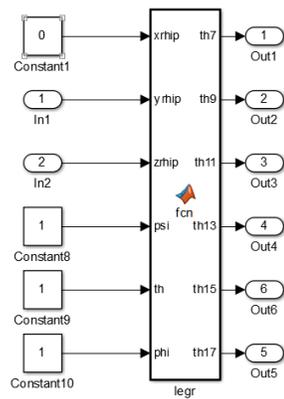


Figura 3.10: Bloques de la cinemática inversa de la pierna izquierda.

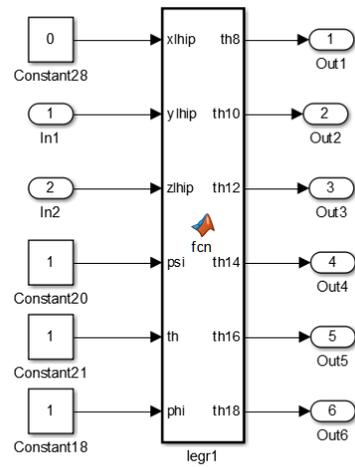


Figura 3.11: Bloques de la cinemática inversa de la pierna derecha.

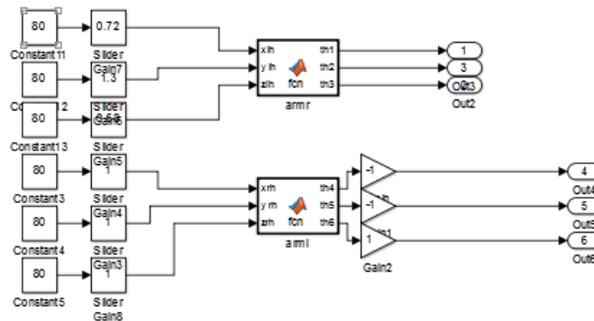


Figura 3.12: Bloques de la cinemática inversa de los brazos.

Capítulo 4

Configuración cinemática.

En este capítulo se muestran los desarrollos matemáticos necesarios para obtener una solución a la cinemática inversa del sistema robótico humanoide Suchí. Herramientas que fueron empleadas en la fase de validación descrita en la metodología planteada para el desarrollo de este proyecto.

4.1. Cinemática de los robots humanoides.

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

- El problema cinemático directo.
- El problema cinemático inverso.

El problema cinemático directo consiste en encontrar la localización relativa de dos eslabones en particular, de acuerdo a la geometría del robot y los valores de sus n articulaciones, mientras que el problema cinemático inverso (IK) es la técnica que permite determinar el movimiento de una cadena de articulaciones para lograr que un actuador final se ubique en una posición concreta (O. y B.).

La principal diferencia en el modelado de los robots humanoides con respecto a los manipuladores está en que el primero posee un marco referencial principal móvil (considerando el andar bajo ciertas condiciones), un marco fijo localizado en el pie de apoyo el cual es fijo durante la duración de un paso y móvil durante el siguiente paso.

Para los robots humanoides que poseen en su estructura al menos cuatro extremidades, las cuales se representan como cuatro cadenas cinemáticas articuladas conectadas como una estructura arborescente. Por lo tanto se desarrolló el modelado cinemático tomando cada una de estas cadenas de forma independiente. Se toma la pelvis del sistema humanoide como marco referencial. Además la pelvis y el tronco se considerarán como un mismo cuerpo rígido.

El problema cinemático directo es crítico para desarrollar algoritmos de coordinación del manipulador del robot por que los valores de las articulaciones son medidos por los sensores montados en las articulaciones, y es necesario calcular los valores de estas articulaciones con respecto a los sistemas asignados. En la práctica, el problema cinemático directo es resuelto calculando la localización del efector final (sistema n), con respecto a la base del robot (sistema 0).

La matriz de transformación A_s para una cadena cinemática abierta se obtiene mediante la multiplicación de las matrices de transformación homogénea ${}^{i-1}A_i$ que describen la localización de cada eslabón. Así, la matriz 0A_n representa la localización del extremo final con respecto a su base:

$${}^0A_n = \prod_{i=1}^{i=n} {}^{i-1}A_i$$

El objetivo de la cinemática inversa es encontrar los valores que deben tomar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. El cálculo de la cinemática inversa es un problema complejo que consiste en la resolución de una serie de ecuaciones cuya solución normalmente no es única. Esto depende de la configuración del robot ya que existen múltiples soluciones.

Al contrario de la cinemática directa, no existe un método sistemático para encontrar la solución de la cinemática inversa. Para robots de pocos GDL (≤ 3), es posible resolver la cinemática inversa por medio de técnicas analíticas como métodos geométricos, desacoplo cinemático o a partir de las mismas matrices de transformación homogénea. Estos métodos son complicados de desarrollar para robots de más de tres GDL. Sin embargo, se han realizado trabajos mediante el uso de algoritmos genéticos, programación no lineal y algoritmos heurísticos para resolver la cinemática inversa de este tipo de robots (M., I. y M.) (A., “Genetic Algorithms for Function Optimization.”). Sin embargo, antes de resolver la cinemática inversa del robot, es necesario plantear las expresiones matemáticas que permiten modelar el problema y así elegir la técnica adecuada.

Para el caso que nos interesa analizar, el sistema robótico cuenta con 18 grados de libertad que se mueven por servomotores Dynamixel AX-12. Cada brazo cuenta con tres motores y cada una de las piernas con seis. Dichos motores son controlados y sincronizados por una tarjeta central de procesamiento. Las cadenas cinemáticas del robot se muestran en la figura 4.1 Los ángulos para cada unión son denotados como θ_i con $i \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 18\}$.

Para resolver la cinemática directa e inversa es necesario localizar los marcos de referencia de las manos y tobillos del robot que son los efectores finales de las cadenas cinemáticas (Σ_{RH} , Σ_{LH} , Σ_{RA} y Σ_{LA}) que se unirán a los marcos colocados en el torso y pelvis respectivamente.

En la figura 4.2 se muestran los marcos de referencia mencionados con el robot en posición vertical, la configuración correspondiente a todos los ángulos de las articulaciones es cero a excepción de $\theta_1 = -90^\circ$, $\theta_3 = -90^\circ$, $\theta_7 = -45^\circ$, $\theta_2 = -90^\circ$, $\theta_4 = 90^\circ$, $\theta_8 = 45^\circ$.

La ubicación exacta de cada articulación está dada por una matriz homogénea que describe la posición y orientación de un marco de referencia conectado a cada parte del cuerpo con origen en la articulación. La ubicación (posición y orientación) de la pelvis (Pel) con respecto al torso está dada por la matriz homogénea (ec.4.1):

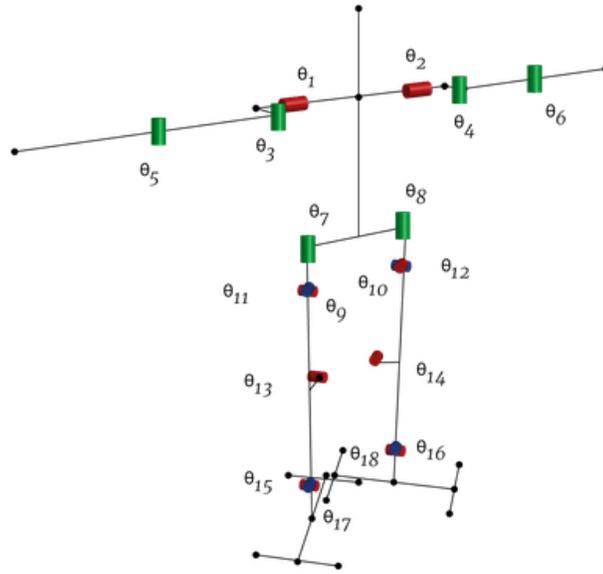


Figura 4.1: Ubicación de las Juntas y sus variables designadas.

$${}^{TO}T_{pel} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -185 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Una vez definidos los marcos referenciales de cada articulación que se muestran en la figura 4.3 se procede a obtener las matrices homogéneas respectivas, ya que son la base para la cinemática directa.

La cinemática directa.

Para los brazos se toma como marco de referencia el centro del torso (TO). Las matrices homogéneas que definen la ubicación de los marcos unidos a las articulaciones del brazo derecho (LR) que se observan en las ecuaciones (ec.(4.1)):

$${}^{TO}T_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -L_0 \\ C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^1T_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -C_3 & -S_3 & 0 & -L_1 \\ S_3 & -C_3 & 0 & -L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^3T_5 = \begin{pmatrix} c_5 & S_5 & 0 & 0 \\ -S_5 & C_5 & 0 & -L_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^5T_{LR} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

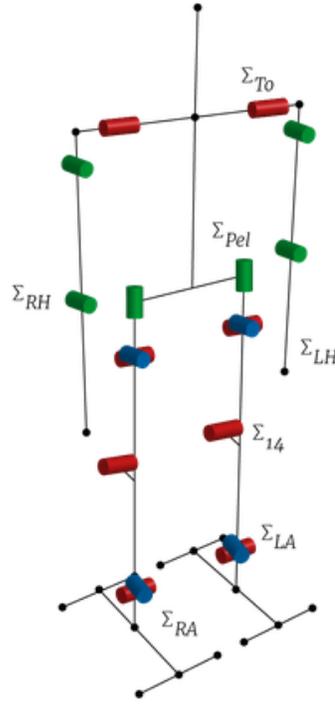


Figura 4.2: Marcos referenciales de la pelvis y las cadenas cinemáticas.

Debido a que las ecuaciones a desarrollar son muy extensas, se simplifican usando la notación:

$$S_i = \sin(\theta_i)$$

$$C_i = \cos(\theta_i)$$

Para el brazo izquierdo (RH) la cadena cinemática es definida por las siguientes matrices que se presentan en las ecs. (4.1):

$${}^{T_0}T_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -L_0 \\ C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^1T_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -C_3 & -S_3 & 0 & -L_1 \\ S_3 & -C_3 & 0 & -L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^3T_5 = \begin{pmatrix} C_5 & S_5 & 0 & 0 \\ -S_5 & C_5 & 0 & -L_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad {}^5T_{RH} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -L_0 \\ C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Para el caso de las piernas su marco referencial es ubicado en la pelvis; cada pierna tiene seis grados de libertad por lo que habrá seis matrices homogéneas para especificar la estructura de la cadena cinemática. En primer lugar en las ecuaciones ec.(4.1) se presentan las matrices para la pierna derecha (RA):

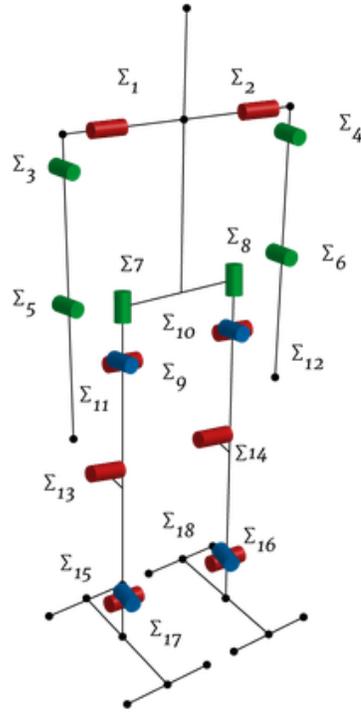


Figura 4.3: Marcos referenciales de las uniones.

$$\begin{aligned}
 {}^{pel}T_7 &= \begin{pmatrix} -C_7 & S_7 & 0 & -L_5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S_7 & -C_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^7T_9 &= \begin{pmatrix} 0,707C_9 & 0,707S_9 & -0,707 & 0 \\ 0,707C_9 & 0,707S_9 & 0,707 & 0 \\ S_9 & -C_9 & 1 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 {}^9T_{11} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ C_{11} & -S_{11} & 0 & 0 \\ -S_{11} & -C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^{11}T_{13} &= \begin{pmatrix} -C_{13} & -S_{13} & 0 & -L_7 \\ S_{13} & -C_{13} & 0 & -L_8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 {}^{13}T_{15} &= \begin{pmatrix} -S_{15} & C_{15} & 0 & L_7 \\ -C_{15} & -S_{15} & 0 & -L_8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^{15}T_{17} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ C_{17} & -S_{17} & 0 & 0 \\ -S_{17} & -C_{17} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 {}^{17}T_{RA} &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

Para el caso de la pierna izquierda (LA) las matrices homogéneas mostradas en las ecuaciones ec.(4.1) son las que describen la ubicación de cada articulación.

$$\begin{aligned}
{}^{Pel}T_8 &= \begin{pmatrix} C_8 & -S_8 & 0 & L_5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_8 & C_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^8T_{10} &= \begin{pmatrix} -0,707C_{10} & -0,707S_{10} & -0,707 & 0 \\ 0,707C_{10} & 0,707S_{10} & -0,707 & 0 \\ S_{10} & -c_{10} & 1 & -L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
{}^{10}T_{12} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & 0 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^{12}T_{14} &= \begin{pmatrix} C_{14} & S_{14} & 0 & -L_7 \\ -S_{14} & C_{14} & 0 & L_8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
{}^{14}T_{16} &= \begin{pmatrix} C_{16} & -C_{16} & 0 & -L_7 \\ C_{16} & S_{16} & 0 & -L_8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^{16}T_{18} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ C_{18} & -S_{18} & 0 & 0 \\ S_{18} & C_{18} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
{}^{18}T_{LA} &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)
\end{aligned}$$

Con el fin de realizar el modelado directo para las piernas, las matrices ${}^{Pel}T_i$ con $i \in \{7, 9, \dots, 17\}$ e $i \in \{8, 10, \dots, 18\}$ deberán ser multiplicadas respectivamente. Los elementos de las matrices T_9^7 y T_{10}^8 hacen que la tarea resulte sumamente engorrosa. Por esta razón los motores 7 y 8 son rotados a 45° .

Con el fin de simplificar la cinemática inversa se introducirán variables abreviadas. Para la pierna derecha, se considera la relación de la ecuación 4.6:

$$\theta'_7 = \theta_7 + 45^\circ \Rightarrow \theta_7 = \theta'_7 - 45^\circ \quad (4.6)$$

Obteniendo así:

$${}^{Pel}T_9 = {}^{Pel}T_7^7 T_9 = \begin{pmatrix} -C_7' C_9 & -C_7' S_9 & S_7' & -L_5 \\ -S_9 & C_9 & 0 & -L_6 \\ -S_7' C_9 & -S_7' S_9 & -C_7' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Donde el termino 0.707 en 7T_9 desaparecerá. Para el caso de la pierna derecha se introducirá la variable θ'_8 .

$$\theta'_8 = \theta_8 - 45^\circ \Rightarrow \theta_8 = 45^\circ + \theta'_8. \quad (4.7)$$

Obteniendo así:

$${}^{Pel}T_8 = {}^{Pel}T_8^8 T_{10} = \begin{pmatrix} -C_8' C_{10} & -C_8' S_{10} & S_8' & L_5 \\ -S_{10} & C_{10} & 0 & L_6 \\ -S_8' C_{10} & -S_8' S_{10} & -C_8' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Cinemática inversa del humanoide.

Para que un robot humanoide sea capaz de realizar una variedad de tareas, como la de locomoción. Para ello es necesario especificar a cada una de las extremidades su trayectoria en el espacio cartesiano de trabajo. El método propuesto en este documento resuelve el problema de la cinemática inversa de manera explícita para el robot humanoide Suchí, donde se propone encontrar los ángulos requeridos de cada extremidad con el fin de obtener la ubicación deseada.

Como se explicó anteriormente, el problema cinemático inverso consiste en encontrar los ángulos de las articulaciones que resuelven una ubicación particular de determinada extremidad del robot.

$$\theta = g(x)$$

Para el caso de un robot humanoide Suchí, se resolverán 2 problemas de cinemática inversa: Ambos brazos y la pelvis con respecto a cada pie.

Cinemática inversa para brazos.

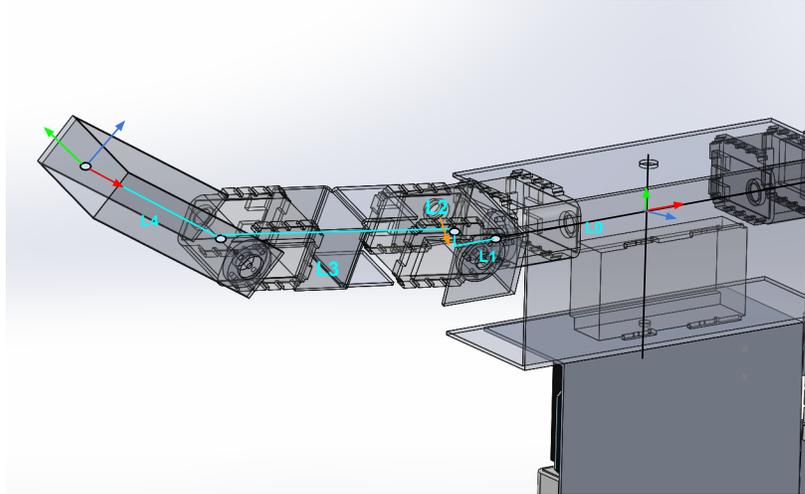


Figura 4.4: Longitudes de los eslabones y sus variables designadas.

En primer lugar vamos a resolver la cinemática inversa para el brazo derecho. En la fig.4.4 y fig.4.5 se muestran las longitudes y los ángulos del brazo derecho. Y_{RA} es el ángulo interno del codo. Desde la vista lateral en la fig.4.6 es posible observar que:

$$\theta_1 = \text{atan2}(y_{RH}, z_{RH}) \quad (4.8)$$

$$s = \sqrt{z_{RH}^2 + y_{RH}^2} - L_2 \quad (4.9)$$

$$t = -x_{RH} - L_0 - L_1 \quad (4.10)$$

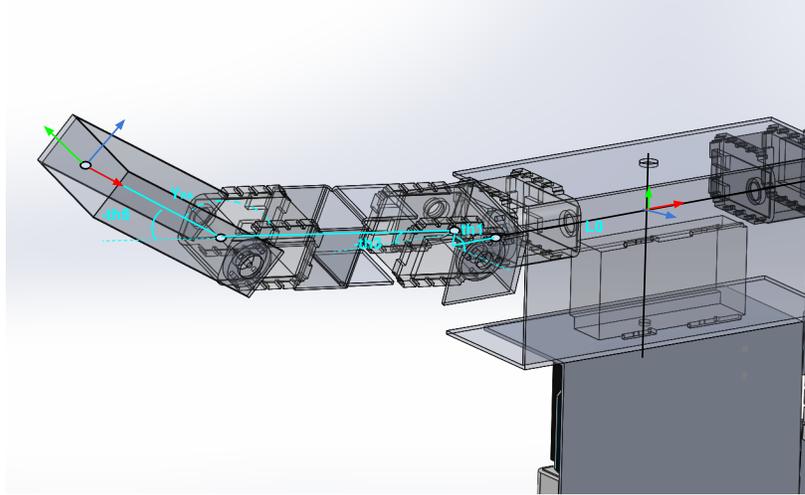


Figura 4.5: Ubicación de las articulaciones y sus variables designadas.

$$L_{RA} = \sqrt{s^2 + t^2}, \quad (4.11)$$

Y desde una vista en perspectiva mostrada en la fig.4.6 donde se observan las longitudes como en la fig.4.4. podemos notar que aplicando la ley del coseno al triángulo formado por el brazo y el antebrazo podemos calcular el ángulo interno del codo, como se muestra:

$$\cos(Y_{RA}) = \frac{L_{RA}^2 - L_3^2 - L_4^2}{2L_3L_4} \quad (4.12)$$

$$\cos(180^\circ + \theta_5) = \frac{L_{RA}^2 - L_3^2 - L_4^2}{1L_3L_4} \equiv -C_5 \quad (4.13)$$

$$\theta_5 = -atan2(\sqrt{1 - C_5^2}, C_5) \quad (4.14)$$

Con el fin de calcular θ_3 podemos utilizar los dos ángulos auxiliares Y_1 y Y_2 mostrado en la fig.4.8. El primer ángulo está formado por t , L_{RA} y el segundo está formado por la continuación del brazo L_3 y L_{RA} (vease fig.4.6). Los mismos triángulos son mostrados en ambas figuras; la segunda vista es perpendicular al plano del triángulo. De la fig.4.8 tenemos que:

$$\gamma_1 = atan2(s, t); \quad (4.15)$$

$$\gamma_2 = atan2(L_4 \sin(\theta_5), L_3 + L_4 \cos(\theta_5)); \quad (4.16)$$

y

$$\theta_3 = -(\gamma_1 - \gamma_2) \quad (4.17)$$

La cinemática inversa para el brazo derecho se resuelve con las ecuaciones: 4.8, 4.14, 4.17 evaluadas en las ecuaciones 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.15, 4.16.

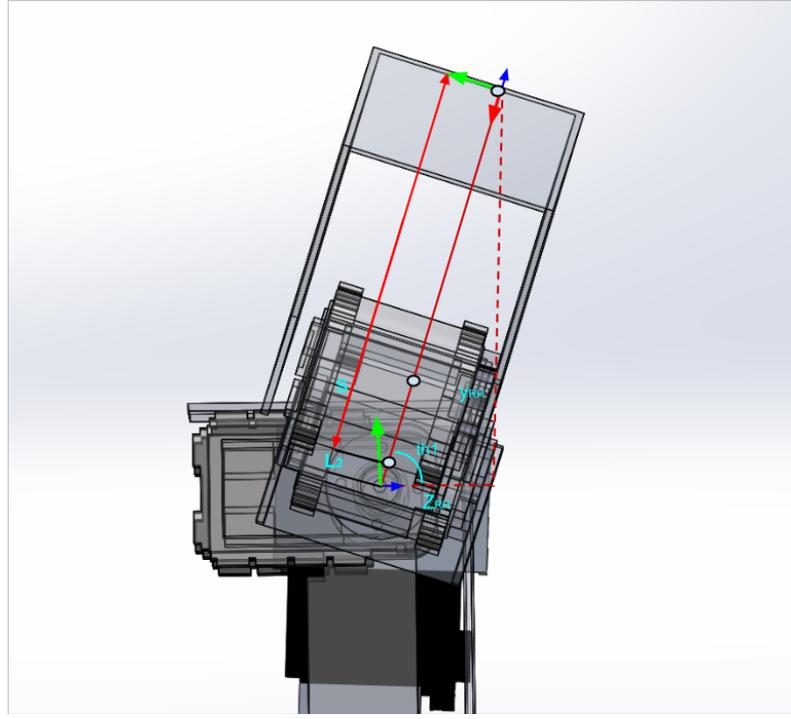


Figura 4.6: Ubicación de los eslabones y sus variables designadas (perspectiva lateral).

El análisis para resolver la cinemática inversa para el brazo izquierdo es similar a la del izquierdo, y la solución obtenida es:

$$\theta_2 = \text{atan2} \quad (4.18)$$

$$\theta_3 = -(\gamma_1 - \gamma_2) \quad (4.19)$$

$$\theta_6 = -\text{atan2}(\sqrt{1 - C_6^2}, C_6) \quad (4.20)$$

Con

$$C_6 = \frac{L_L^2 A - L_3^2 - L_4^2}{2L_3 L_4}$$

$$S = \sqrt{z_L^2 H + y_L^2 H - L_2}$$

$$t = x_L H - L_0 - L_1$$

$$L_L A = \sqrt{s^2 + t^2}$$

$$\gamma_1 = \text{atan2}(s, t); \quad (4.21)$$

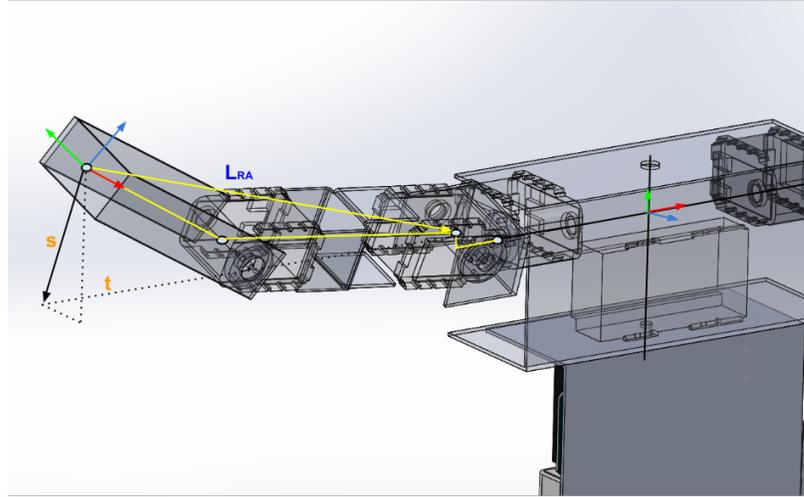


Figura 4.7: Ubicación de las variables designadas para simplificar el desarrollo de la cinemática inversa.

$$\gamma_2 = \text{atan2}(L_4 \sin(\theta_6), L_3 + L_4 \cos(\theta_6)). \quad (4.22)$$

Por lo tanto, la solución a la cinemática inversa para el brazo izquierdo es dada por Eq. 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22.

La cinemática inversa de la pelvis.

Para el caso de las piernas vamos a empezar por resolver el problema cinemático inverso de donde obtendremos las expresiones para los ángulos de la pierna derecha para localizar la pelvis con respecto al tobillo derecho.

Para hacer esto vamos a utilizar el desacople cinemático, una metodología presentada en (M., M. y MacDorman.) que consiste resumidamente en la solución de los tres primeros GDL del posicionamiento deseado y los últimos tres de la orientación deseada. Aplicándolo a las piernas del sistema humanoide Shuchí, el método consistirá en las siguientes etapas:

- Calcular la matriz de rotación de los ángulos deseados: pitch, roll, yaw.
- Calcular la ubicación de la cadera en la posición deseada de la pelvis y su rotación.
- Calcular los tres primeros ángulos de rotación del marco de referencia para llegar a posición de la cadera.
- Calcular los tres últimos ángulos de rotación del marco de referencia para llegar a la orientación de la pelvis.

Si se analiza la fig.4.9 se observa que tenemos que agregar un marco de referencia a las caderas con la misma orientación de el marco de referencia de la pelvis. De lo anterior se puede escribir la relación de la ecuación 4.23.

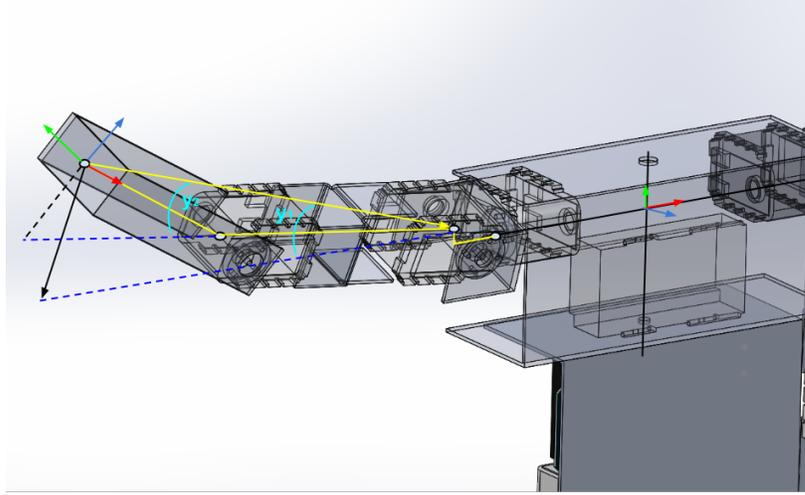


Figura 4.8: Ubicación de los eslabones y sus variables designadas.

$${}^{RA}r_{pel} = {}^{RA}r_{Hip} + {}^{RA}r_{RHip-Pel} \quad (4.23)$$

Donde todos los vectores tienen como referencia el marco del tobillo derecho. Se observa que $r_{RHip-pel}$ es un vector con valor constante conocido y calculando el mismo vector con respecto a el tobillo obtenemos que:

$${}^{RA}r_{RHip-Pel} = {}^{RA}R_{Pel} {}^{Pel}r_{RHip-Pel} \quad (4.24)$$

$${}^{Pel}r_{RHip-Pel} = \begin{pmatrix} L_5 \\ L_6 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

La matriz ${}^{RA}R_{pel}$ es calculada a partir de los ángulos pitch, roll, yaw, usando la convención pitch, roll, yaw (θ, ϕ, ψ) con lo cual la matriz quedaría como:

$$R = R(\theta, x)R(\phi, z)R(\psi, y) = \begin{pmatrix} C_\phi C_\psi & -S_\phi & C_\phi S_\psi \\ S_\theta S_\phi + C_\theta S_\phi C_\psi & C_\theta C_\phi & -S_\theta C_\phi + C_\theta S_\phi S_\psi \\ -C_\theta S_\phi + S_\theta S_\phi C_\psi & S_\theta C_\phi & S_\theta S_\phi S_\psi \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

Ahora se sustituye ec.4.25 en la ec.4.24, obtendremos:

$${}^{RA}r_{RHip} = {}^{RA}r_{pel} - {}^{RA}R_{pel} {}^{Pel}r_{RHip-Pel} \equiv \begin{pmatrix} x_{RHip} \\ y_{RHip} \\ z_{RHip} \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

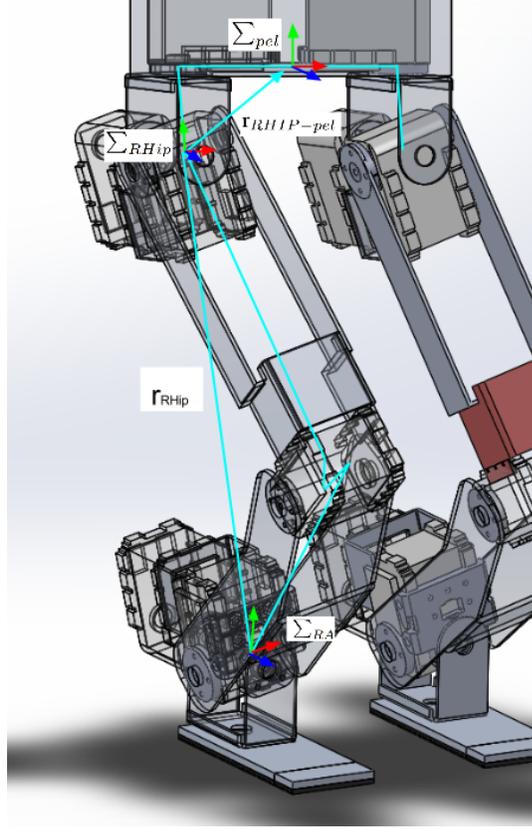


Figura 4.9: Cinemática inversa de la pierna derecha: marcos referenciales y vectores resultantes que indican la distancia entre ellos.

De la ec.4.27 es posible resolver el primero de los tres ángulos de la pierna con un método similar al usado para los brazos. De fig.4.10 tenemos que el primer ángulo del tobillo depende de la posición vertical y horizontal de la cadera, como:

$$\theta_{17} = -atan2(Z_{RH}, X_{RH}) \quad (4.28)$$

La fig.4.11 muestra que el triángulo de la pierna en vista lateral, aplicando la ley de los cosenos a este triángulo, tenemos:

$$\cos(\gamma) = \frac{L_{RLeg}^2 - 2L_f^2}{2L_f^2} \equiv C_\gamma; \quad (4.29)$$

con:

$$L_{RLeg} = \sqrt{x_{RHip}^2 + y_{RHip}^2 + z_{RHip}^2}, L_f = \sqrt{L_7^2 + L_8^2}, \alpha = atan2(L_8, L_7) \quad (4.30)$$

De la ec.4.28 evaluada en la ec.4.29, es posible obtener el ángulo interno de la rodilla.

$$\gamma = -atan2(\sqrt{1 - C_\gamma^2}, C_\gamma), \quad (4.31)$$

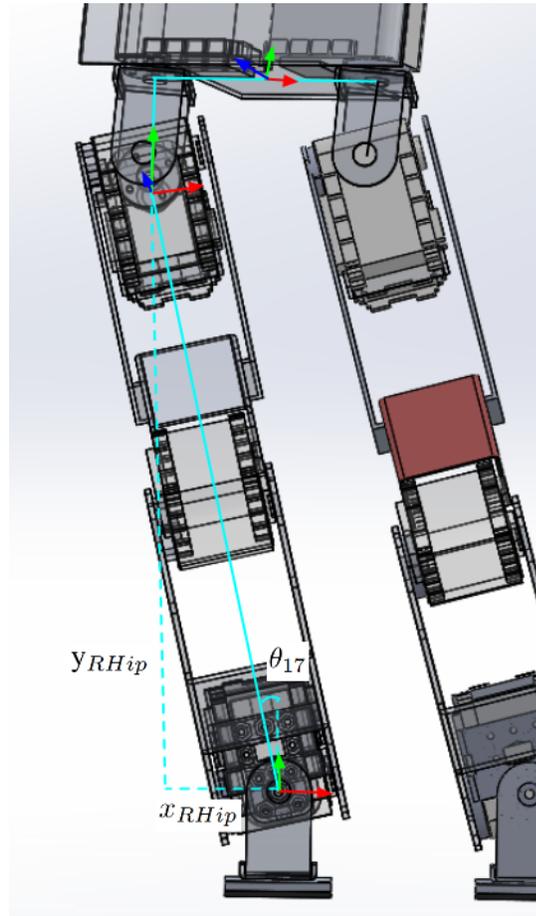


Figura 4.10: Pierna derecha: Vista frontal.

y finalmente para calcular θ_{13} (Como puede observarse gráficamente en la fig.(4.11, 4.12))

$$\theta_{13} = -(\gamma - 2\alpha). \quad (4.32)$$

Una vez calculado el primer ángulo de la rodilla y el primero del tobillo, solo falta por calcular el segundo ángulo del tobillo. El cual es θ_{15} como se observa en la figura 4.13:

$$\theta_{15} = -\left(\beta - \frac{\gamma}{2} - \alpha\right) \quad (4.33)$$

Con:

$$\beta = -atan2(Z_{RHip}L_{RLeg}^1)$$

$$L_{RLeg}^1 = \sqrt{x_{RHip}^2 + y_{RHip}^2}$$

La posición de la cadera respecto al tobillo derecho se obtiene con ángulos calculados en ecs.(4.28), (4.32), (4.33) valuados en las ecs. (4.29), (4.30), (4.31)). Basados en las ecs.(4.25), (4.26), (4.27)

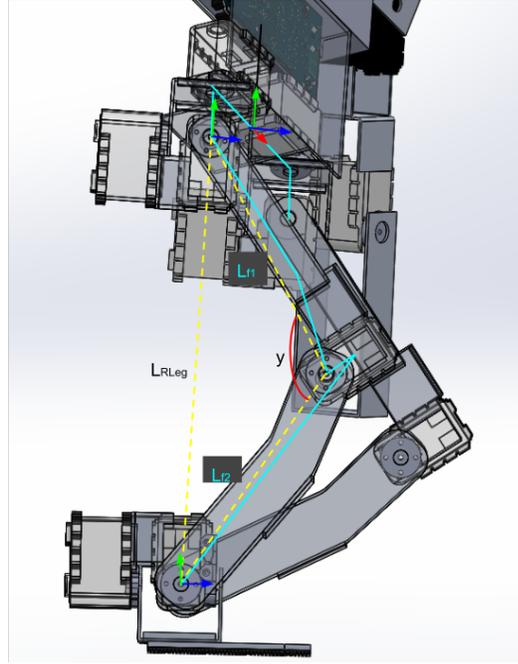


Figura 4.11: Ubicación de los eslabones y sus variables designadas para el análisis de la cinemática inversa.

podemos ver (si la orientación es la adecuada) que esta orientación produce la posición deseada de la pelvis.

Esta orientación es producida para los tres ángulos restantes θ_{11} , θ_9 , θ_7 , que puede ser calculada como sigue: La orientación de la pelvis es dada por:

$${}^{RA}R_{Pel} \equiv {}^{RA}R_{17} {}^{17}R_{15} {}^{15}R_{13} {}^{13}R_{11} {}^{11}R_{09} {}^{09}R_{pel} {}^{07'}R_{Pel} \equiv {}^{RA}R_{11} {}^{11}R_{Pel} \quad (4.34)$$

Con:

$${}^{RA}R_{11}(\theta_{17}, \theta_{15}, \theta_{13}) = {}^{RA}R_{17} {}^{17}R_{15}^R(\theta_{17}) {}^{15}R_{13}(\theta_{15}) {}^{13}R_{11}(\theta_{13}) \quad (4.35)$$

$${}^{11}R_{pel}(\theta_{11}, \theta_{09}, \theta_{07'}) = {}^{11}R_{09}(\theta_{19}) {}^{09}R_{pel}(\theta_9) {}^{07'}R_{pel}(\theta_{7'}) \quad (4.36)$$

Los ángulos deseados (pitch, roll y yaw) de la pelvis en la matriz ${}^{RA}R_{pel}$ y ${}^{RA}R_{11}$ pueden ser calculados directamente dado que $\theta_{17}, \theta_{15}, \theta_{13}$ están definidos. Ahora se puede calcular ${}^{11}R_{pel}$ como sigue:

$${}^{11}R_{pel} = {}^{11}R_{RA} {}^{RA}R_{pel} \quad (4.37)$$

Con ${}^{11}R_{RA} = [{}^{RA}R_{11}]^T$ y aplicando el método presentado en (V., K. y O.). Este método consiste en resolver los valores de la matriz que se muestra en la ec.4.26. Con esto se puede calcular los ángulos que arroja la matriz de rotación ${}^{RA}R_{Pel}$ como:

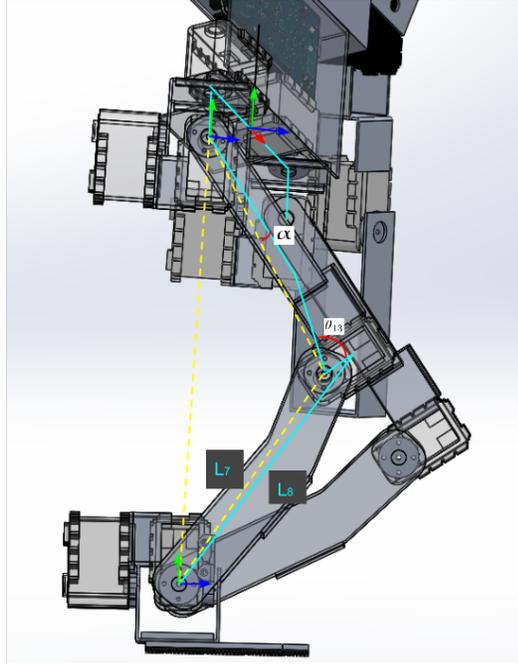


Figura 4.12: Ubicación de los eslabones y sus variables designadas para el análisis de la cinemática inversa.

$$\theta_9 = \begin{cases} \text{atan2}(-R_{12}, \sqrt{1 - R_{12}^2}) & \text{if } R_{12} \neq 0, \\ 0 & \text{if } R_{12} \equiv 0 \end{cases}$$

$$\theta_{11} = \begin{cases} \text{atan2}(R_{32}, R_{22}) & \text{if } R_{12} \neq 1, \\ \text{atan2}(R_{31}, R_{21}) & \text{if } R_{12} \equiv 1 \end{cases}$$

$$\theta_{7'} = \begin{cases} \text{atan2}(R_{13}, R_{11}) & \text{if } R_{12} \neq 1, \\ 0 & \text{if } R_{12} \equiv 1 \end{cases}$$

Con

$$\begin{aligned} R_{11} &= -s_{13+15}(C_\theta S_\psi - S_\theta S_\phi C_\psi) - C_{13+15}(S_{17}C_\psi C_\phi - C_{17}(C_\theta S_\phi C_\psi)) \\ R_{12} &= S_{13+15}S_\theta C_\psi + C_{13+15}(S_{17}S_\psi + C_{17}C_\theta S_\phi) \\ R_{13} &= S_{13+15}(C_\theta C_\psi + S_\theta S_\psi S_\phi) - C_{13+15}(S_{17}C_\phi S(\psi) + C_{17}(S_\theta C_\psi + C_{17}(S_\theta C_\psi - C_\theta S_{psi} S_{phi}))) \\ R_{21} &= S_{13+15}(S_{17}C_\phi C_\psi - C_{17}(S_\theta S_\psi) + C_\theta S_\phi C_\psi) - C_{13+15}(C_\theta S_\psi - S_\theta S_\psi S_\phi) \\ R_{22} &= -S_{13+15}(S_{17}S_\phi + C_{17}C_\theta S_\phi) + C_{13+15}S_\theta C_\phi \\ R_{31} &= S_{17}(S_\theta S_\psi + C_\theta S_\phi C_\psi) + C_{17}C_\phi C_\psi \\ R_{32} &= S_{17}C_\theta S_\phi + C_{17}S_\phi \end{aligned} \quad (4.38)$$

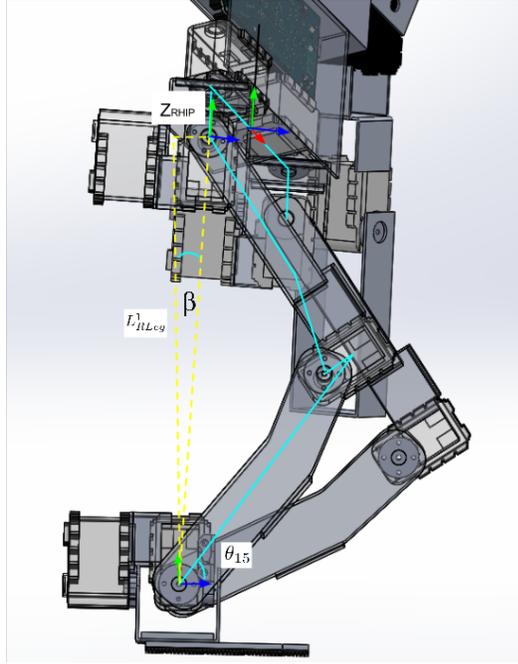


Figura 4.13: Ubicación de los eslabones y sus variables designadas para el análisis de la cinemática inversa.

Se deberán sustituir los valores de las ecs.4.34,4.35, 4.36, 4.37 en la ec.4.1 y con esto se completará la solución de la cinemática inversa para localizar la pelvis respecto a el tobillo derecho en posición y orientación.

La solución para la localización de la pelvis con respecto a la del tobillo izquierdo es similar a la presentada previamente para la pierna derecha. Las fórmulas principales se muestran a continuación:

$${}^{LA}r_{RHip} = {}^{LA}r_{pel} - {}^{LA}R_{Pel} {}^{Pel}r_{LHip-Pel} \equiv \begin{pmatrix} x_{LHip} \\ y_{LHip} \\ z_{LHip} \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

Donde ${}^{LA}r_{Pel}$ en la posición deseada de la pelvis con respecto al tobillo derecho, ${}^{LA}R_{Pel}$ proviene de los ángulos de orientación deseados usando ec.4.26 y

$${}^{Pel}r_{LHip-Pel} = (-L_5, L_6, 0)^T \quad (4.40)$$

Los tres ángulos localizados en la cadera derecha en una posición dada se calculan con ec.4.39 y son calculadas por:

$$\theta_{18} = -atan2(Z_{LH}, X_{LH}), \theta_{14} = (\gamma - 2\alpha), \theta_{16} = (\beta - \frac{\gamma}{2} - \alpha) \quad (4.41)$$

Con

$$\begin{aligned}
L_{LLeg} &= \sqrt{x_{LHip}^2 + y_{LHip}^2 + z_{LHip}^2} \\
L_f &= \sqrt{L_7^2 + L_8^2} \\
\alpha &= \text{atan2}(L_8, L_7) \\
\gamma &= \pi - \text{atan2}(\sqrt{1 - C_\gamma^2}, C_\gamma) \\
\beta &= -\text{atan2}(Z_{LHip}, L_{LLeg}^1), L_{LLeg}^1 = \sqrt{X_{LHip}^2 + Y_{LHip}^2}
\end{aligned} \tag{4.42}$$

Los tres ángulos de orientación se calculan de una manera similar como se realizó anteriormente:

$$\theta_{10} = \begin{cases} \text{atan2}(-R_{12}, \sqrt{1 - R_{12}^2}) & \text{if } R_{12} \neq 0, \\ 0 & \text{if } R_{12} \equiv 0 \end{cases} \tag{4.43}$$

$$\theta_{12} = \begin{cases} \text{atan2}(R_{32}, R_{22}) & \text{if } R_{12} \neq 1, \\ \text{atan2}(R_{31}, R_{21}) & \text{if } R_{12} \equiv 1 \end{cases} \tag{4.44}$$

$$\theta_{8'} = \begin{cases} \text{atan2}(R_{13}, R_{11}) & \text{if } R_{12} \neq 1, \\ 0 & \text{if } R_{12} \equiv 1 \end{cases} \tag{4.45}$$

$$\begin{aligned}
R_{11} &= -s_{14+16}(C_\theta S_\psi - S_\theta S_\phi C_\psi) - C_{14+16}(S_{18} C_\psi C_\phi - C_{18}(C_\theta S_\phi C_\psi)) \\
R_{12} &= S_{14+16} S_\theta C_\psi + C_{14+16}(S_{18} S_\psi + C_{18} C_\theta S_\phi) \\
R_{13} &= S_{14+16}(C_\theta C_\psi + S_\theta S_\psi S_\phi) - C_{14+16}(S_{18} C_\phi S(\psi) + C_{18}(S_\theta C_{psi} + C_{18}(S_\theta C_\psi - C_\theta S_{psi} S_{phi})) \\
R_{21} &= S_{14+16}(S_{18} C_\phi C_\psi - C_{18}(S_\theta S_\psi) + C_\theta S_\phi C_\psi) - C_{14+16}(C_\theta S_\psi - S_\theta S_\psi S_\phi) \\
R_{22} &= -S_{14+16}(S_{18} S_\phi + C_{18} C_\theta S_\phi) + C_{14+16} S_\theta C_\phi \\
R_{31} &= S_{18}(S_\theta S_\psi + C_\theta S_\phi C_\psi) + C_{18} C_\phi C_\psi \\
R_{32} &= S_{18} C_\theta S_\phi + C_{18} S_\phi \tag{4.46}
\end{aligned}$$

La solución analítica explícita para la ubicación de la pelvis en posición y orientación con respecto con el tobillo izquierdo está dada por las ecs.4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 con valores evaluados en la ecuación 4.1.

La solución para las dos piernas que se presentan en estos párrafos será útil para la localización de la pelvis en la posición deseada y la orientación cuando el robot está de pie, ya sea en su pie izquierdo o su pie derecho y también para las fases de apoyo dobles. Sin embargo, para caminar y en general para la locomoción resulta necesario localizar el pie libre (no el pie de soporte) con respecto a la pelvis como se verá a continuación.

Cinemática inversa del tobillo.

De los ángulos pitch, yaw y roll que describen la orientación deseada del marco de referencia ubicado en el tobillo, se puede calcular de matriz de rotación ${}^{Pel}R_{RA}$ utilizando la ecuación 4.26. Considerando también la posición deseada del tobillo respecto a la pelvis, se puede formar la matriz homogénea:

$${}^{Pel}H_{RA} \equiv \begin{pmatrix} {}^{Pel}R_{RA} & r_{pel \rightarrow RA} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

E invirtiendo esta matriz, se tiene:

$${}^{RA}H_{Pel} \equiv \begin{pmatrix} ({}^{Pel}R_{RA})^T & -[{}^{Pel}R_{RA}]^T {}^{Pel}r_{pel \rightarrow RA} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^{Pel}R_{RA} & {}^{RA}r_{RA \rightarrow Pel} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.47)$$

En la ecuación 4.47 vemos que con el paso anterior el problema de localizar el tobillo derecho con respecto a la pelvis se ha cambiado a la localización de la pelvis con respecto al tobillo derecho. Para ello es posible aplicar el mismo método para este caso.

Lo mismo se puede aplicar a la pierna izquierda. Esto es, convertir la ubicación deseada del tobillo con respecto a la pelvis en la ubicación deseada de la pelvis con respecto al tobillo:

$${}^{RA}H_{Pel} \equiv \begin{pmatrix} [{}^{Pel}R_{RA}]^T & -[{}^{Pel}R_{RA}]^T {}^{Pel}r_{pel \rightarrow RA} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^{Pel}R_{RA} & {}^{RA}r_{RA \rightarrow Pel} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4.2. Generación de trayectorias para el andar.

El patrón de caminar propuesto se compone de dos movimientos básicos:

1. Avance.
2. Equilibrio.

El primero es alcanzado en la fase de apoyo simple (SSP) y la segunda fase se completa en la fase de apoyo doble (DS). Los movimientos son especificados como desacoples, además cada uno inicia y termina con una velocidad, así como, aceleración en cero.

Avance.

El avance del robot es llevado en el plano sagital, en este la componente horizontal y vertical del marco de referencia de la cadera se definen en un periodo T_{ss} por las siguientes funciones:

$$X_{CA} = X_{CA,Ini} + \delta X_{CA} * \left(\frac{t}{T_{ss}} - \frac{1}{2 * \pi} * \text{sen}\left(\frac{2 * \pi * t}{T_{ss}}\right) \right) \quad (4.48)$$

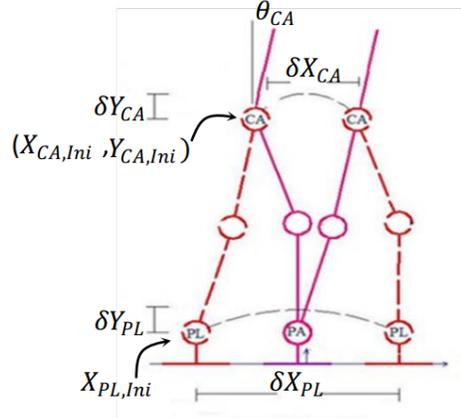


Figura 4.14: Parámetros para las trayectorias de la cadera y del pie libre.

$$Y_{CA} = \begin{cases} Y_{CA} = Y_{CA,Ini} + \delta Y_{CA} * \left(\frac{2t}{T_{ss}} - \frac{1}{2*\pi} * \text{sen}\left(\frac{2*\pi*t}{T_{ss}}\right) \right) & \text{if } t \leq \frac{T_{ss}}{2} \\ Y_{CA} = Y_{CA,Ini} + \delta Y_{CA} * \left(1 - \frac{(2t-T)}{T_{ss}} - \frac{1}{2*\pi} * \text{sen}\left(\frac{2*\pi*(2t-T)}{T_{ss}}\right) \right) & \text{if } t > \frac{T_{ss}}{2} \end{cases} \quad (4.49)$$

La ecuación (4.48) especifica un avance cicloidal, mientras que la ecuación (4.49) describe los movimientos cicloidales de ascenso y descenso.

La idea básica para resolver la cinemática inversa es considerar las piernas del robot como dos cadenas cinemáticas moviéndose en el plano sagital, cada una con 3 GDL. La cadena va desde el pie de apoyo (PA) a la cadera (CA). Los valores de las variables del pie de apoyo (θ_{11} , θ_{13} , θ_{15} , para el soporte del pie derecho) se obtienen con el fin de determinar el movimiento de la cadera y orientación deseada del tronco en el plano sagital. Después de esto las variables comunes de la pierna en movimiento (θ_{12} , θ_{14} , θ_{16}) se resuelven para obtener la posición deseada del pie libre en el plano sagital. El θ_{CA} de orientación del tronco es un parámetro constante del patrón de caminado (ver fig.4.14).

Balaceo

Este movimiento se establece mediante la orientación $\delta\theta$ de las piernas con respecto a una línea normal al suelo (véase figura 4.15), y el periodo T_{DS} correspondiente a la fase de apoyo doble. El movimiento es realizado de manera que se desplace la proyección vertical del centro de masa de un pie al otro durante cada fase de doble soporte.

Las uniones involucradas en el balaceo son θ_j , con $j = 9, 10, 17, 18$. Esos valores son especificados por funciones cicloidales. Entonces, para mover de la posición C_1 a la posición C_2 , tenemos:

$$\theta_j(t) = \epsilon\delta\theta\left(\frac{t}{T_{DS}} - \frac{1}{2\pi}\text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T_{DS}}\right)\right) \quad (4.50)$$

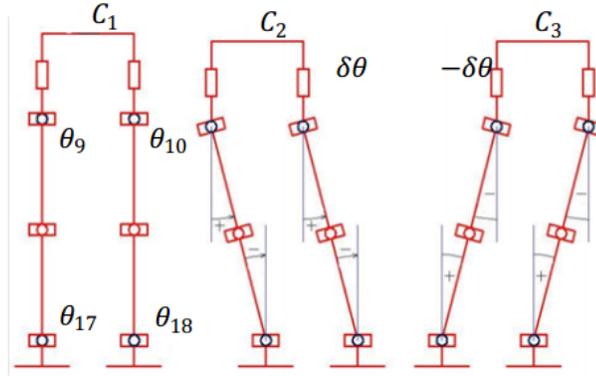


Figura 4.15: Rotación de las piernas en el plano frontal.

Con $\epsilon = 1$. Para el caso de el medio paso hacia la izquierda (De C_1 a C_3), la misma función 4.9 es aplicada. En este caso definiremos $\epsilon = -1$. Una oscilación media de C_1 a C_2 o a C_3 es usada para dejar la configuración inicial C_1 del robot antes del primer paso de caminado. Por otro lado, una oscilación media desde C_2 o desde C_3 hacia C_1 es alcanzado para llegar a la configuración inicial después del último paso.

Para todos los pasos intermedios, el balanceo sera de C_2 a C_3 (paso izquierdo), y de C_3 a C_2 (paso derecho). En ambos casos las trayectorias de las uniones son especificadas por:

$$\theta_j(t) = \epsilon(\delta\theta - 2\delta\theta\frac{t}{T_{DS}} - \frac{1}{2\pi}\text{sen}(\frac{2\pi t}{T_{DS}})) \quad (4.51)$$

En la ecuación 4.2 para el paso izquierdo, se define $\epsilon = 1$ si $j = 9, 10$ y $\epsilon = -1$ si $j = 17, 18$. Cuando el balanceo es de derecha a izquierda, en el movimiento de C_3 a C_2 los signos de ϵ son permutados.

Los parámetros que se requieren para la generación de trayectorias son la posición inicial de la cadera y del pie libre ($X_{CA,Ini}$, $Y_{CA,Ini}$, $X_{PL,Ini}$), sus respectivos desplazamientos (δX_{CA} , δY_{CA} , δX_{PL} , δY_{PL}) en las direcciones x_M y y_M , la orientación θ_{CA} del tronco en el plano sagital, en máximo desplazamiento angular en el plano frontal $\delta\theta$, y los periodos T_{SS} para el avance y T_{DS} para el balanceo.

Para obtener un andar simétrico, el desplazamiento horizontal de la cadera en el plano sagital debe ser la mitad del desplazamiento horizontal del pie libre. Además, la posición inicial del pie libre y de la cadera debe ubicarse a la mitad de su desplazamiento total de cada una de estas. Entonces, la condición para obtener un andar simétrico puede ser expresada por:

$$\delta X_{CA} = \frac{\delta X_{PL}}{2}, X_{CA,Ini} = \frac{-\delta X_{CA}}{2}, \delta X_{PL,Ini} = \frac{-\delta X_{PL}}{2} \quad (4.52)$$

Con las variables establecidas en la ecuación 4.2 se reduce el número de variables independientes a 8; las necesarias para caracterizar el caminar del robot.

En este capítulo se mostraron los desarrollos cinemáticos que se adaptan al proyecto; esto acorde al desarrollo mostrado en (V. y col.) y que brindan de una base para el desarrollo de aplicaciones experimentales al robot humanoide; en primer instancia para su validación y posteriormente para futuras aplicaciones de movilidad.

De igual forma se describió una sección que hace uso de funciones cicloidales para la generación de trayectorias en el andar humanoide. Dichas funciones están basadas en estudios experimentales (J.-A., L.-I. y Olvera.) para que la aplicación de estas mismas genere una ejecución de trayectorias continuas y suaves, con esto se pretende reducir el impacto de las fuerzas de reacción sobre la estructura humanoide.

Capítulo 5

Evolución mecánica.

En este capítulo se inicia mostrando las imágenes render (véase figura 5.1) del sistema robótico humanoide Suchí generados mediante el complemento PhotoView 360 de SOLIDWORKS; obtenidos a partir del modelo validado para la construcción. Como último paso en el proceso de diseño se realizó la construcción del robot humanoide. Este capítulo está enfocado al proceso de montaje y pruebas finales para obtener una evaluación aprobatoria del prototipo robótico humanoide.

5.1. Renderizado, ensamble y piezas del humanoide Suchí.

En la vista en explosivo que se muestra en la figura 5.2 se observan los componentes que conforman el torso del sistema robótico humanoide Suchí, entre los que se encuentran: La batería del sistema BIOLOID, dos servomotores AX-12 y el espacio para la tarjeta de control.

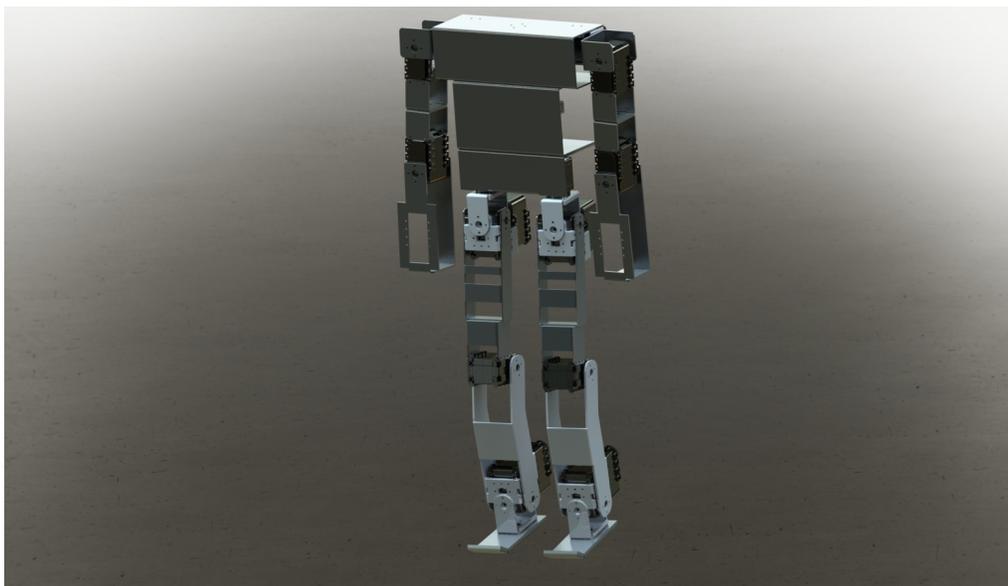


Figura 5.1: Render de Suchí en cuerpo entero.

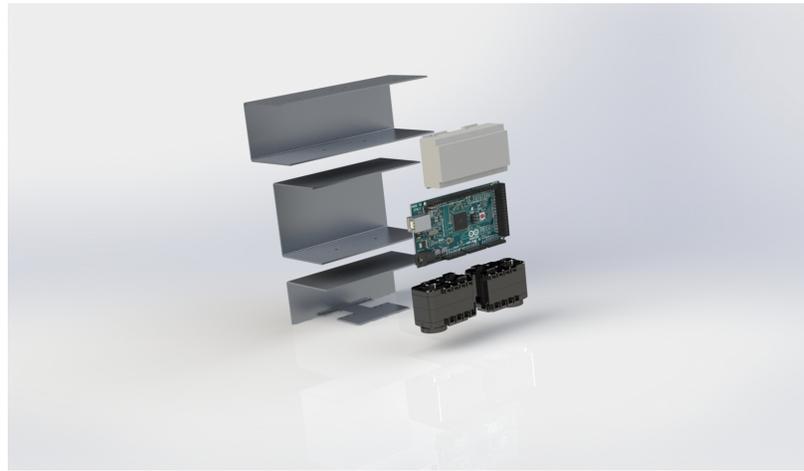


Figura 5.2: Render de torso del sistema humanoide.

En las figuras 5.2, 5.3, 5.4 se muestran en vista explosionada: El brazo derecho, el brazo izquierdo, el torso, pierna izquierda y pierna derecha del humanoide Suchí. De igual forma en la figura 5.2 se muestra la tarjeta de control (Arduino MEGA 2560); el modelo CAD de esta tarjeta se obtuvo en la red con las características físicas reales: Peso, tamaño y centro de gravedad, lo que permitió el uso del modelo para obtener resultados en simulación más realistas.

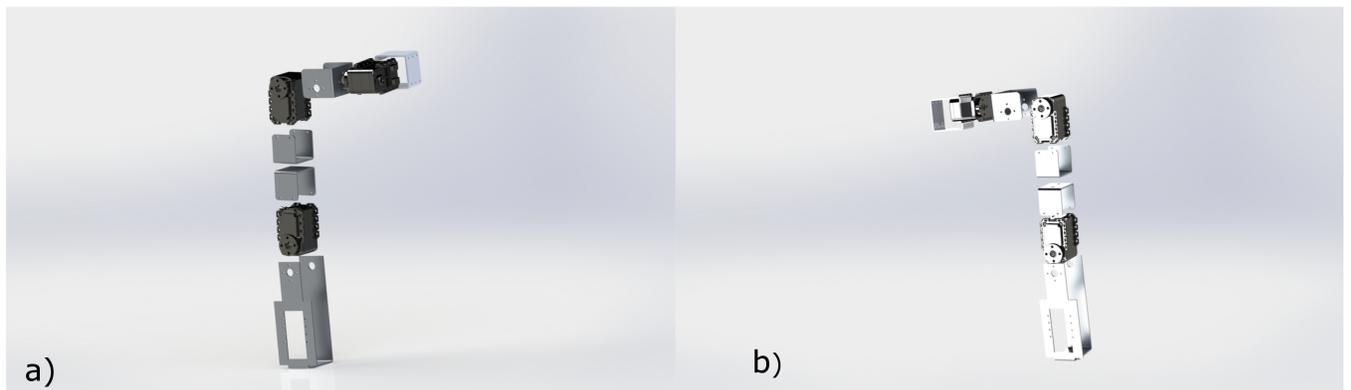


Figura 5.3: Render de: a) Brazo derecho del sistema humanoide, b) Brazo izquierdo.

En el render (fig.5.4) se detalla cada una de las piezas que constituirán el ensamble de las dos piernas que a su vez forman las extremidades del tren inferior del robot Suchí.

Los 18 grados de libertad que posee el sistema Suchí se muestran en la figura 5.5 (véase tabla 2.1); enfocando la parte superior y el tren inferior indicando con flechas rojas la ubicación y movilidad de los actuadores angulares que brindan los grados de libertad para el modelo cinemático.

En la figura 5.6 se presenta en posición con el centro de gravedad ubicado a la altura de la cadera, en el centro geométrico de las plantas de los pies en el plano sagital y en el entre medio de ambos pies en el plano frontal.

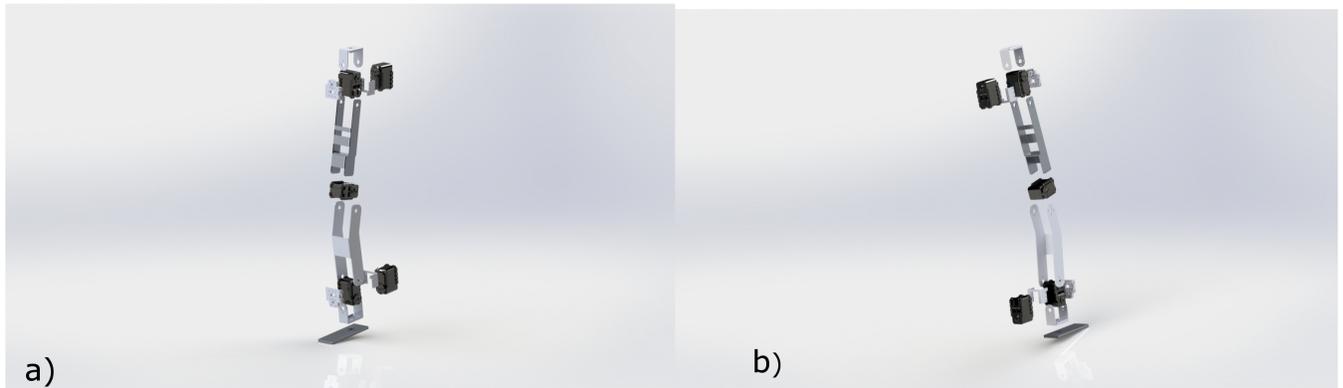


Figura 5.4: Render de: a) Pierna derecha del sistema humanoide, b)Pierna izquierda del sistema humanoide.

5.1.1. Maquinado y ensamble del humanoide Suchí.

Para maquinar las piezas que constituyen los eslabones del sistema humanoide Suchí. Se hizo uso de una máquina fresadora CNC con la cual se cuenta en la UTM en su taller de Manufactura Avanzada. La máquina fresadora CNC mencionada anteriormente tiene un espacio de trabajo de 60cm largo y 50cm de ancho. Por lo que se procedió a distribuir las piezas en dos placas de 50cm largo y 40 ancho, puesto que se requiere un área para sujetar la placa como se muestra en la figura 5.8.

Para montar la placa de aluminio en la maquina CNC se requirió de una placa de trovicel como soporte de sujeción y como protección para la bancada de la maquina CNC para no ser rayada por el cortador una vez fuera atravesada la lámina de aluminio.

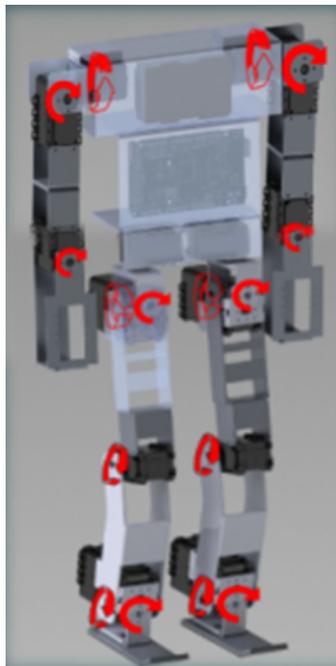


Figura 5.5: Render de la parte superior e inferior del sistema humanoide Suchí, indicando sus GDL.

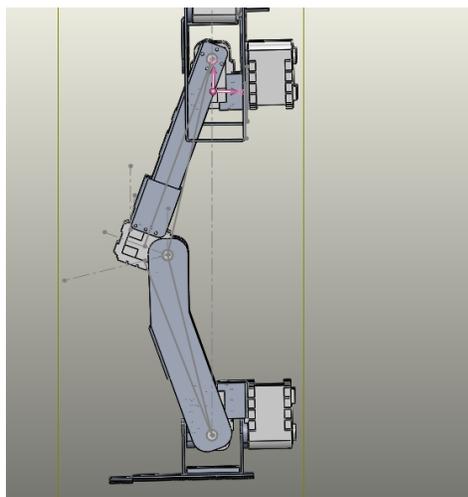


Figura 5.6: Centro de gravedad del sistema humanoide Suchí.

Cuando se tuvo preparado el material de trabajo, se hizo uso del software VISI CAD/CAM para la obtención de códigos numéricos para el maquinado 2D a partir de los modelos CAD creados en Solid Works.

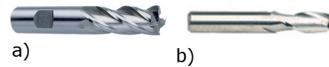


Figura 5.7: a) Cortador de carburo vertical de bola 3/32, b) Cortador de carburo vertical plano de 1/8.

Tras tener pre cargados los códigos en la máquina CNC y sincronizados los orígenes físicos con los programados, se procedió a iniciar marcha a la máquina fresadora CNC. El proceso de maquinado se desarrolló en dos partes, en la primera se realizaron los barrenos de las láminas con un cortador de bola de 3/32 in (figura 5.7 a). Posteriormente se hizo uso de un cortador recto de 1/8 in (figura 5.7 b) para el maquinado de los contornos. Las figuras 5.9a, 5.9b muestran a la máquina CNC en funcionamiento.



Figura 5.8: Placa de aluminio montada sobre la máquina CNC.



Figura 5.9: a) Máquina CNC en marcha. b) Máquina CNC puesta en marcha ejecutando los primeros cortes de contorno.

Una vez recuperadas las piezas deseadas se procedió a realizar los dobleces pertinentes para poder realizar un ensamblaje correcto con los servomotores AX-12. En la figura 5.10a se observa el primer ensamblaje del tren inferior del sistema humanoide.

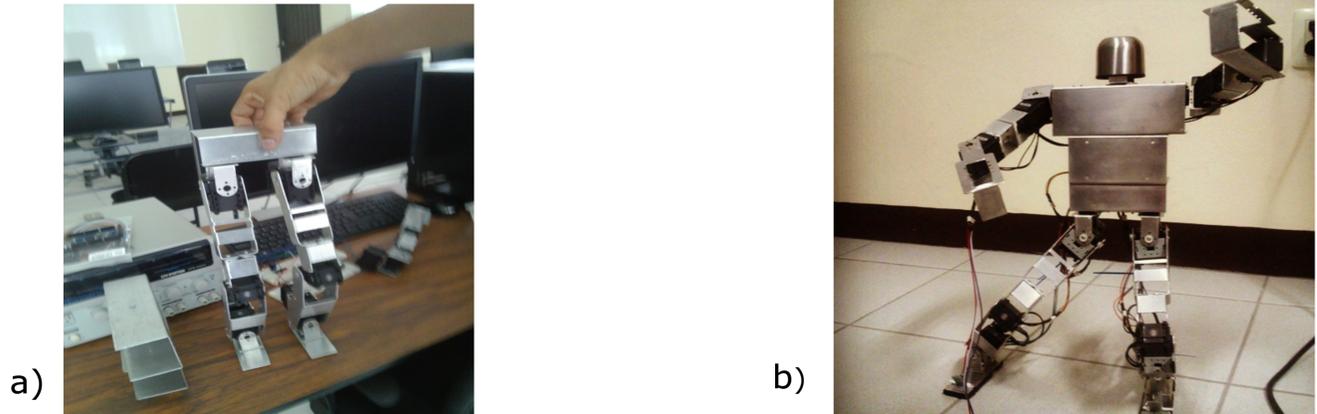


Figura 5.10: a)Estructura de tren inferior ensamblada. b)Robot humanoide Suchí con actuadores energizados y en equilibrio estable.

Con la finalidad de darle un mejor acabado al robot Suchi se lijaron y pulieron todas las piezas maquinadas. Finalmente para poder implementar físicamente la segmentación del pie, se diseñó en CAD una pieza modular que funciona como una bisagra haciendo uso de un resorte pequeño logrando con esto un ensamblaje que simula la planta segmentada. La pieza modular (véase figura 5.11) se manufacturó mediante el uso de una impresora 3D.

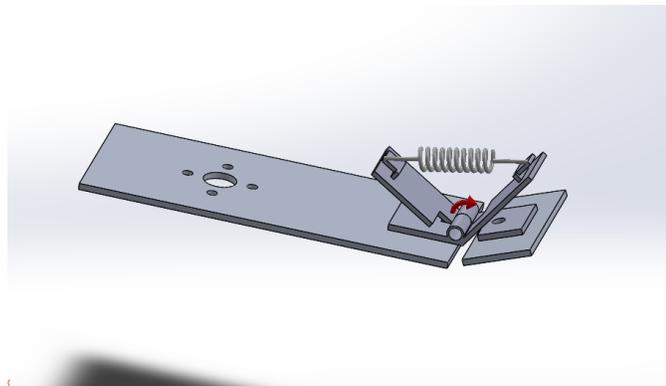


Figura 5.11: Pie segmentado para incorporar en Suchí.

El prototipo del sistema humanoide con los servos AX-12 energizados se muestra en la figura 5.10b. Cabe mencionar que en dicha figura el sistema se encontraba en una de sus posiciones de equilibrio donde su centro de masa se ubica en el centro geométrico de apoyo por la planta de sus pies.

Tras realizar el montaje mecánico, se procede a la integración de los componentes electrónicos, esto es, realizar las conexiones físicas necesarias para la comunicación entre los subsistemas de la

tarjeta controladora, los servomotores, batería, giroscopio; así como el acomodo del hardware físico en su ubicación correspondiente dentro del sistema robótico humanoide Suchí.

Una vez que el sistema se encuentra completo, se realizarán pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de cada uno de los subsistemas integrados entre ellos. Dicha integración consistiría en verificar que cada subsistema funciona correctamente para interactuar con el subsistema que le requiera. Por ejemplo, los puertos de la tarjeta de control deben configurarse correctamente para emitir las señales necesarias para que el sistema cumpla sus tareas requeridas.

Capítulo 6

Resultados.

Una vez finalizada la construcción de la plataforma robótica humanoide Suchí y tras verificar la correcta comunicación de sus subsistemas interconectados, se inició con una serie de pruebas para validar su funcionalidad; esto se realizó mediante experimentos referentes a las tareas prioritarias propuestas.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el paquete de simulación SOLIDWORKS Motion.

6.1. Simulaciones en SOLIDWORKS Motion.

Para validar el uso de los servomotores AX-12 en base al primer diseño antropométrico; se hizo uso del paquete de simulación SOLIDWORKS Motion, el cual proporcionó las herramientas necesarias para poder visualizar el par motor requerido en cada uno de los actuadores rotatorios que brindan movilidad al sistema humanoide.

Para esto se ejecutaron los movimientos rotativos en los servomotores para posicionar al robot en las posiciones demandantes descritas en el apartado 2.3.1; estas son las posiciones en las que podría llegarse a encontrar el sistema en la ejecución de tareas para las que fue diseñado y en las cuales los servomotores de algunas uniones tendrán una demanda de potencia que podría llevar al sistema al fallo. La realización de los movimientos partiendo de su posición en reposo a cada una de las posiciones demandantes se realizaron en un tiempo de simulación de 5 segundos.

- Posición uno: En el momento en que está por apoyar el pie en el suelo.

Se ejecutó una simulación en la que se reproduce el movimiento de los actuadores del tren inferior del sistema humanoide Suchí para este primer caso, los resultados de esta simulación se puede apreciar en la figura 6.1. A la derecha se observan las curvas que muestran el valor de par-motor ejercido en cada uno de los actuadores más solicitados para que el sistema inicie su movilidad de una posición en reposo a la posición demandante anteriormente mencionada.

En el gráfico referido al actuador th12 se observa que al instante $t = 0,5\text{seg}$ el sistema pasa por un punto de equilibrio donde su centro de masa se alinea sobre el centro geométrico de apoyo del robot. Dicha acción libera de esfuerzo de torsión a dicho actuador.

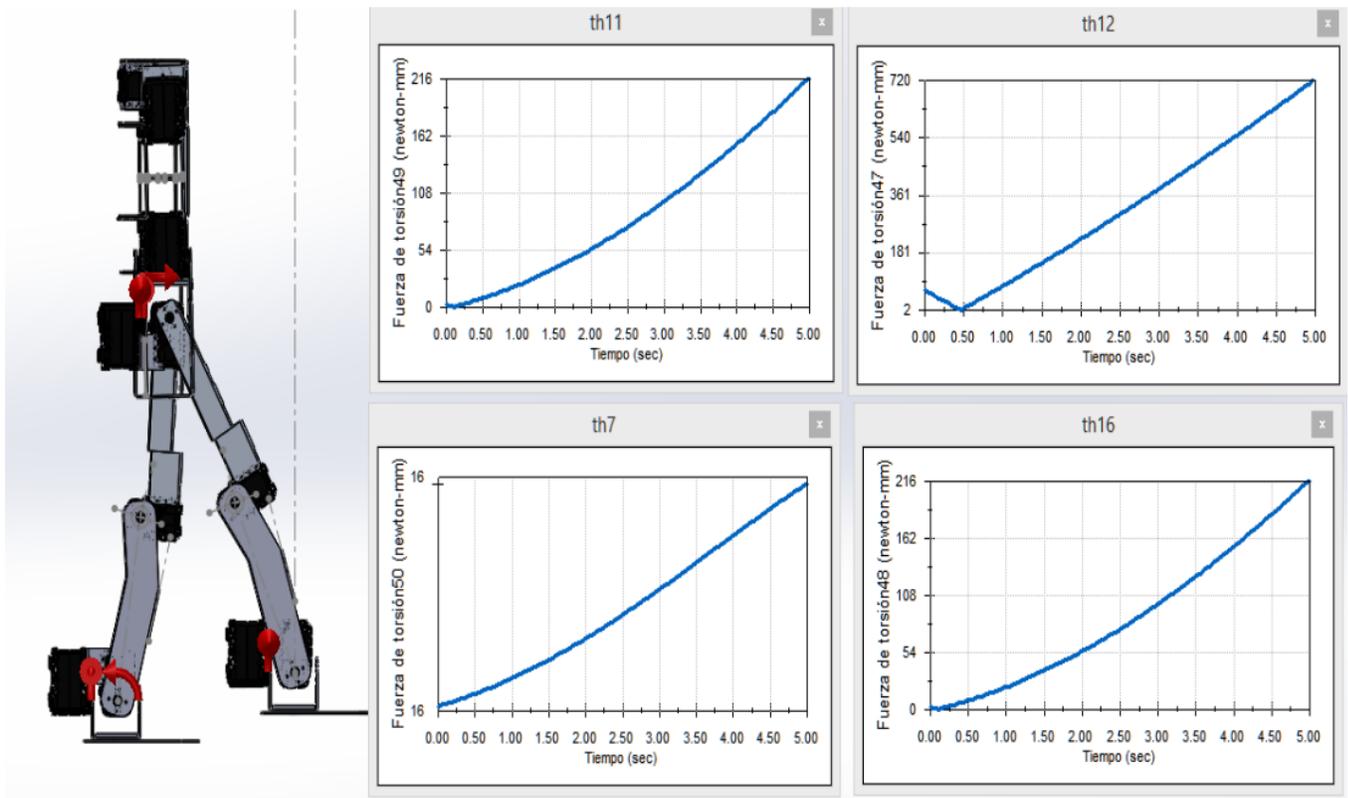


Figura 6.1: Posición desfavorable del inciso (a) descrita en el apartado 2.1.2.

- Segunda posición: Movimiento hipotético para subir un escalón:

Se realizó nuevamente una simulación donde se representa el movimiento de los actuadores del tren inferior del sistema humanoide Suchí para el segundo caso. A la derecha de la imagen 6.2 se observan los gráficos que muestran el valor de par motor requerido cada uno de los actuadores más solicitados.

En el gráfico referido a los actuadores th16, th14 y th11 (ver figura 6.2) se observa que el sistema pasa por una posición de equilibrio para cada actuador de manera independiente durante su desplazamiento; lo que libera de esfuerzo de torsión a cada actuador en dicho momento.

Las curvas que representan el desempeño del actuador a lo largo del tiempo muestran que el diseño no rebasa la capacidad en par-motor que ofrecen los servomotores AX-12, debido a que estos servomotores brindan un par motor de 18000 $[N.mm]$.

- Tercer Posición: Inclinandose en su conjunto hacia su lado izquierdo en el plano frontal.
Para la simulación del tercer caso se obtienen los gráficos mostrados a la derecha de la figura 6.3. En estos se observa el valor de par motor ejercido en cada uno de los actuadores más solicitados.
- Cuarta posición: Alejamiento de la pierna izquierda en el plano frontal.

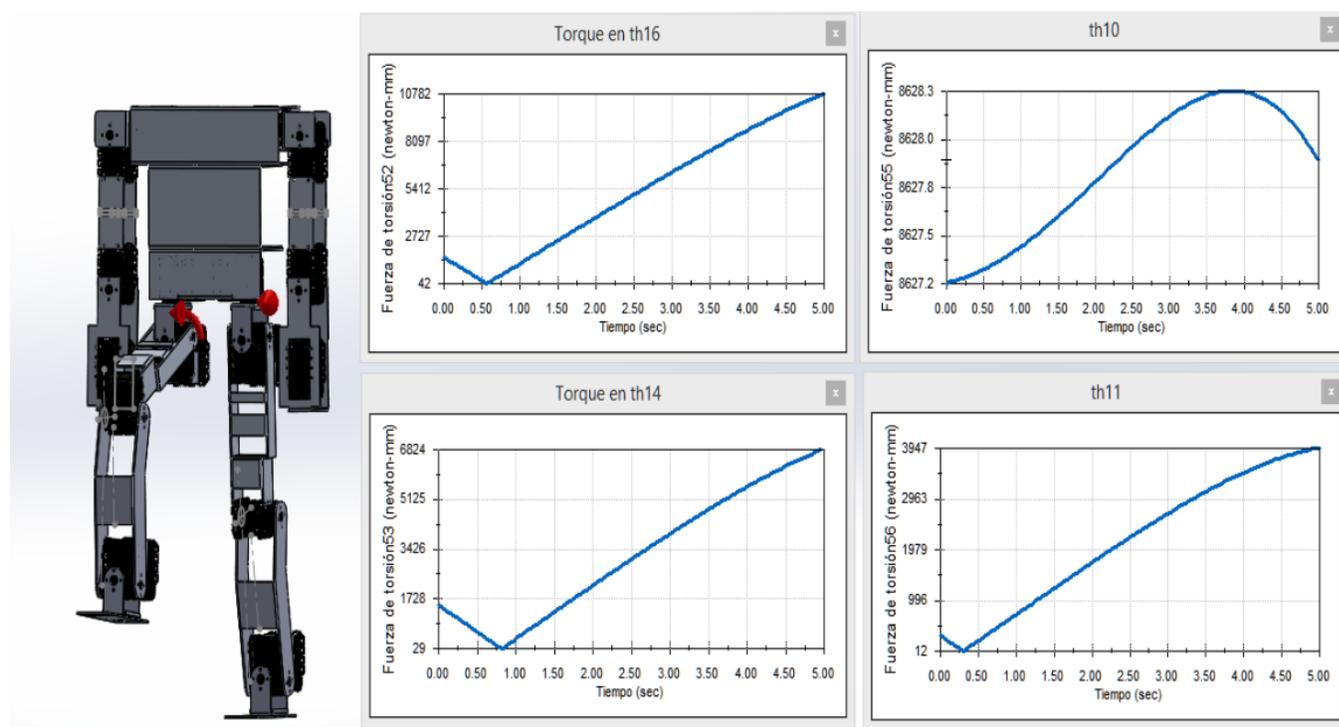


Figura 6.2: Posición desfavorable para subir escalón.

Se programan los desplazamientos necesarios para generar la simulación del cuarto caso de estudio. En la parte derecha de la imagen 6.4 se observan los gráficos que muestran el valor de par motor ejercido en cada uno de los actuadores más solicitados.

Con el fin de realizar un estudio más amplio de las capacidades del humanoide, se ejecutó la simulación de posiciones de prueba enfocadas en probar sus máximas capacidades.

- Sentadilla con servos extras.

En el siguiente estudio de movimiento, se colocó un servomotor extra en cada una de las extremidades de los brazos de Suchí; esto con el fin de agregar peso extra, simulando la futura implementación de instrumentación. Posteriormente se realizó el análisis del estudio de movimiento al realizar una sentadilla desplazando 92 grados a los actuadores th13 y th14. De igual forma se flexionaron los actuadores (th16, th17, th11, th12) a 41 grados de su posición inicial en sentido horario y anti-horario respectivamente para poder obtener el desplazamiento deseado para ejecutar la sentadilla.

Se puede observar en la parte derecha de la figura 6.5 el valor de par motor ejercido en cada uno de los actuadores más solicitados.

En los gráficos expuestos se observa que los actuadores que demandan más par motor vendrían a ser los ubicados en las rodillas. Así mismo, las curvas que muestran la demanda de dichos servomotores están por debajo del límite de los 1800 [N.mm].

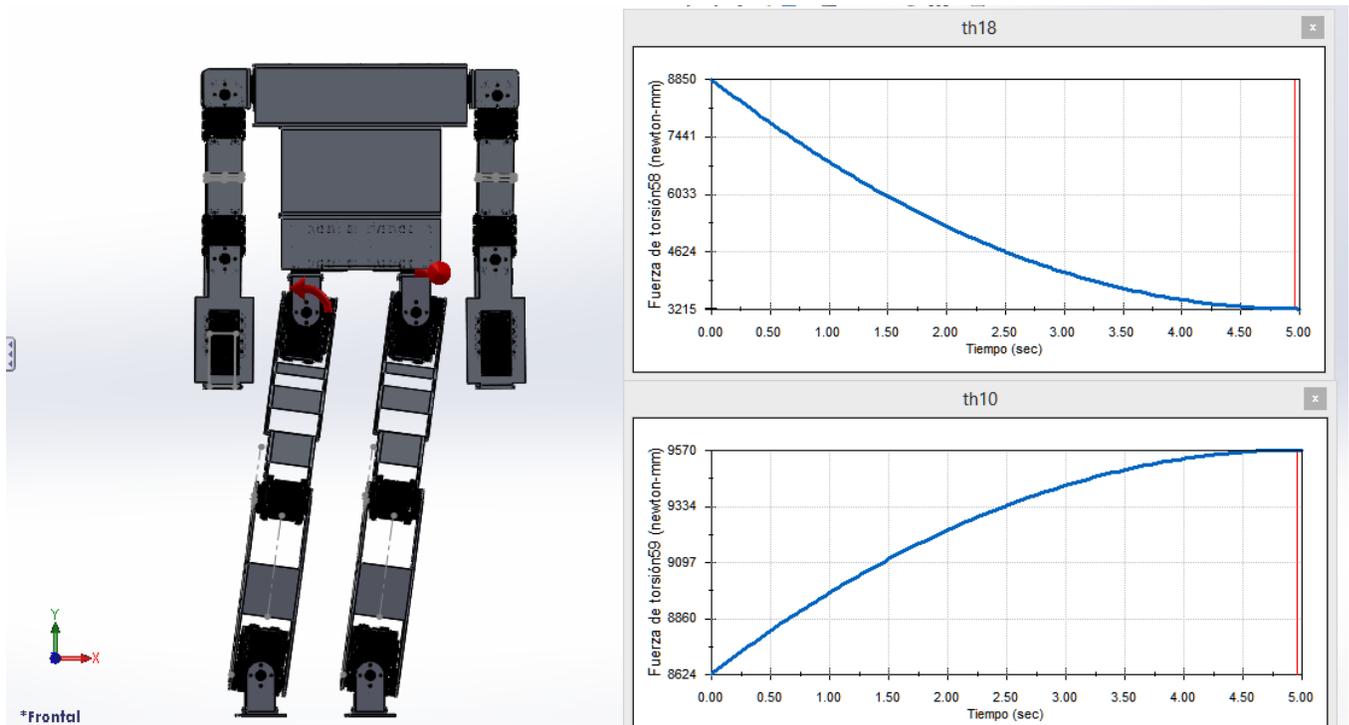


Figura 6.3: Posición desfavorable inclinado en todo su conjunto.

- Alzando el brazo izquierdo con un servomotor extra para aumentar el peso.

Se reproduce la sollicitación del par motor al actuador th2 en un recorrido alzando el brazo entero. A la derecha de la figura 6.6 se observan los gráficos que muestran el valor de par motor ejercido en cada uno de los actuadores mas sollicitados.

- Peso máximo soportado por un brazo del robot Suchí.

Se realizó el desarrollo matemático (descrito a continuación) con las propiedades físicas del brazo robótico de Suchí para estimar el peso máximo que es capaz de soportar el sistema robótico humanoide cerca del efector final de un brazo en el área diseñada para ubicar alguna herramienta; esto al efectuar un desplazamiento del servomotor th2 desde su posición en reposo hasta 90 grados.

La estructura que conforma un brazo del sistema robótico humanoide tiene un peso de 166 gramos y el centro de masa en el eje x a 94mm del centro de la unión th2. El par motor ejercido en el servomotor ubicado en dicha unión es de 0.155 N.

Se ubicó el centro de masa de una herramienta a una distancia de 239 mm del punto de unión en th2 al considerar que el par motor máximo a ejercer por el servomotor AX-12 es de 1800 N.mm. se calculó una fuerza máxima permitida de $7.53 \left[\frac{1800N.mm}{239mm} \right]$ a la cual se le debe restar el par motor ejercido por el peso de la estructura para poder determinar una masa máxima permitida de 0.600Kg (0,76gr – 0,166gr) en el efector final del brazo a 239 mmm.

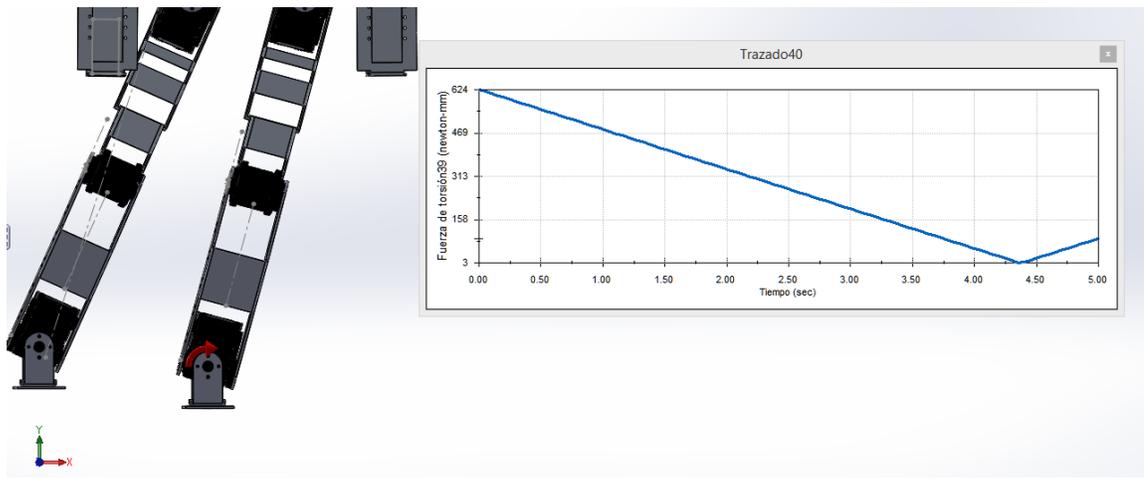


Figura 6.4: Posición desfavorable en una sola pierna.

Como se puede observar en la figura 6.7a, obtenida de una simulación en SOLIDWORKS Motion al reproducir la tarea anteriormente descrita; donde se observa que el sistema no superó los 1800 N.m al ejecutar el movimiento con un peso extra de 520 gr. En la figura 6.7b podemos observar que con un peso de 1800 N.m se alcanza el límite de la capacidad del par motor de un servomotor AX-12.

Como se muestra en la figura 6.8, donde se observa una prueba realizada al prototipo real cargando una taza para café con contenido sólido y con un peso total de 700gr. Al ejercer una fuerza extra sobre el brazo el sistema falla, provocando de esta manera la inactividad del motor AX-12 y activando un led rojo; que persistirá hasta que el motor sea reiniciado.

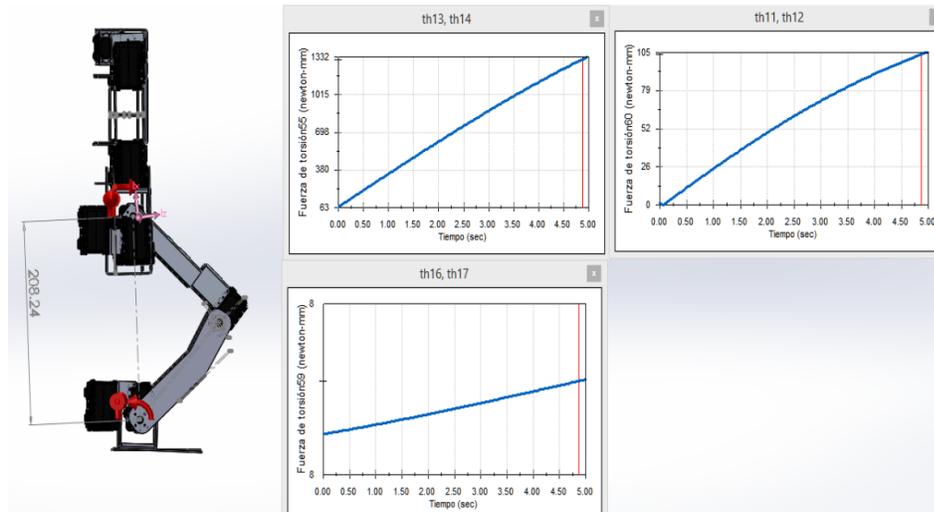


Figura 6.5: Posición en sentadilla.

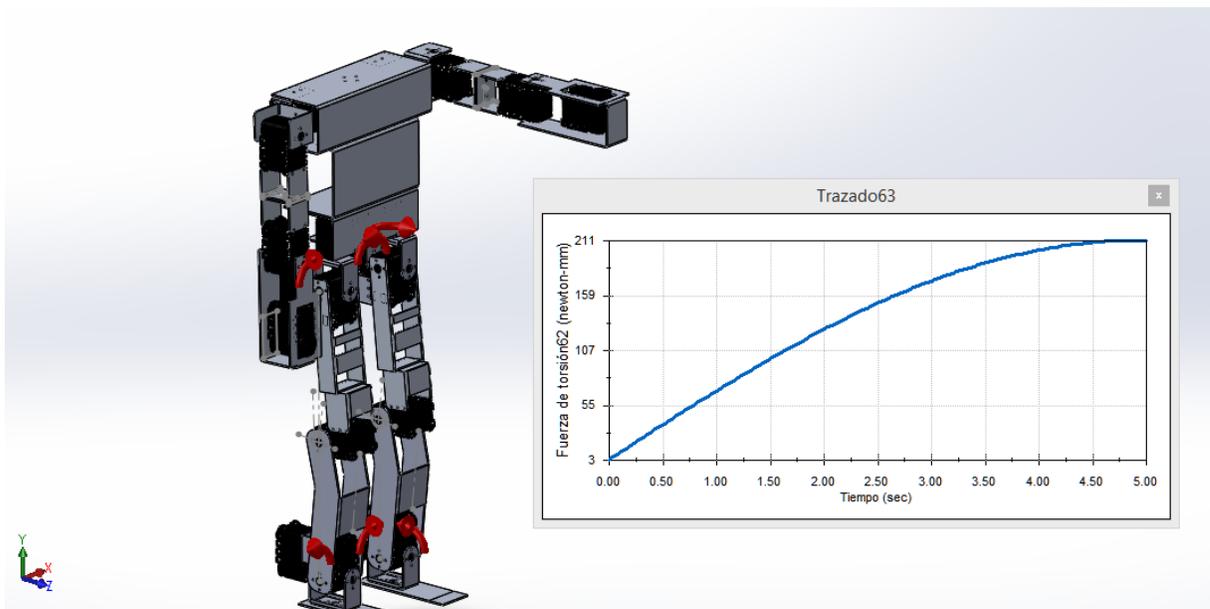


Figura 6.6: Posición alzando el brazo derecho.

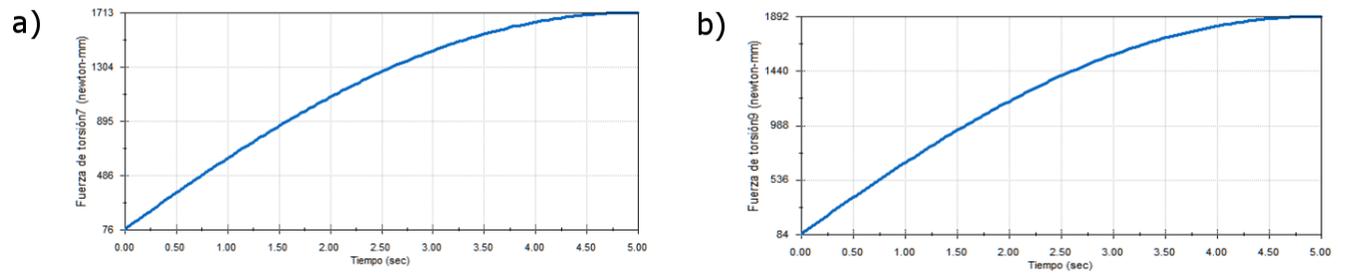


Figura 6.7: Torque requerido al servomotor th12 alzando una tasa con el brazo derecho: a) Con un peso soportador por el servomotor de 520 gramos. b) Con un peso de 700 gramos.



Figura 6.8: Posición alzando una tasa con el brazo derecho.

En las figuras mostradas en (6.12) se muestran los valores para el avance vertical (6.12a) y horizontal (6.12b) de la pelvis en la perspectiva del plano sagital.



Figura 6.9: Valores en radianes para el actuador θ_{11} .



Figura 6.10: Valores en radianes para el actuador θ_{13} .

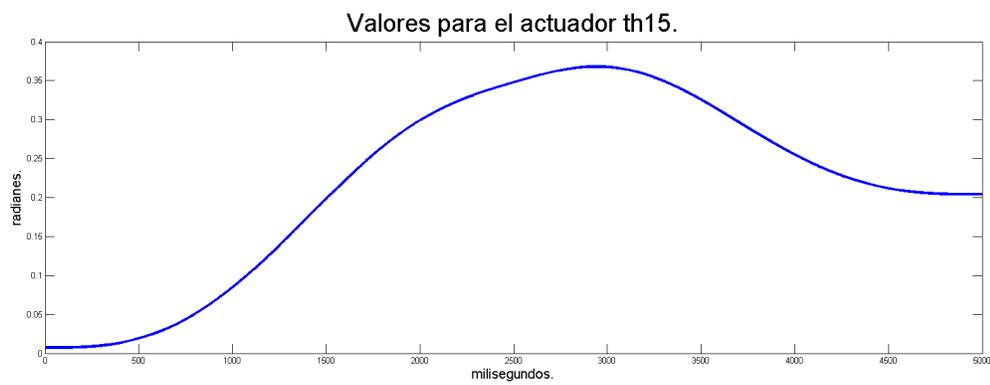


Figura 6.11: Valores en radianes para el actuador θ_{15} .

6.2. Resultados de las co-simulaciones ADAMS-MATLAB.

Los parámetros para la simulación se obtienen a partir de pruebas realizadas por Arias et al. en (E. y col.). Estos parámetros se tuvieron que ajustar a la cinemática del sistema humanoide Suchí. La tabla 6.2 muestra estos valores ajustados para el sistema. Estos valores sirven como entradas de las ecuaciones 4.48 las cuales pertenecen a los bloques para generar las trayectorias (véase 3.9):

Parámetro	Valor
T_{DS}	5
T_{SS}	5
$\delta\theta$	1.5
δX_{CA}	20
$Y_{CA,i}$	220
δY_{CA}	40

En las figuras (6.9...6.14) se muestran las curvas generadas tras evaluar en las ecuaciones de la cinemática inversa para cada uno de los actuadores del tren inferior del humanoide implicados en su andar; con los valores aplicados al bloque con el modelo dinámico.

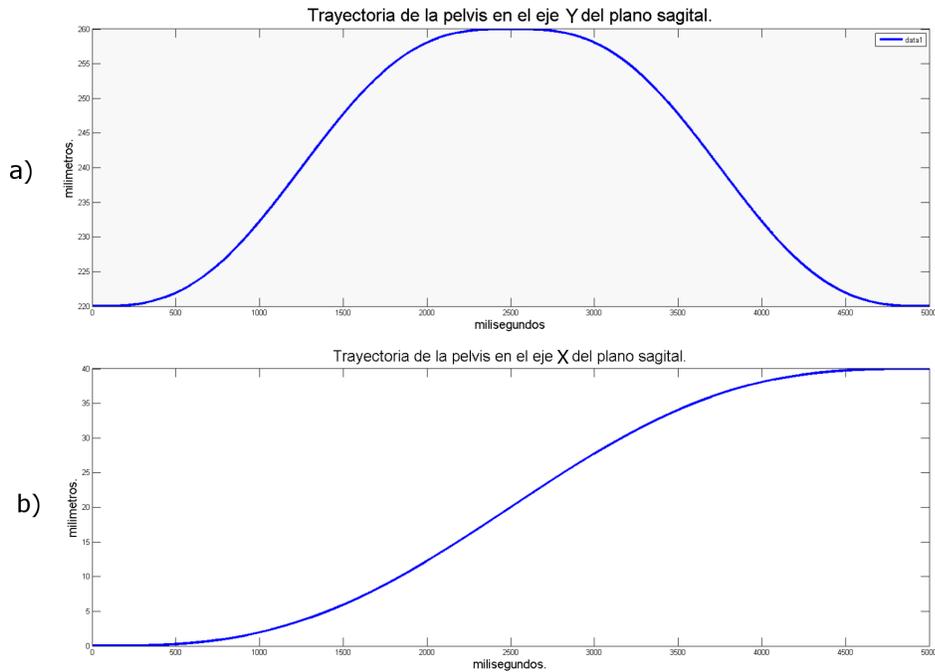


Figura 6.12: Valores para la trayectoria de la pelvis en el eje X del plano sagital.

En las figuras mostradas en (6.12) se muestran los valores para el avance vertical (6.12a) y horizontal (6.12b) de la pelvis en la perspectiva del plano sagital.

Las figuras 6.9, 6.10, 6.11 muestran los valores en radianes que mueven a los actuadores rotatorios ubicados en la pierna izquierda vistos en el plano sagital; se observa que la cinemática inversa para estos actuadores cumple con la característica propuestas por el sistema de generación de trayectorias de tener velocidades y aceleraciones bajas al terminar el recorrido del paso.

Las gráficas obtenidas para el movimiento de la derecha (th12, th14, th15) son los mismos a sus homólogos de la pierna izquierda pero con un desfase de medio periodo; esto para lograr con esto un andar uniforme.

El movimiento en radianes de los actuadores en el plano frontal se muestran en las figuras 6.13, 6.14. En este caso el comportamiento simula el balanceo de un péndulo vertical.

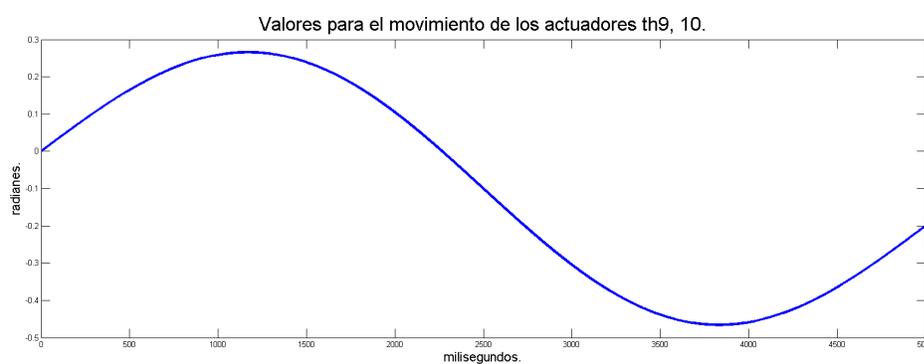


Figura 6.13: Valores en radianes para el actuador $\theta_9, 10$.

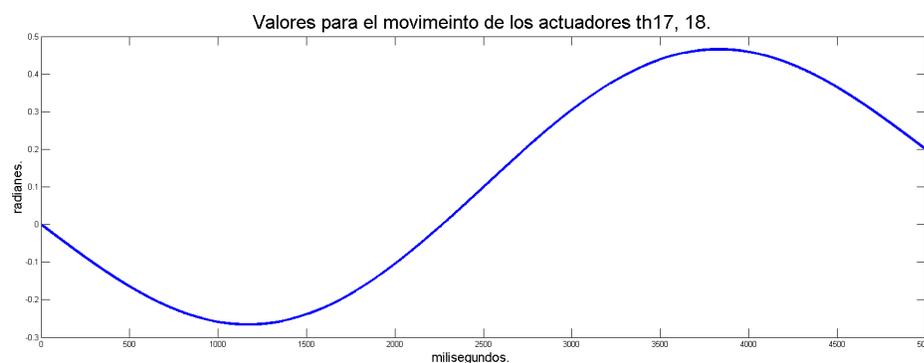


Figura 6.14: Valores en radianes para el actuador $\theta_{17}, 18$.

La co-simulación del sistema para observar el movimiento del andar del humanoide con los datos especificados anteriormente, se realizó sin aplicar gravedad al sistema dinámico. Puesto que debido a la falta de control, el sistema con gravedad se volvía inestable en las pruebas y no mantenía un andar bípedo correcto.

A continuación se muestran unas pruebas experimentales de estabilidad realizadas en el sistema humanoide Suchí. Dichas pruebas se ejecutaron en posiciones donde su centro de masa estuviese lo más cercano posible al centro geométrico de la planta de sus pies en el plano sagital para comprobar

su punto de estabilidad; esto al mantenerse erguido aplicando fuerzas de gravedad. Visualmente el sistema se mantuvo en su posición deseada al correr la ventana de co-simulación en Adams Matlab/simulink como se observa en la figura 6.17.

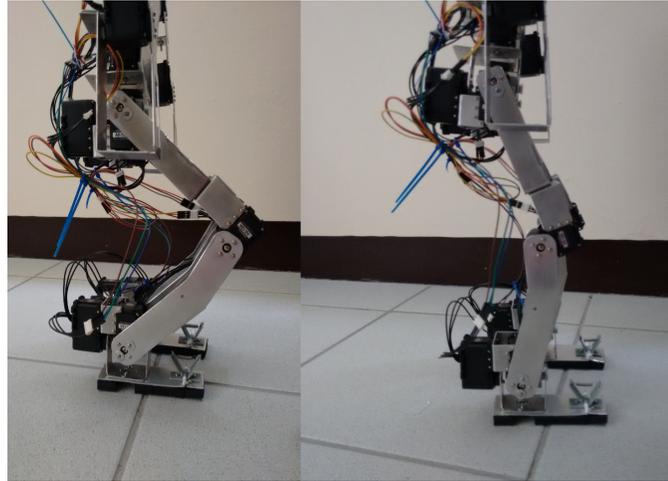


Figura 6.15: Suchi ejecutando una sentadilla.

La figura 6.16 muestra una ventana en tiempo de ejecución de la co-simulación en SIMULINK en la cual se le aplicaron fuerzas de gravedad en el entorno de Suchi en una posición erguida con su centro de gravedad ubicado en el centro geométrico de su punto de apoyo (planta de los pies).

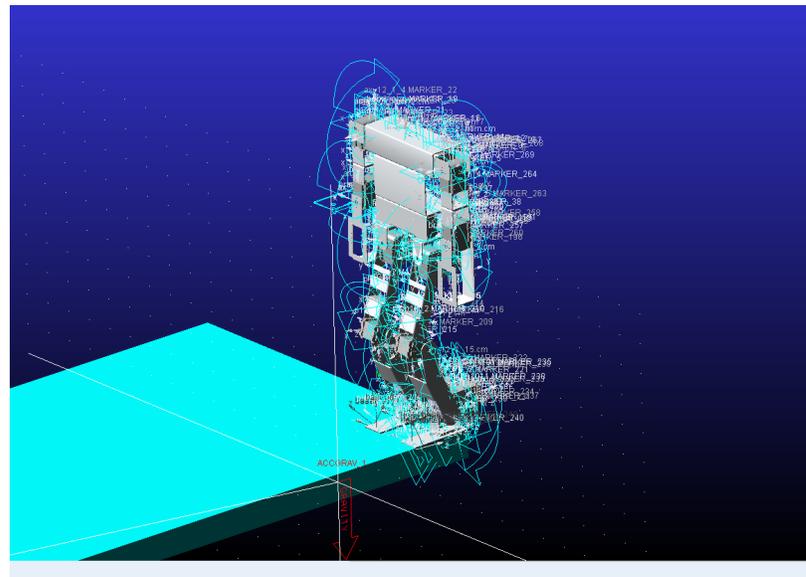


Figura 6.16: Suchi erguido en ventana de co-simulación.

Al establecer a los servo motores de la plataforma real en las posiciones angulares de simulación y mantenerse establemente erguido se comprobó la fase de simulación.

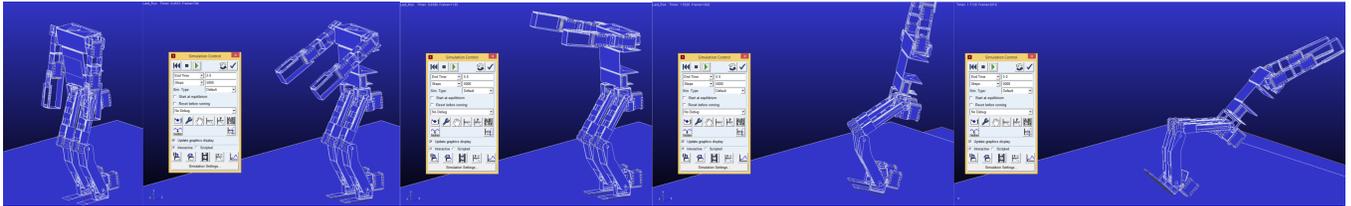


Figura 6.17: Cinco instantes en el movimiento del sistema robótico humanoide para ejecutar de forma fallida una sentadilla usando los brazos como contrapeso para mantener el centro de masa en su centro geométrico de apoyo.

En la figura 6.17 se puede observar al humanoide Suchí en la ventana de una co-simulación de 5 segundos con fuerzas de gravedad actuando sobre sus componentes e intentando realizar una flexión de sentadilla se observa que el sistema presenta un desbalance, posteriormente pierde el equilibrio y cae hacia atrás.

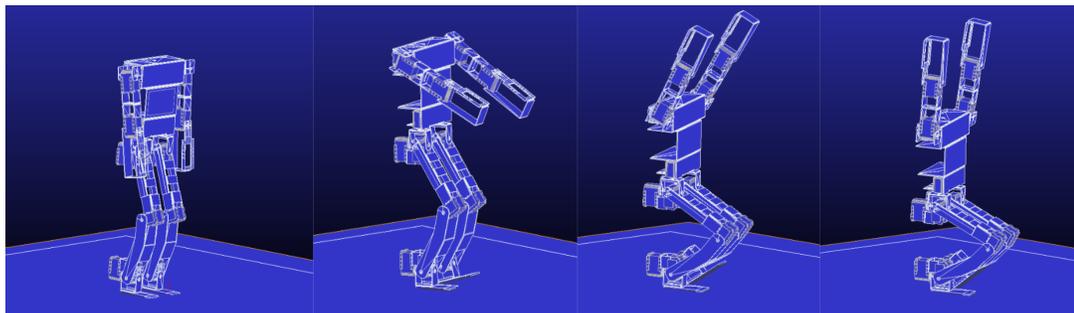


Figura 6.18: Cuatro instantes en los que el sistema robótico humanoide ejecuta exitosamente una sentadilla usando los brazos como contrapeso para mantener el centro de masa en su centro geométrico de apoyo.

En la figura 6.18 se puede observar al sistema robótico humanoide Suchí ejecutar una sentadilla en una simulación de 5 segundos. Heurísticamente se consiguió que el sistema robótico humanoide mantuviera su centro de masa en su centro geométrico de apoyo y con esto se logró obtener la visualización de la co-simulación del robot Suchí realizando una sentadilla; mientras compensaba su desequilibrio con el desplazamiento hacia adelante de los actuadores de sus brazos.

A partir de la co-simulación descrita en la figura 6.17; de las salidas del bloque representativo del modelo robótico se obtienen valores arrojados por el acelerómetro ubicado en la pelvis del sistema robótico virtual. En la figura 6.19 se muestra de una manera representativa el desplazamiento angular de la pelvis respecto al sistema referencial del mundo; se debe notar que el sistema tiene un desfase de 90 grados para su posición inicial en reposo y posteriormente varía al transcurrir la ejecución de la sentadilla, hasta llegar al punto donde se presenta una pérdida de equilibrio.

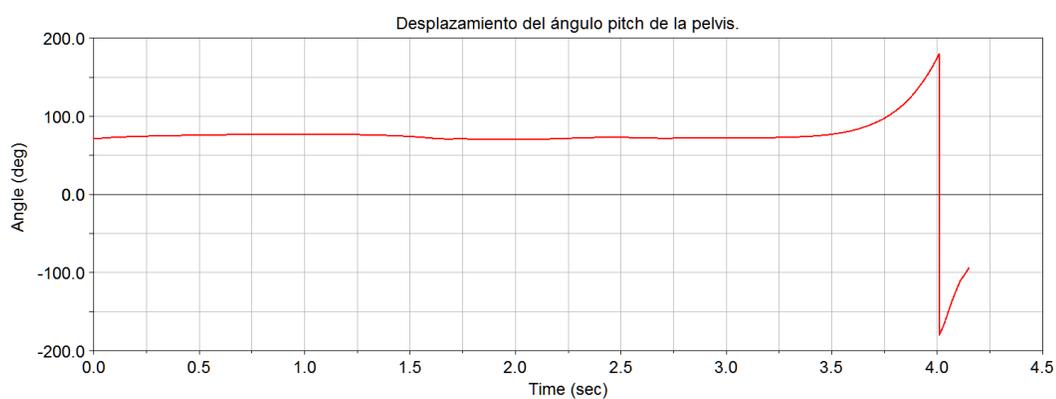


Figura 6.19: Gráfico que describe la componente angular pitch del acelerómetro ubicado en la pelvis al realizar la sentadilla.

6.3. Pruebas en la plataforma real.

La actividad práctica para corroborar la funcionalidad del sistema humanoide Suchí consistirá en que los servomotores del sistema ejecuten los desplazamientos angulares generados por la solución de la cinemática inversa para las cadenas de las piernas; como se observó en la sección 6.2.

En la figura 6.21 se observa en cada imagen segundo a segundo como los puntos de las uniones de las piernas de Suchí se mueven ejecutando las curvas en el plano sagital propuestas por las ecuaciones generadoras de trayectorias en el lapso de tiempo especificado de 5 segundos. Con esto se comprueba de manera práctica la funcionalidad de las ecuaciones que resuelven la cinemática inversa de las cadenas cinemáticas que conforman las piernas de Suchí.

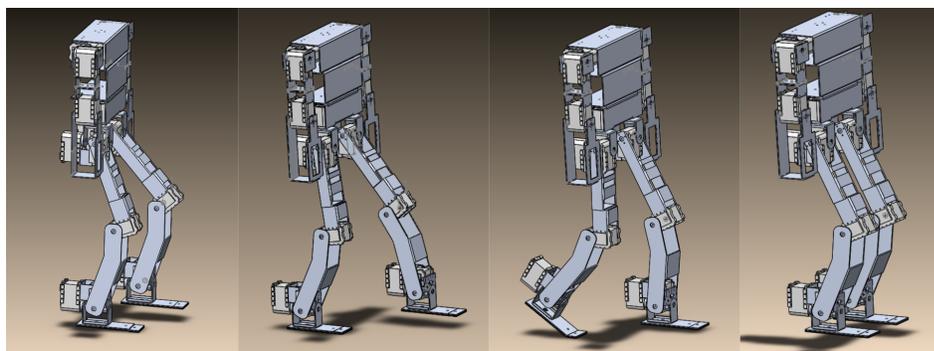


Figura 6.20: Fases de movimiento de la unión pasiva en simulación (SOLIDWORKS MOTION).

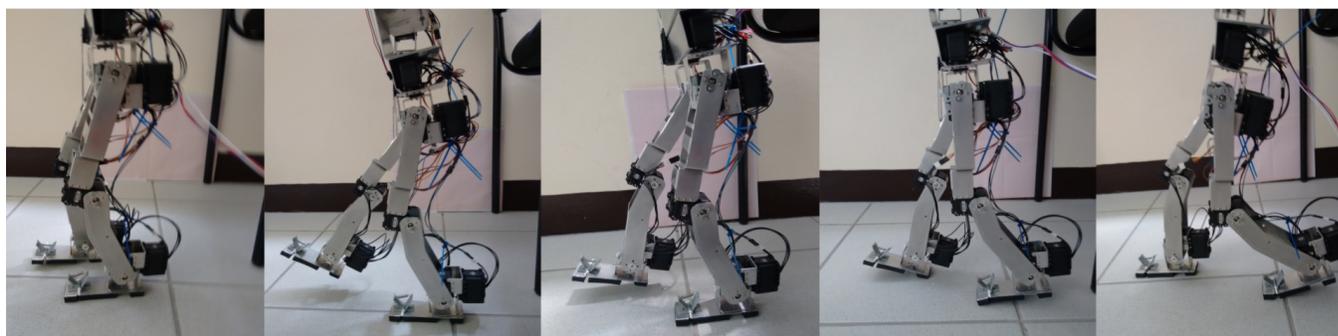


Figura 6.21: Cinco instantes en el desplazamiento de las uniones que conforman el tren inferior del sistema robótico humanoide.

De igual manera para el plano frontal se observa en la imagen 6.22 los límites del balanceo de la plataforma real; propuestos por las ecuaciones 4.50.

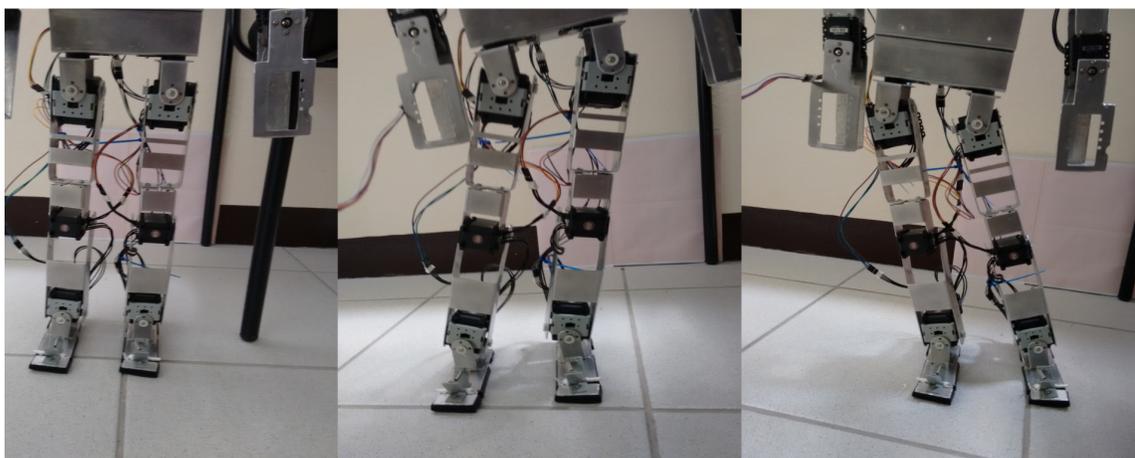


Figura 6.22: Limite del balanceo en el plano frontal.

A continuación se muestra el desarrollo del pie segmentado en su etapa final de diseño.

En la figura 6.23 se muestran la estructura final del pie segmentado diseñado para el sistema robótico humanoide Suchí. Se observa que para simular una unión pasiva se desarrolló una bisagra que se manufactura en tecnología de impresión 3D. La relación $\frac{H_f}{L}$ es igual a 0.35 lo que se traduce en obtener los beneficios mencionados en la sección donde se abordó diseño a detalle.

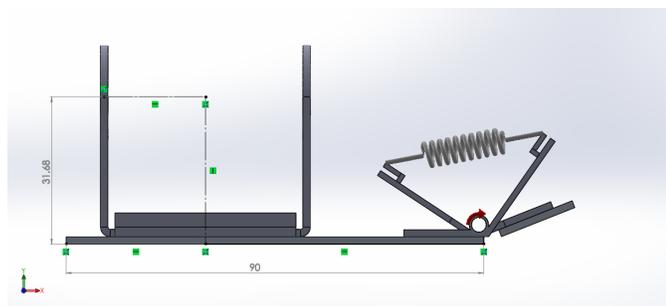


Figura 6.23: Se muestran las medidas del pie humano del humanoide Suchí.

En la figura 6.20 se muestra un ejemplo en simulación virtual del empleo de la unión pasiva para ejecutar una caminata análoga a la humana. Los desplazamientos de los ángulos en los actuadores de la simulación ejecutada en un estudio de movimiento con la herramienta SOLIDWORKS MOTION; se llevan a los servomotores de la plataforma real.

En la figura 6.20 se observan en el prototipo real los mismos movimientos anteriormente mencionados demostrando la funcionalidad del pie segmentado para la tarea que fue diseñado.

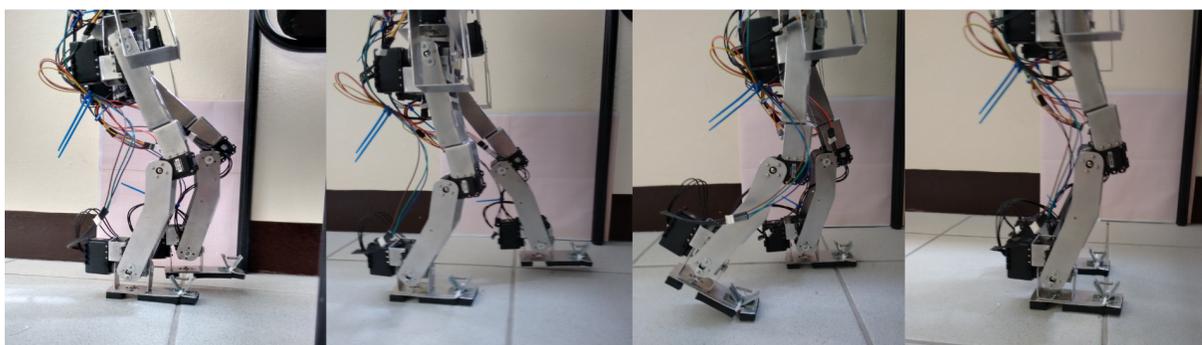


Figura 6.24: Fases de movimiento de la unión pasiva en la plataforma real.

Se puede observar en la figura 6.15 la sentadilla ejecutada en la plataforma real con los desplazamientos angulares de la imagen 6.6. Se destaca que el sistema se mantiene estable al seguir una trayectoria basada en centrar el punto de masa en el medio geométrico de la planta de sus pies en el plano sagital.

Capítulo 7

Conclusiones.

El objetivo principal de esta tesis fue el diseño y construcción de un sistema robótico humanoide a escala con medidas antropométricas abstraídas del sistema musculo esquelético humano.

Se adaptó de manera exitosa una metodología funcional para la construcción de robots humanoideos en el desarrollo del sistema robótico humanoide Suchí. En donde se desarrolló:

- Un modelado cinemático del sistema con medidas antropométricas escaladas.
- Se comprobaron las características mecánicas que darían el funcionamiento requerido al robot humanoide; esto mediante el uso de herramientas CAE como: SOLIDWORKS motion y ADAMS.
- Se realizó la co-simulación del software ADAMS y MATLAB/Simulink para lograr una integración entre la implementación de las funciones generadoras de trayectorias y las que resuelven la cinemática inversa en un modelo mecánico muy similar al modelo real construido.

Tras la validación del sistema a nivel software, se realizó la construcción del sistema donde se resaltan los siguientes aspectos:

- En el maquinado de las piezas de aluminio se realizaron pruebas heurísticas para obtener la correcta velocidad del cortador tanto en revoluciones como en avance, puesto que se corría el riesgo de que se fracturara el material del cortador o de realizar un corte que deformara al aluminio.
- Se usó una librería (Arduino y dynamixel Ax-12.) para hacer posible la comunicación entre los servomotores inteligentes AX-12 y la tarjeta de control Arduino Mega 2560. Pero se notó un tiempo muerto en el envío de los datos por el puerto serial del Arduino; esto es debido a la forma en que la librería realiza el envío de paquetes.

En general respecto a la hipótesis planteada al inicio del proyecto, se cumple dicho enunciado al realizar una comparativa entre el presupuesto final de la construcción del robot humanoide Suchí (véase el cuadro 7) con los costos en el mercado del BIOLOID PREMIUM (BIOLOID.); el cual ofrece una plataforma de prestaciones para el funcionamiento y control del sistema con un software

computacional, en cuanto a materiales de construcción es superado por Suchí. En el caso del robot humanoide con eslabones de aluminio el BIOLOID GP en comparación con Suchí es por mucho un sistema con la misma resistencia en sus materiales pero mas económico (véase la tabla 7).

En cuanto al robot humanoide HOVIS(HOVIS Lite Humanoid Robot.), si bien cuenta con una diferencia ventajosa de aproximadamente 2000 pesos m.n a su favor, cuando se toma en cuenta la resistencia y durabilidad del material de aluminio en contra parte al plástico del HOVIS, así como las prestaciones funcionales de los servomotores AX-12 en comparativa con los HerkuleX DRS-0101 que monta el HOVIS. Se concluye que el robot Suchí es una plataforma mas económica tomando en cuenta las prestaciones en hardware antes mencionadas.

En el siguiente cuadro se muestra el listado de componentes que conforman la estructura funcional del robot humanoide Suchí con sus respectivos costos en el mercado (actuales a la fecha de impresión de este documento de tesis). En los precios totales, se especifica el costo de fabricación con una impresora con tecnología 3D, así como, la construida en el trabajo de tesis con elementos de aluminio.

Id	Nombre de parte.	Cant.	Costo p.u. (m.n).	Proveedor.
1	AX-12	20	637.50	ROBOTIS CO., LTD.
2	Arduino MEGA 2560 R3	1	573.15	Arduino.
3	Bioid Bolt and Nut Set.	1	351.00	ROBOTIS CO., LTD.
4	Lamina de aluminio (100*40)	1	400.00	
5	Paquete Cables Jumper	1	100.00	
6	74LS125	1	20.00	
7	Tornillos 1/8	12	0.50	
8	tuercas 1/8	12	0.50	
9	Bisagras para pie segmentado.	4	10.00	Manufacturador de piezas 3D.
10	Costo de piezas con impresora 3D por gramo.	447	0.80	
11	Bateria.	1	299.25	ROBOTIS CO., LTD.
12	Cargador de bateria.	1	239.25	ROBOTIS CO., LTD.
	Costo de piezas.		15 504.65	
	Costo de maquinado.		800.00	
	Costo de doblado.		100.00	
	Total en aluminio.		16 404.65	
	Total en impresión 3D.		15 862.25	

Cuadro 7.1: Presupuesto de Suchí.

Tomando de referencia costos en la tienda en línea roboshop (Tienda de robótica en línea.) y costos actuales convertidos a moneda nacional se obtiene la siguiente tabla comparativa de costos acerca de los sistemas.

Como comentario final, el desarrollo del robot humanoide descrito en esta tesis es solo el inicio

Hovis.	Bioloid Premium.	Bioloid GP (Eslabones de aluminio.)	Suchí.
14 314.85\$	21 584.50\$	473 840.50\$	16 404.65\$

Cuadro 7.2: Comparativa de precios.

para una serie de investigaciones y desarrollos basados en líneas de investigación afines al empleo del humanoide.

Así que con la finalidad de mejorar y extender el desarrollo de esta tesis, se plantean como trabajos futuros los que a continuación se comentan:

- El uso de una tarjeta de control con mayor capacidad de comunicación así como de compatibilidad con los servo motores.
- El diseño de una carcasa que mejore visiblemente el aspecto de Suchí. En la figura 7.1 se muestra al humanoide Suchí con un modelo de carcasa solamente para la cabeza; se puede observar la mejora visual que esta implica.
- El desarrollo de una ley de control para el andar dinámico no estable del sistema aprovechando las ventajas que le brinda tener un pie segmentado.

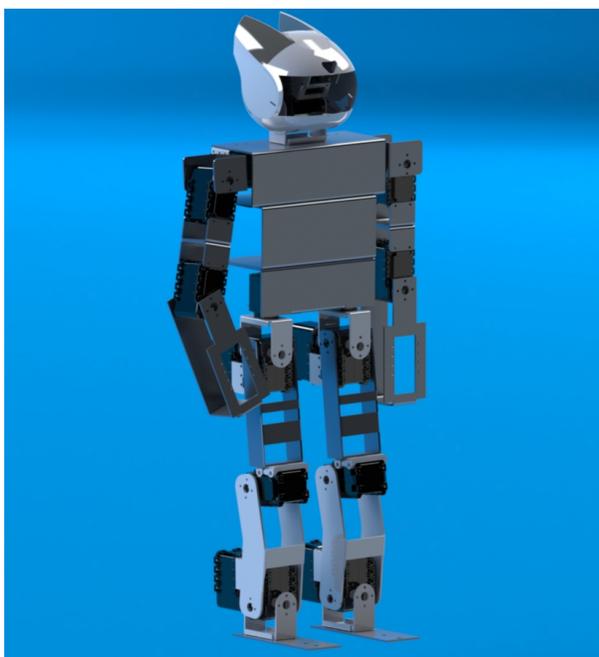


Figura 7.1: Suchí con cabeza montada.

Bibliografía

- [1] Brindle A. “Genetic Algorithms for Function Optimization.” Universidad de Alberta, Canada, 1991.
- [2] Jardon Huete A. “Metodología de Diseño de Asistenciales. a Robot Portátil Asibot.” Tesis doct. Universidad Carlos III de Madrid, 2006.
- [3] Konno A. y col. “Design and development of the biped prototype ROBIAN”. En: *Robotics and Automation, 2002. ICRA '02. IEEE International Conference on*. Vol. 2. 2002, 1384-1389 vol.2.
- [4] *Arduino y dynamixel Ax-12*. URL: <http://savageelectronics.blogspot.mx/2011/01/arduino-y-dynamixel-ax-12.html>.
- [5] Feijó B. y Bento J. *A Framework for Cognitive Models of Desing*. Inf. téc. Centro de Ingeniería y Mecánica Estructural de la Universidad Tecnica de Lisboa., 1991.
- [6] *BIOLOID*. URL: <http://www.robotis.com/xe/bioloid.en>.
- [7] Hsiang-Min C. y col. “Mechanical Desing of Small-Size Humanoid Robot: TWNHR-VI.” En: *13th Robot World Congress, FIRA*. Vol. 103. 2010. Págs. 98-105.
- [8] Luna C. y col. “Tobillo o articulación talocrural: articulación troclear formada por el astrágalo y la región distal de la tibia y el peroné (2a. parte)”. En: *Podología clínica*. Vol. 3. 1. 2002, págs. 22-27.
- [9] Zhu. C y Kawamura. A. “Walking Principle Analysis for Biped Robot with zmp Concept, Friction Constraint, and Inverted Pendulum Model.” En: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 1. 2003. Págs. 364 -369.
- [10] Kuo Arthur D. “Choosing your steps carefully”. En: *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 14.2 (2007), págs. 18-29.
- [11] Vite-Téllez D.A., Cruz-Villar C.A. y Rodríguez Ángeles A. “Diseño e Integración de un Robot Bípedo.” En: *Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático. Zacatecas, México*. 2009.
- [12] Kathryn Beaty de Farris. *Diccionario Básico del Mixteco de Yosondúa, Oaxaca*. Instituto Lingüístico de Verano, A. C., 2012. Pág. 74.
- [13] Desing definition. *International Council of Societies of Industrial Design*. Inf. téc. URL: <http://www.icsid.org/education/education.htm>.

- [14] Dynamixel. *Hoja de datos Ax-12+*. URL: <http://www.robotis.com/zbxe/dynamixel>.
- [15] Arias L. E. y col. "Patrón de marcha 3D de tipo cicloidal para humanoides y su aplicación al robot bioloid". En: *Revista iberoamericana de ingeniería mecánica*. Vol. 18. 1. 2014, págs. 3-22.
- [16] González H. V. E. "Diseño y Construcción de Kokone, Un Pequeño Robot Humanoide." Tesis de Maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Computación., 2009.
- [17] *Executive Summary of World Robotics 2011 Service Robots*. URL: <http://es.slideshare.net/alanek/world-robotics-2011-executive-summary..>
- [18] Aguayo. F y Soltero. V. *Metodología del diseño Industrial. un enfoque desde la Ingeniería Concurrente*. Madrid. Ra-Ma Editorial, S.A., 2002.
- [19] Tan G. y Zhang P. "A new method for computing key dynamic parameters of dynamic walking of biped robots". En: *ICIPS'97. 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, 1997*. Vol. 2. IEEE. 1997. Págs. 1292-1296.
- [20] *GS-12*. Inf. téc. ROBOTIS e-manual. URL: http://support.robotis.com/en/techsupport_eng.htm#product/auxdevice/sensor/dxl_gyro.htm.
- [21] Takeda H., Veerkamp P. y Yoshikawa. H. *Modeling desing process*. 1990. Págs. 37-48. URL: AIMagazine11Number4..
- [22] *HOVIS Lite Humanoid Robot*. URL: <http://www.robotshop.com/en/hovis-lite-humanoid-robot.html>.
- [23] *Humanoid Robot HR-2*. Inf. téc. Chalmers University. URL: <http://blog.trossenrobotics.com>.
- [24] Park Ill-W. y col. "Development of a Humanoid Biped Walking Robot Platform KHR-1 Initial Desing and Its Performance Evaluation." En: *3rd LARP Int. Work. on Humanoid and Human Friendly Robotics*. 2002. Pág. 1421.
- [25] French. M J. *Conceptual Desing for Engineers*. Springer; 3rd edition, 1999.
- [26] Wolf J. y col. "BunnyBot: Humanoid Platform for Research and Teaching". En: *FIRA Robo-World Congress 2009, Incheon, Korea*. 2009. Págs. 25-33.
- [27] Yamaguchi J. y col. "Development of a dynamic biped walking system for humanoid development of a biped walking robot adapting to the humans' living floor". En: *Robotics and Automation, 1996 IEEE International Conference on*. Vol. 1. 1996, 232-239 vol.1.
- [28] Nunez J.-A., Pamanes L.-I. y Olvera. "Simulation and Experimentation of Walking of the Bioloid Humanoid Robot." En: *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*. 2011, págs. 19-25.
- [29] Akachi K. y col. "Development of humanoid robot HRP-3P". En: *Humanoid Robots, 2005 5th IEEE-RAS International Conference on*. IEEE. 2005, págs. 50-55.
- [30] Capek K. y Wyllie D. *R.U.R (Rossum's Universal Robots)*. Echo Library, 2010. ISBN: 9781406867114. URL: <https://books.google.com.mx/books?id=cJ-jOWPstjkC>.

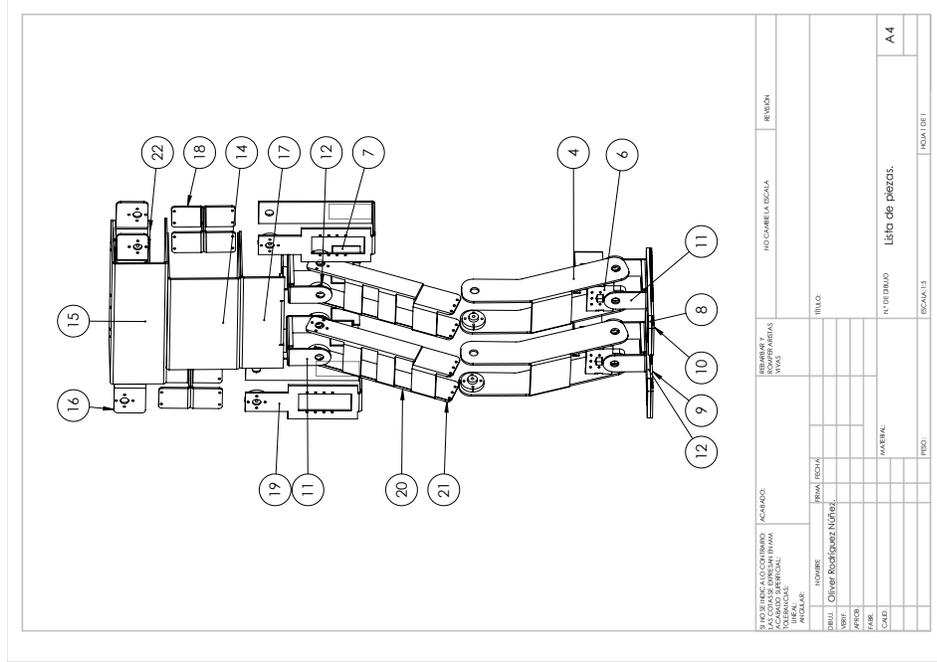
- [31] Kaneko K. y col. “Cybernetic human HRP-4C”. En: *Humanoid Robots, 2009. Humanoids 2009. 9th IEEE-RAS International Conference on*. 2009. Págs. 7-14. DOI: 10.1109/ICHR.2009.5379537.
- [32] Kaneko K. y col. “Hardware improvement of Cybernetic Human HRP-4C for entertainment use.” En: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2011, págs. 4392-4399.
- [33] Nagasaka K., Inoue. H. e Inaba. M. “Dynamic Walking Pattern Generation for a Humanoid Robot Based on Optimal Gradient Method.” En: *Systems, Man, and Cybernetics. IEEE SMC'99*. 1999. Págs. 909-913.
- [34] Nagasaka K., Inoue H. e Inaba M. “Dynamic walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method”. En: *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference. 1999 IEEE International Conference on*. Vol. 6. 1999, 908-913 vol.6. DOI: 10.1109/ICSMC.1999.816673.
- [35] Nagasaka K. y col. “Integrated motion control for walking, jumping and running on a small bipedal entertainment robot”. En: *Robotics and Automation, 2004. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*. Vol. 4. 2004, 3189-3194 Vol.4.
- [36] Nishiwaki K. y col. “Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots”. En: *ICRA '02. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. 2002. Págs. 3105-3110. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1013704.
- [37] Jung-Y. Kim, Ill-W. Park y Jun-H. Oh. “Desing and Walking Control of the Humanoid Robot, KHR-2(KAIST Humanoid Robot-2).” En: *International Conference on Control, Automation, and Systems*. 2004. Págs. 25 -27.
- [38] SangJoo Kwon y Jinhee Park. “Kinesiology-Based Robot Foot Design for Human-Like Walking.” En: *Int J Adv Robot Syst. Vol.9*. 2012. Págs. 1831-1836.
- [39] De la Guia I. y col. “Fast algorithm for kinematics problems solving of the low-cost legged robot leroi”. En: *Robotics Lab. Department of Systems Engineering and Automation, University Carlos III of Madrid, Spain* (2002).
- [40] *La alternativa al plomo y al cadmio*. URL: <http://www.cienciateca.com/ctslibat.html>.
- [41] *La familia arduino*. URL: <http://www.tdrobotica.co/tutoriales/arduino/280-arduino-basico-t01ab-familia-arduino>.
- [42] Hun-ok Lim, Tajima y Kensuke. “Development of a biped walking robot”. En: *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS'07. International Conference on*. IEEE. 2007, págs. 1126-1131.
- [43] Cabás Ormaechea. L M. “Mecatrónica Bioinspirada de Robots Humanoides de Tamaño Natural.” Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [44] Daisuke M., Takashi M. y Karl F. MacDorman. *Humanoid Robots: Human Like Machines: Generating Natural Motion in an Android by Mapping Human Motion. Chapter 17*. Hackel M.

- [45] Dutra S. M., Salcedo L. I. y Prieto D. L. M. “New Technique for Inverse Kinematics Problem Using Simulated Annealing.” En: *EngOpt - International Conference on Engineering Optimization*. 2008. Págs. 945-970.
- [46] Kwan M. y Hubbard M. “Optimal Foot Shape for a Passive Dynamic Biped.” En: *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 248. no 2. 2007. Págs. 331-339.
- [47] Palma V. A. M. *Funciones del Pie*. Inf. téc. Escuela de Podología. Universidad de Buenos Aires.
- [48] *Miniature Humanoid Robot HOAP-1*. Inf. téc. FUJITSU AUTOMATION LIMITED. URL: <http://www.automation.fujitsu.com/products/products07.html>.
- [49] Keith L. Moore y col. *Anatomía con orientación clínica*. 2009. Pág. 1205.
- [50] Mori. y col. “The uncanny valley.” En: *Robotics and Automation Magazine IEEE*. IEEE. 2012, págs. 98-100.
- [51] Khatib O. y Siciliano B. *Handbook of Robotics*. Springer, 2008. Págs. 1307-1329.
- [52] International Federation of Robotics. *Definition of Service Robots*. Inf. téc. URL: <http://www.ifr.org/service-robots/>.
- [53] Okita. y col. “An objective evaluation of a segmented foot model”. En: *Gait and Posture*. Vol. 30. 1. Elsevier, 2009. Págs. 27-34.
- [54] Ill-Woo Park, Jung-Yup Kim y Jun-Ho Oh. “Online Biped Walking Pattern Generation for Humanoid Robot KHR-3(KAIST Humanoid Robot - 3: HUBO)”. En: *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*. 2006, págs. 398-403.
- [55] Wang Q., Huang Y. y Wang L. “Passive dynamic walking with flat feet and ankle compliance”. En: *Robotica* 28 (03 mayo de 2010.), págs. 413-425. ISSN: 1469-8668. DOI: 10.1017/S02\textbf.
- [56] Wang Q. y col. “Effects of Foot Shape on Energetic Efficiency and Dynamic Stability of Passive Dynamic Biped with Upper Body.” En: *I. J. Humanoid Robotics*. 2010. Págs. 295-313.
- [57] *Robonova 1 el robot humanoide para todos los públicos*. Inf. téc. URL: <http://www.superrobotica.com/robonova.htm>.
- [58] Pugh. S. *Total desing: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Inf. téc. Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [59] Woods Sarah. “Exploring the design space of robots: Children’s perspectives”. En: *Interacting with Computers* 18.6 (2006.), págs. 1390-1418.
- [60] Contreras T. y col. “Análisis Cinemático del Robot Humanoide: Darwin OP”. En: *Memorias del primer concurso de investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica IDIT 2012*. Págs. 5-8.
- [61] Dempster W. T. y Gaughran R. L. G. “Properties of Body Segments Based on Size and Weight. Department of Anatomy, The University of Michigan.” En: *AM. J. ANAT.*, 120. 2010. Págs. 33-54.

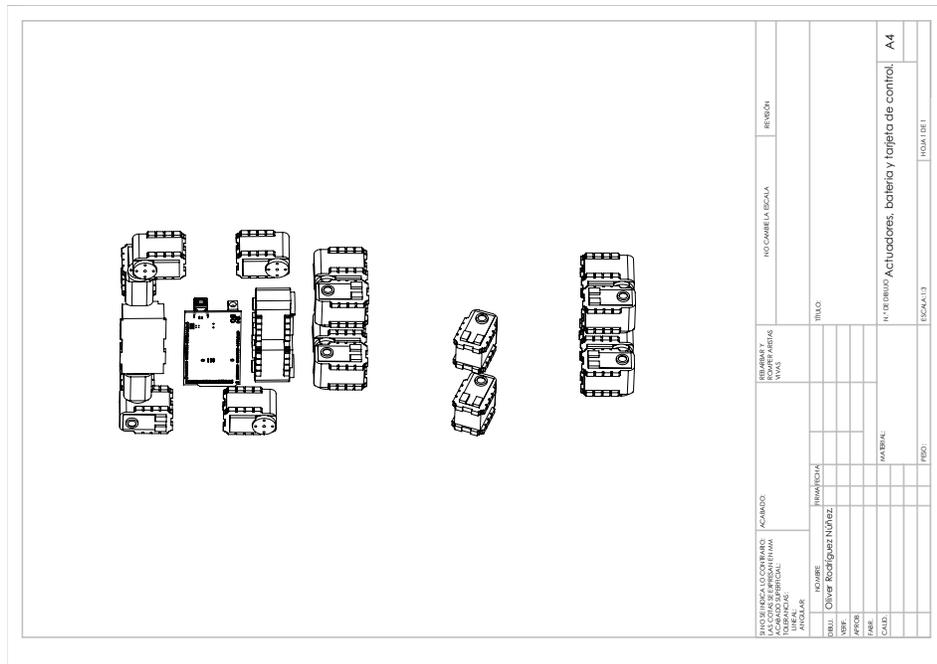
-
- [62] Inman V. T, Ralston H. J y Todd F. *Human Walking*. Baltimore, London. Williams y Wilkins, 1981.
- [63] *Tienda de robótica en línea*. Inf. téc. URL: <http://www.roboshop.com>.
- [64] Nunez V., Yokoi K. y Stasse O. *Humanoid Robots: Human Like Machines: Inertial Forces Posture Control for Humanoid Robots Locomotion. Chapter 8*. Hackel M.
- [65] Nunez J. V. y col. “Explicit analytic solution for inverse kinematics of bioloid humanoid robot”. En: *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian*. IEEE. 2012, págs. 33-38.
- [66] Dempster T. W. y Gaughran G. *Properties of Body Segments Based on Size and Weight*. Inf. téc. Department of Anatomy, The University of Michigan., 1965.
- [67] Qining Wang y col. *Segmented foot with compliant actuators and its applications to lower-limb prostheses and exoskeletons*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [68] Wang W.J. y Crompton R.H.. “Analysis of the human and ape foot during bipedal standing with implications for the evolution of the foot.” En: *Journal of Biomechanics 37*. 2004. Págs. 1831-1836.
- [69] Huang Q. Y. y col. “Planning walking patterns for a biped robot”. En: *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 17.3 (2001), págs. 280-289.
- [70] Watanabe S. Y. y col. “The intelligent ASIMO: system overview and integration”. En: *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*. Vol. 3. 2002, 2478-2483 vol.3.

ANEXO A: Planos del robot humanoide.

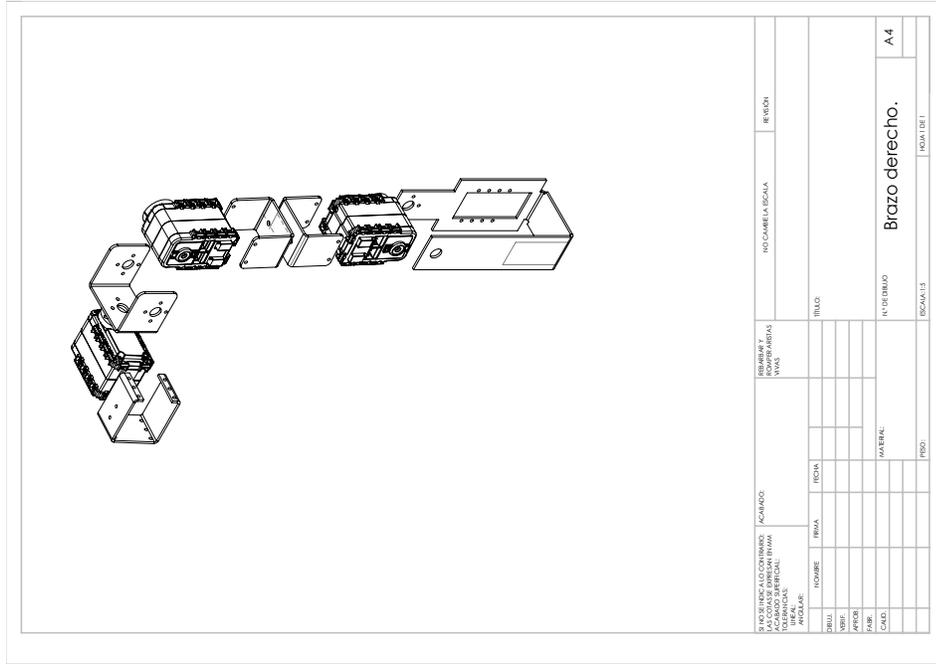
Lista de piezas del humanoide Suchí.		
ID	Nombre de pieza	Cantidad.
1	ax-12 ₁	18
2	ax-12 _h orn	17
3	battery	1
4	p4	2
5	fr04 _h 101 ₁	2
6	FP04-F7	2
7	fr04 _x 101	4
8	pie2	2
9	basepie1	2
10	basepie2	2
11	fr04 _h 1011	2
12	pie1	2
13	ax-12 _h orn11	1
14	torso12	1
15	torso13	1
16	hombroizq	2
17	torso1	1
18	br1	4
19	brazo12	2
20	p12	2
21	p13	2
22	ptorso1	2
23	arduinorep	1



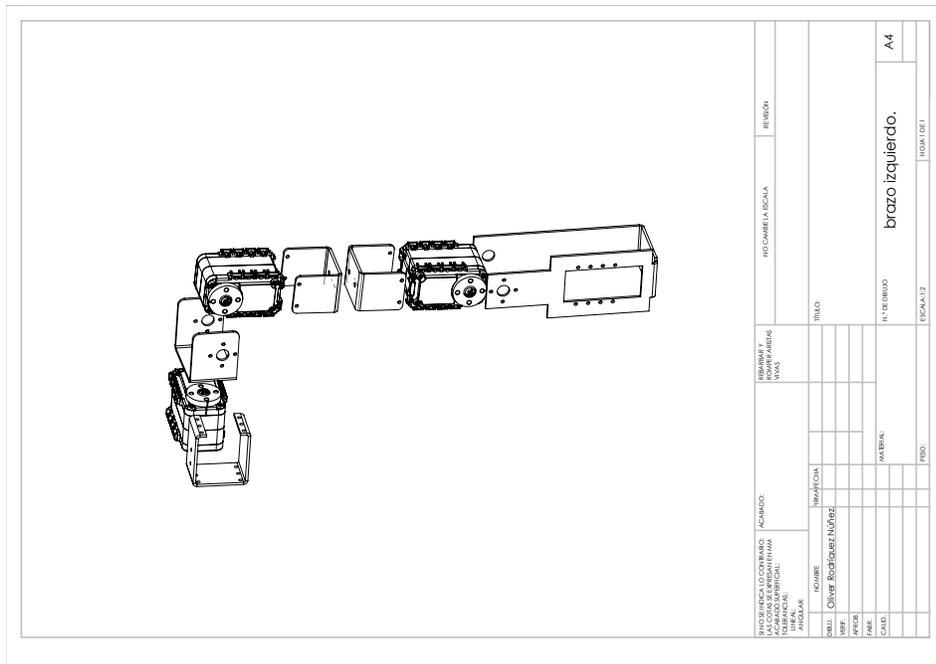
NOMBRE DEL COMPONENTE ACABADO MATERIAL ANILLO		ACABADO MATERIAL ANILLO	REVISIÓN Y NÚMERO DE PARTES VÁLIDAS	HOJAS DE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE DISEÑO	FECHA NÚMERO DE DISEÑO	TÍTULO	MATERIAL	N.º DE DIBUJO ESCALA 1:1	HOJA 1 DE 1
FABRICA CAD PROY	MATERIAL	N.º DE DIBUJO ESCALA 1:1	MATERIAL	N.º DE DIBUJO ESCALA 1:1	HOJA 1 DE 1
N.º DE DIBUJO: Actuaadores, batería y tarjeta de control.					A4



NOMBRE DEL COMPONENTE ACABADO MATERIAL ANILLO		ACABADO MATERIAL ANILLO	REVISIÓN Y NÚMERO DE PARTES VÁLIDAS	HOJAS DE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE DISEÑO	FECHA NÚMERO DE DISEÑO	TÍTULO	MATERIAL	N.º DE DIBUJO ESCALA 1:1	HOJA 1 DE 1
FABRICA CAD PROY	MATERIAL	N.º DE DIBUJO ESCALA 1:1	MATERIAL	N.º DE DIBUJO ESCALA 1:1	HOJA 1 DE 1
N.º DE DIBUJO: Actuaadores, batería y tarjeta de control.					A4



NOMBRE DEL COMPONENTE: ACABADO NOMBRE DEL MATERIAL: ACABADO NOMBRE DEL FABRICANTE: ACABADO NOMBRE DEL PROYECTO: ACABADO		NOMBRE DEL COMPONENTE: ACABADO NOMBRE DEL MATERIAL: ACABADO NOMBRE DEL FABRICANTE: ACABADO NOMBRE DEL PROYECTO: ACABADO		NOMBRE DEL COMPONENTE: ACABADO NOMBRE DEL MATERIAL: ACABADO NOMBRE DEL FABRICANTE: ACABADO NOMBRE DEL PROYECTO: ACABADO	
NO. DE INGENIERO	NO. DE DISEÑO	NO. DE INGENIERO	NO. DE DISEÑO	NO. DE INGENIERO	NO. DE DISEÑO
FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
TÍTULO: Bravo derecho. N.º DE DIBUJO: A4 ESCALA: 1:1		TÍTULO: Bravo izquierdo. N.º DE DIBUJO: A4 ESCALA: 1:1		TÍTULO: Bravo izquierdo. N.º DE DIBUJO: A4 ESCALA: 1:1	



NOMBRE DEL COMPONENTE: ACABADO NOMBRE DEL MATERIAL: ACABADO NOMBRE DEL FABRICANTE: ACABADO NOMBRE DEL PROYECTO: ACABADO		NOMBRE DEL COMPONENTE: ACABADO NOMBRE DEL MATERIAL: ACABADO NOMBRE DEL FABRICANTE: ACABADO NOMBRE DEL PROYECTO: ACABADO		NOMBRE DEL COMPONENTE: ACABADO NOMBRE DEL MATERIAL: ACABADO NOMBRE DEL FABRICANTE: ACABADO NOMBRE DEL PROYECTO: ACABADO	
NO. DE INGENIERO	NO. DE DISEÑO	NO. DE INGENIERO	NO. DE DISEÑO	NO. DE INGENIERO	NO. DE DISEÑO
FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
TÍTULO: Bravo izquierdo. N.º DE DIBUJO: A4 ESCALA: 1:1		TÍTULO: Bravo izquierdo. N.º DE DIBUJO: A4 ESCALA: 1:1		TÍTULO: Bravo izquierdo. N.º DE DIBUJO: A4 ESCALA: 1:1	

