



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Desarrollo de tren inferior dinámico para un prototipo de robot humanoide.

TESIS

QUE PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA
RAÚL ROMERO DARDÓN

ASESOR
DR. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ AMECA

PUEBLA, PUE.

ENERO 2022

Dedicatoria	5
Agradecimientos	6
Capítulo 1. Introducción	7
Antecedentes	7
1.2 Descripción del problema	9
1.3 Objetivos generales y específicos	10
1.4 Hipótesis	10
1.5 Alcances y limitaciones	10
Alcances	10
Limitaciones	11
1.6 Justificación	11
1.7 Organización de la tesis	11
Capítulo 2. Marco teórico	12
2.1 Robot	13
2.2 Robótica social	13
2.3 Robot humanoide	14
2.4 Androide	14
2.5 Clasificación de robots sociales.	14
2.5.1 Partes de un robot humanoide	15
2.5.2 Miembro inferior	16
2.6 Sistema de tren inferior	17
2.6.1 Eslabones	18
2.6.2 Articulaciones	18
2.6.3 Servomotores	21
2.6.4 Raspberry pi 2 B	22
2.7 Equilibrio estático y dinámico	23
2.7.1 Máquina de estados finitos	24
Autómatas Finitos Deterministas	24
Diagrama de transición	25
Autómatas Finitos No Deterministas	26
	2

2.7.2 Lenguaje interpretado Python	27
2.7.3 Intérprete	27
2.8 Modelado 3D en SolidWorks	28
Capítulo 3. Diseño del tren inferior dinámico	29
3.2 Diseño Estructural	29
3.3 Diseño Electrónico	35
3.3.1 Servomotores	35
3.3.2 Sensores	36
Giroscopio	36
Acelerómetro	36
3.3.3 Controlador	37
3.3.4 Sistema de potencia	37
Batería tipo LiPo	37
Driver PCA9685	38
3.4 Diseño Lógico	39
3.4.1 Diseño lógico general	39
3.4.2 Diseño lógico del ciclo de marcha	41
Esquema basado en las ocho fases de la marcha humana	41
Capítulo 4. Implementación Tren Inferior Dinámico (TID) del Humanoide	47
4.1 Ensamblaje	48
Capítulo 5. Resultados, conclusiones y trabajo futuro	54
5.1. Resultados	54
5.2. Conclusión	55
5.3. Trabajo futuro	56
Referencias	57

Dedicatoria

A mi madre y a mi hermana.

Agradecimientos

A todos los profesores y profesoras con los que fue un honor compartir clases juntos en la FCC BUAP.

Tanto como amigos y amigas que tuve el privilegio de ir conociendo en el transcurso del tiempo, aprender junto con ellos y compartir buenas experiencias.

Un agradecimiento especial para el Dr. José Luis Hernández Ameca, Mtro. Gerardo Martínez Guzmán, aprendí tanto de ellos y estoy orgulloso de tener tan buenos maestros que me brindaron siempre su apoyo.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Un robot bípedo es un sistema conformado por dos miembros en el tren inferior, los cuales le permiten la realización de desplazamientos. Dentro de este tipo de robots se encuentran dos tipos. Dinámico y Estático, el primer tipo de bípedo no debe detener marcha para avanzar mientras que en el tipo estático, el robot debe interrumpir su avance para garantizar su equilibrio. [1]

Los robots bípedos se han utilizado para complementar a los robots humanoides y formar parte de la investigación actual de los sistemas de caminata, cuyo objetivo es lograr movimientos más naturales similares a los humanos.

Thang Zhe reporta que la planificación de la caminata humanoide es una tarea complicada debido al alto número de Degrees Of Freedom (DOF) y la estructura mecánica variable durante la caminata. Presentó un método de planificación para los movimientos tridimensionales (3-D) desarrollado en base a un modelo de un robot humanoide típico con 12 DOF en la parte inferior del cuerpo. El proceso de planificación incluye la generación de trayectoria para la cadera, tobillo y rodilla que son las articulaciones en el espacio cartesiano. El equilibrio del robot se aseguró ajustando el movimiento de la cadera. Los ángulos para cada DOF se obtuvieron del cálculo cinemático tridimensional. El cálculo dio trayectorias de referencia de todos los DOF en el robot humanoide que se usaron para controlar el robot real. Los resultados de la simulación muestran que el método es efectivo. [2]

Tzoo-Hseng S. LI presentó, un modelo de péndulo invertido lineal mejorado (LIPM) y una planificación de la marcha para los cuales propuso algoritmos. El LIPM es un concepto ampliamente utilizado para generar una referencia de marcha, y

proporciona un modelo simplificado para planificar una trayectoria y centro de masa cuando se le da un punto de momento cero adecuado. Sin embargo, uno de los supuestos de LIPM es que los pies del robot no tienen masa, por lo que la masa del pie de apoyo puede no tomarse en cuenta para simplificar, entra en conflicto con las distribuciones de masa de los seres humanos y la mayoría de los robots humanoides. Por lo tanto, se propuso un LIPM de doble enlace (DLIPM) para eliminar el conflicto sobre la distribución de masa. Además, se propone un algoritmo de planificación de la marcha para la generación de referencia de la caminata natural. En los resultados de la simulación, el método propuesto se implementa basado en un modelo de un robot humanoide del tamaño de un adolescente llamado David Junior. Los resultados de la simulación validan la viabilidad y practicabilidad del método propuesto. Además, las comparaciones entre LIPM convencionales y DLIPM demuestran el rendimiento del método. Finalmente, el método propuesto se implementa en David Junior para el torneo de levantamiento de pesas de la FIRA RoboWorld Cup 2015, un evento en el que David Junior ganó el primer lugar. [3]

Kevin Galloway presenta un método novedoso para abordar la saturación del actuador para sistemas no lineales incorporando directamente límites de entrada definidos por el usuario en un diseño de controlador. En particular, considera la aplicación de caminata bípeda y demostración del método [basado en una programación cuadrática (QP) más la implementación de un controlador basado en la función de control Lyapunov (CLF)] permite un rendimiento gradual de degradación mientras continúa caminando bajo límites de entrada cada vez más estrictos. Se basó en un trabajo previo, que ha demostrado la efectividad de los controladores basados en CLF para estabilizar marcha periódica de caminantes bípedos. En su trabajo posterior presenta un marco teórico, que resulta en un manejo más efectivo de saturación de control y proporciona un medio para incorporar una familia completa de restricciones definidas por el usuario en el cálculo en línea de un controlador basado en CLF. Este artículo concluye con una validación experimental de los principales resultados en el robot bípedo MABEL, que demuestran la utilidad del enfoque CLF basado en QP para control robótico en tiempo real. [4]

Fernando Sáenz menciona que ha desarrollado la generación de trayectorias, partiendo de un esquema elemental de un sistema de control cinemático, se ha desarrollado un conjunto de funciones que implementan este sistema, para la generación de trayectorias del tren inferior del robot humanoide TEO. A partir de la información sobre la plataforma bípeda y la planificación del paso que se va a realizar, se establece un conjunto de valores que tomarán las articulaciones en ciertos instantes de tiempo durante el movimiento. El objetivo de este trabajo es llevar a cabo la interpolación de estos valores articulares, para dar como resultado las curvas que describen la posición de las articulaciones de la estructura durante todo el tiempo que dura el paso. [5]

Leonardo E. Contreras estudió modelos de caminata dinámica activa, en los que existen actuadores o elementos que proporcionan energía al sistema para lograr la caminata. Se mostró el análisis partiendo de modelos simples incrementando su complejidad y exactitud; iniciado con un modelo de péndulo invertido, pasando por un modelo de una pierna hasta llegar a un modelo de cinco eslabones. Para cada uno de los modelos se presentan el análisis dinámico, bajo la técnica de dinámica Lagrangiana y el método de los gráficos de unión. Los resultados del modelo de cinco eslabones son validados comparando con los resultados de otras investigaciones. [6]

1.2 Descripción del problema

El sistema de caminata bípedo es uno de los principales planteamientos que se presentan en el área de la robótica, ya que su objetivo es lograr que un robot presente movimientos funcionales y semejantes a los humanos para que de esta manera se pueda desarrollar la marcha y realizar una rutina de caminata.

En el presente trabajo se aborda el problema de diseñar y construir el tren inferior para un robot bípedo el cual será capaz de caminar en un ambiente controlado.

Para resolver dicho problema se propone utilizar técnicas de diseño matemático, algoritmia y el uso de software de diseño asistido por computadora (CAD). También

se abordará el problema de la lógica de funcionamiento del robot, para lo cual se utilizarán diagramas de procesos y máquinas de estados.

1.3 Objetivos generales y específicos

- **Objetivo general:** Diseñar, construir y plantear la lógica del funcionamiento para el sistema de tren inferior dinámico.
- **Objetivos específicos:**
 - Buscar información.
 - Diseñar y modelar la estructura del tren inferior dinámico.
 - Construir el diseño estructural.
 - Plantear secuencia del sistema de caminata.
 - Mostrar resultados, redactar conclusiones y trabajo futuro.

1.4 Hipótesis

Se puede construir un tren inferior dinámico mediante la aplicación de las ciencias de la computación.

1.5 Alcances y limitaciones

Alcances

En el presente trabajo se desarrolló un prototipo de Tren Inferior Dinámico para un robot social, con las dimensiones proporcionales a las de un cuerpo humano infantil, se ha diseñado para realizar una caminata dinámica basada en las fases del ciclo de marcha de un ser humano. Tomándose como base, técnicas de diseño asistido por computadora e impresión de piezas en 3D, teorías de robótica social y aplicación de dispositivos electrónicos (Sistema empotrado, sensores y actuador). Se realizaron pruebas de forma aislada sobre el ensamble con un esqueleto prototipo diseñado en 3D y posteriormente ensamblado con materiales de acceso común como cartón, pegamento, pintura y periódico. Por lo que queda demostrado que el alcance propuesto de este trabajo se realizó de manera satisfactoria.

Limitaciones

El prototipo obtenido no se logró probar en un ambiente amplio frente a personas, debido a los problemas suscitados del COVID-19. No se lograron realizar pruebas físicas del ciclo de marcha aplicado al esqueleto. Por el momento el Tren Inferior Dinámico aún no se encuentra unido con las demás partes del cuerpo del robot final.

1.6 Justificación

Colaborar junto a mis compañeros tesisistas del laboratorio de Sistemas Robóticos aplicando los conocimientos adquiridos durante la formación profesional dentro de la universidad para desarrollar tecnologías nuevas ya que la aportación del presente trabajo es hacia la robótica, las ciencias de la computación y a la sociedad en general. El prototipo será de gran ayuda para optimizar los diseños y sistemas que controlan a los robots bípedos, además de ser de los primeros prototipos de la facultad en Ciencias de la Computación de la BUAP.

1.7 Organización de la tesis

El presente trabajo está dividido en cinco capítulos. En el primer capítulo se desarrolla el planteamiento del problema, objetivos e investigación formal necesaria para el desarrollo de un Tren Inferior Dinámico, así como sus alcances, limitaciones y justificación.

Por su parte en el capítulo dos se comienzan a detallar los conceptos necesarios que se requieren para llevar a cabo del desarrollo del Tren Inferior Dinámico, estableciendo el marco Teórico, y las bases sobre los elementos utilizados durante todo el desarrollo. En el capítulo siguiente el número tres se habla sobre el diseño y sus bases para ser funcional, así como físicamente proporcional a las medidas de un ser humano, además se llevó a cabo el diseño lógico para poder llevar a cabo el ciclo de marcha lo más apegado al de un humano.

El capítulo cuatro se enfoca en la construcción física del diseño del capítulo tres, así como medidas y detalles de la construcción de un esqueleto prototipo.

Por último, en el capítulo cinco, se encuentran las conclusiones que se fueron obteniendo conforme al desarrollo y avance del proyecto, se hacen propuestas sobre el trabajo y soluciones futuras.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Robot

Es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover material, piezas, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la realización de una variedad de tareas. [7] Mark R. Miller

Un robot es una máquina multi tarea programada electrónicamente capaz de llevar a cabo una serie de funciones, típicamente pero no exclusivamente por medios autónomos. Los verdaderos robots pueden reprogramarse electrónicamente para realizar otras tareas mediante señales enviadas por medio de un cable de conexión sin la necesidad de instalar nuevas piezas mecánicas internas o circuitos electrónicos. [8] Neil Sclater

Un robot es una máquina programable que puede manipular objetos y realizar operaciones que antes sólo podían realizar los seres humanos. El robot puede ser tanto un mecanismo electromecánico físico como un sistema virtual de software. Ambos coinciden en brindar la sensación de contar con capacidad de pensamiento o resolución, aunque gran parte de los robots por ahora se limitan a ejecutar órdenes dictadas por las personas. [9] Pérez Porto

2.2 Robótica social

La sociabilidad implica la existencia de relaciones de interacción. Un agente capaz de interactuar y poseer un comportamiento comunicativo es considerado social. La simple existencia de dos robots autónomos en el mismo entorno, impulsa aspectos del contacto social, sea éste directo o indirecto. [10] Vidal, Antonio

Es el área de estudio de robots sociales, se trata de robots que disponen de mecanismos de interacción con el ser humano siguiendo normas y pautas sociales. Con el objetivo de poder interactuar con el entorno, otros robots, o seres humanos, los robots sociales están equipados con un conjunto de sensores. [11] Núñez, Pedro

Son robots colaborativos preparados para desenvolverse en un mismo entorno con humanos y de manera totalmente autónoma. Pueden tener forma de robot humanoide, de androide o zoomorfos, y destacan por su nivel de motricidad, funcionalidad, prestaciones y nivel de inteligencia. [12] Revista de Robots.

2.3 Robot humanoide

También conocidos como androides son máquinas antropomórficas capaces de imitar funciones básicas del ser humano tales como hablar, caminar, ver, recolectar, limpiar y trasladar objetos. [13] Reyes Cortés.

Un robot humanoide es un robot que tiene forma humana. Son diseñados reproduciendo la forma de los brazos, de la cabeza y de los pies que los seres humanos. Pueden ser bípedos o pueden desplazarse por medio de una plataforma con ruedas en la parte inferior. [14] Revista de Robots.

Un robot humanoide es aquel que comparte una estructura muy similar a la de los humanos, bípedo, una cabeza en la parte superior, torso y dos brazos a los lados. [15] Gordon McComb.

2.4 Androide

Un androide o robot diseñado para simular la forma y los movimientos de los humanos. Son máquinas artificiales que se caracterizan por su capacidad de interacción con las personas. [16] Humanoide.click

Un androide es un robot diseñado para parecerse lo más posible a un humano incluyendo orejas, cabello e incluso una boca articulada. [17] Gordon McComb.

2.5 Clasificación de robots sociales.

Los robots sociales se pueden clasificar en cuatro ramas principales, dichas ramas se muestran en el cuadro sinóptico de la figura 1.

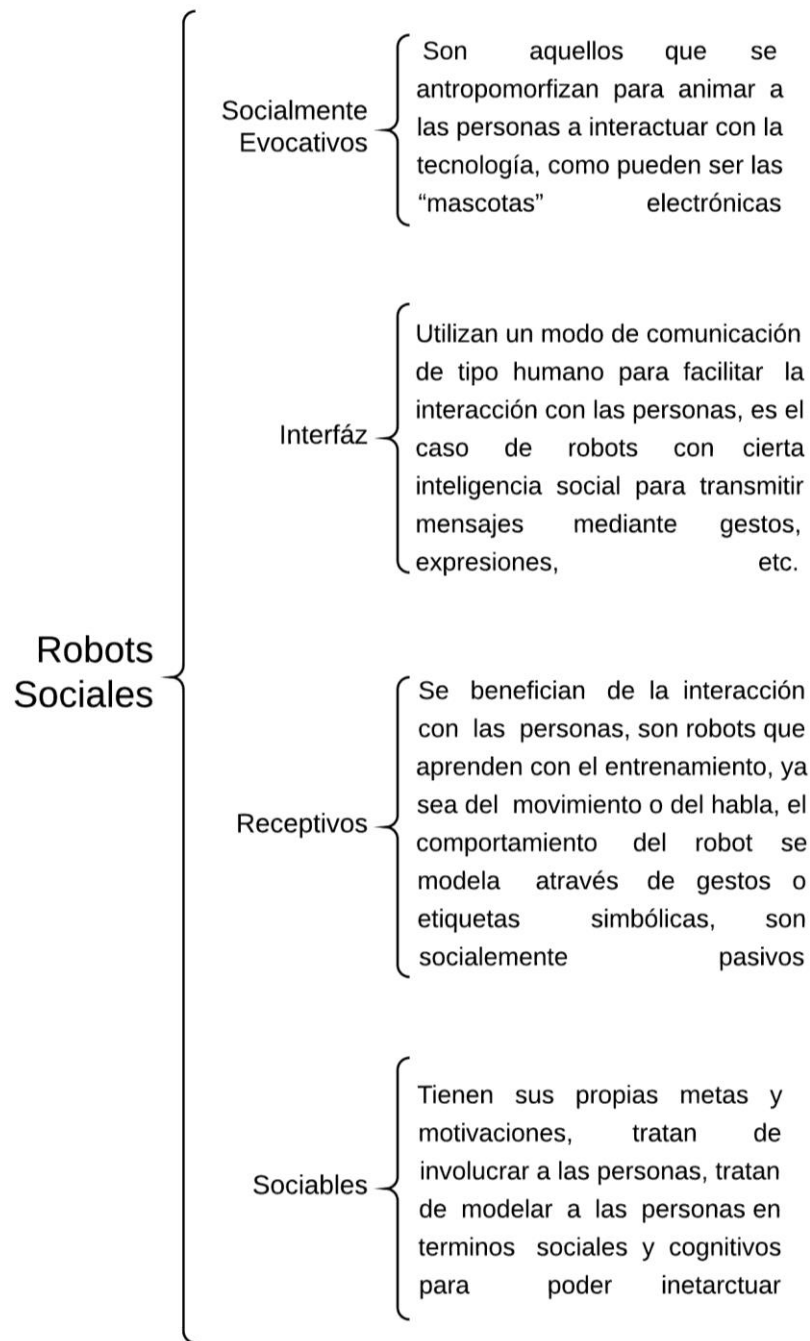


Fig.1. Clasificación de los Robots Sociales.

2.5.1 Partes de un robot humanoide

En el diagrama de la figura número 2 se muestra una articulación, así como los respectivos eslabones que une.

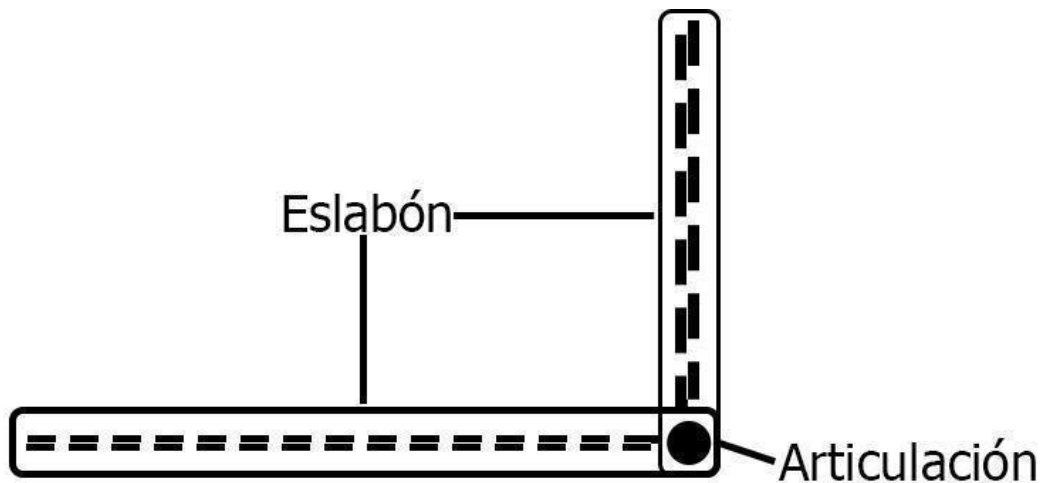


Fig.2. Ejemplo de eslabones y articulación.

2.5.2 Miembro inferior

Los miembros inferiores son cada una de las extremidades que se encuentran unidas al tronco a través de la pelvis mediante la articulación de la cadera, como se muestra en la figura 3. [18] Henry Gray

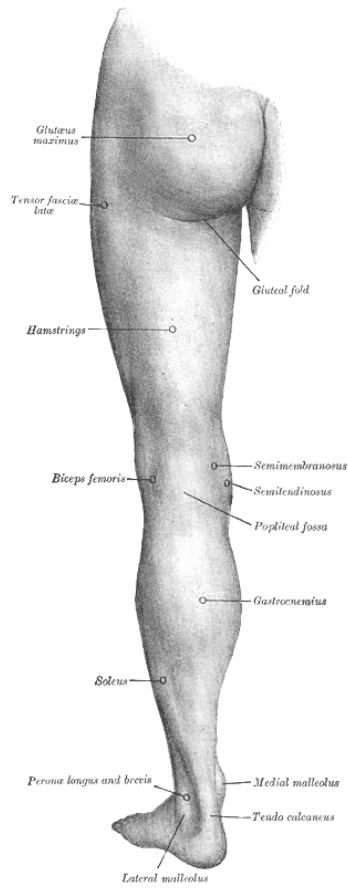


Fig.3. Partes principales del miembro inferior del cuerpo humano, recuperado de:

[1]

2.6 Sistema de tren inferior

Son los dos miembros inferiores en conjunto y todo lo que los compone a cada uno a partir de la cadera hacia abajo, de tal manera que cada uno de sus dos miembros se componen de las siguientes regiones: La cintura pelviana o pelvis, Muslo, Rodilla, Pierna, Tobillo y el Pie.

2.6.1 Eslabones

Eslabón: Son elementos mecánicos que constituyen la estructura del robot. Por medio de las articulaciones o uniones los eslabones pueden enlazarse entre sí para construir la cadena cinemática del robot como se muestra en la figura 4. [19] Colorado Roger.

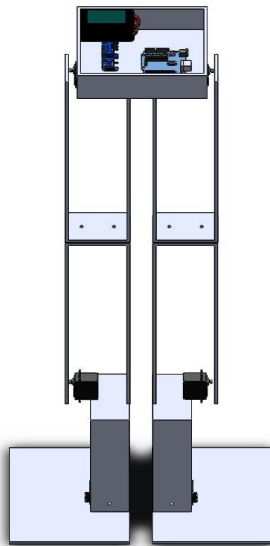


Fig.4. Fotografía de eslabones de un robot bípedo.

2.6.2 Articulaciones

Articulación: Son las uniones formadas por servomotores que permiten la conexión y movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos del robot, dependiendo del tipo de movimiento que realicen pueden ser de tipo rotacional o lineal, las articulaciones de tipo rotacional normalmente tienen sus unidades de medición en radianes o en grados mientras que las articulaciones lineales presentan sus medidas en metros. [20] Reyes Cortés.

Articulación tipo esférica: Permite la rotación libre del eslabón que se inserta, al permitir solo movimiento rotacional se restringen todos los movimientos

traslacionales, por lo que dicha articulación aporta 3-DOF uno por cada eje coordinado: x, y, z. Como se muestra en la figura 5. [21] Pérez Cisneros.

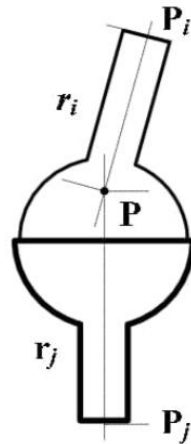


Fig.5. Articulación de tipo esférica, recuperado de: [2]

Articulación cilíndrica: permite dos movimientos, un desplazamiento prismático en la dirección z_j y la rotación alrededor del eje z_i sobre el punto P_i . en esta articulación, el desplazamiento se realiza sobre el eje z_j , mientras que la rotación lo hace sobre el eje z_i , que evidentemente son colineales, su producto cruz es cero por lo que se puede deducir que este tipo de articulación solo provee 2-DOF ya que los movimientos de rotación en los ejes x y se encuentran limitados. Como se muestra en la figura 6. [22] Pérez Cisneros.

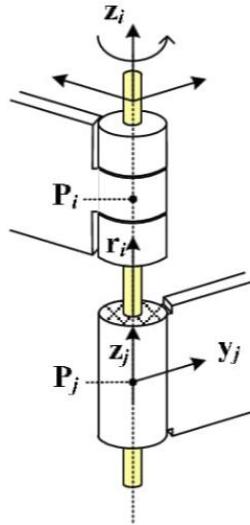


Fig.6. Articulación de tipo cilíndrica, recuperado de: [3]

Articulación prismática: Permite la realización de movimientos de traslación en la dirección del eje z exclusivamente por lo que esta articulación sólo nos provee 1-DOF. Como se muestra en la figura 7. [23] Pérez Cisneros.

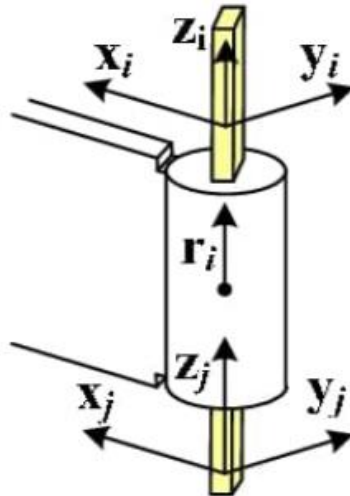


Fig.7. Articulación de tipo prismática, recuperado de: [4]

Articulación rotacional: Este tipo de articulación cancela todo tipo de desplazamiento pues solo permite un giro, solo se permite la rotación efectuada en el eje z por lo

que esta articulación sólo puede proveer 1-DOF. Como se muestra en la figura 8. [24] Pérez Cisneros.

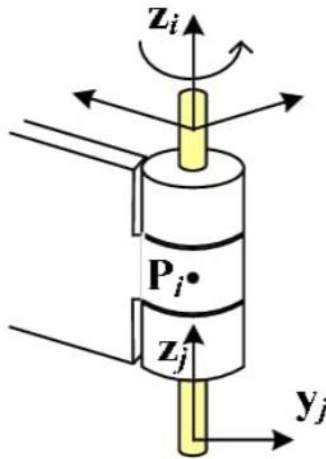


Fig.8. Articulación rotacional, recuperado de: [5]

2.6.3 Servomotores

Actuadores: Suministran las señales necesarias a las articulaciones para producir movimiento. Los actuadores empleados en robótica pueden ser servomotores, elementos neumáticos, eléctricos o hidráulicos. [25] Reyes Cortés.

Servomotores: Está compuesto por tres elementos principales el motor eléctrico, el sensor de posición para medir el desplazamiento articular, y el amplificador electrónico o servo amplificador construido por un conjunto de microprocesadores y electrónica de potencia que se encarga de acoplar y acondicionar el motor a la señal digital proveniente de un sistema mínimo digital. En la figura 9 se muestra la composición de un servomotor. [26] Reyes Cortés.

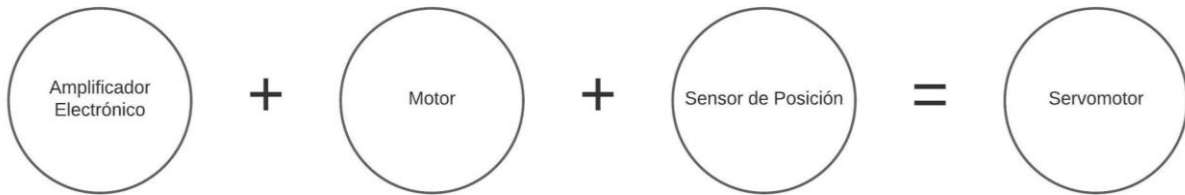


Fig.9. Composición de un servomotor

Actuador: Cualquier transductor que convierte energía eléctrica, hidráulica o neumática en energía para realizar movimientos o tareas. [27] Neil Sclater

2.6.4 Raspberry pi 2 B

Es una computadora de placa reducida, con diferentes modelos, el modelo B lanzado en 2014 cuenta con un procesador ARM Cortex-A7 de cuatro núcleos a 900MHz. Emplea el procesador gráfico VideoCore IV y cuenta con 1GB en RAM esta memoria está compartida con la gráfica. También incluye 40 pines GPIO, y cuenta con cuatro puertos USB, así como también con un jack de salida de audio de 3.5mm y un puerto de salida de video HDMI, además se incluye un conector para una cámara. La computadora no cuenta con una unidad de almacenamiento por lo que en la versión B este se obtiene de una tarjeta micro SD en la cual se debe de instalar el sistema operativo, siendo su sistema operativo oficial una versión adaptada de Debian, denominada Raspbian. En las figuras 10 y 11 se muestran fotografías de la parte superior e inferior de la tarjeta Raspberry pi 2 Modelo B.



Fig.10. Raspberry pi 2 Modelo B , recuperado de: [6]



Fig.11. Backplate Raspberry pi 2 Modelo B, recuperado de: [7]

2.7 Equilibrio estático y dinámico

Existen dos modelos básicos de equilibrio (balanceo) en la locomoción bípeda: el “equilibrio estático” y el “equilibrio dinámico”. El equilibrio estático lleva a

movimientos lentos y menos naturales, mientras que para ganar eficiencia y velocidad se tiene que conseguir un equilibrio dinámico. Los dos tipos de equilibrio se basan en la implementación de leyes de control que utilizan el concepto de área de soporte. [28] Pardos Gotor.

2.7.1 Máquina de estados finitos

Las Máquinas de estados Finitos conocidas como Finite State Machines por su traducción al inglés, nos sirven para realizar procesos bien definidos en un tiempo discreto. Reciben una entrada, hacen un proceso y nos entregan una salida. [29] Gutiérrez Orozco

Autómatas Finitos Deterministas

Un autómata recibe secuencialmente una cadena de símbolos y cambia de estado por cada símbolo leído o también puede permanecer en el mismo estado. Al final de la lectura el estado del Autómata nos indica si la cadena es aceptada o mejor dicho pertenece al Lenguaje que describe nuestra máquina. Si al final de leer todos los símbolos de entrada la máquina está en alguno de los estados Finales, entonces esa cadena es aceptada, si el estado no es final entonces la cadena no pertenece al lenguaje.

Las partes que componen una Autómata son cinco y se pueden definir:

$A = \{Q, q_0, F, \Sigma, \delta\}$ donde:

Q: Conjunto finito de estados.

q_0 : Estado inicial donde $q_0 \in Q$. Debe haber uno y sólo un estado inicial.

F: Conjunto de estados finales $F \subseteq Q$. El estado q_0 también puede ser final.

Σ : Alfabeto finito de entrada.

δ : Función de Transición $Q \times \Sigma \rightarrow Q$.

Diagrama de transición

En un diagrama de transición existe un nodo por cada estado q_i de Q . Los estados finales están encerrados en un círculo doble. El estado inicial q_0 es apuntado por una flecha que no proviene de ningún otro estado. Para cada estado q_i y una entrada a , hay exactamente una y sólo una flecha que inicia en q_i y termina en $\delta(q_i, a)$, es decir en q_k , la flecha es etiquetada como a . Si q_k pertenece a F decimos que la entrada es aceptada.

Debe haber exactamente una flecha saliendo de cada estado por cada símbolo $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$, por tanto, todos los estados tienen el mismo número de flechas saliendo de cada uno de ellos. Con esto garantizamos que nuestro Autómata pueda ser llamado Determinista. No importa el estado ni el símbolo leído, siempre hay una transición definida. Como se muestra en el diagrama de la figura 12.

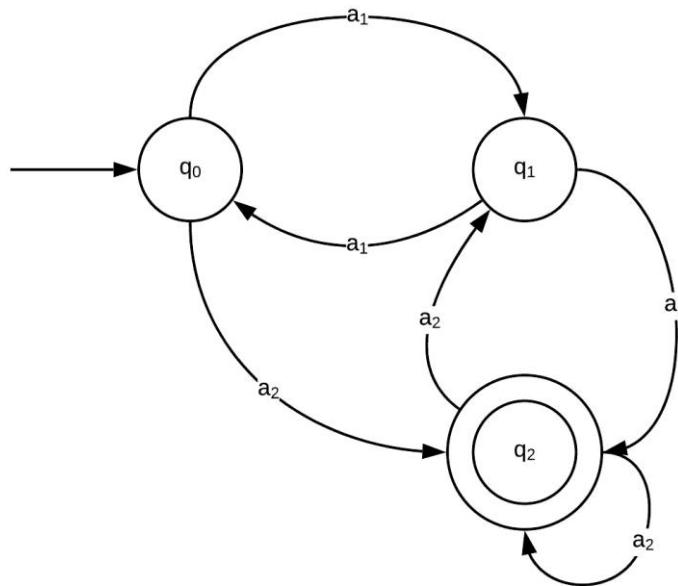


Fig.12. Diagrama de transición determinista.

Autómatas Finitos No Deterministas

A diferencia de los Autómatas Finitos Deterministas, donde existe una única forma de llegar de un estado a otro con una entrada y se tiene solo un estado inicial, los Autómatas Finitos No Deterministas no cuentan con estas virtudes, pero son una herramienta de mucha ayuda cuando queremos diseñar un Autómata Determinista. Para cada Autómata No Determinista existe un Autómata Determinista que lo representa y que acepta el mismo lenguaje. Como se muestra en el diagrama de la figura 13.

Podemos definir un Autómata Finito No Determinista como:

$$A = \{Q, I, F, \Sigma, \delta\}$$

donde:

Q: Conjunto finito de estados.

I: Conjunto de estados iniciales donde $I \in Q$.

F: Conjunto de estados finales $F \subseteq Q$.

Σ : Alfabeto finito de entrada.

δ : Función de Transición $Q \times \Sigma \rightarrow S$ donde $S \subseteq Q$.

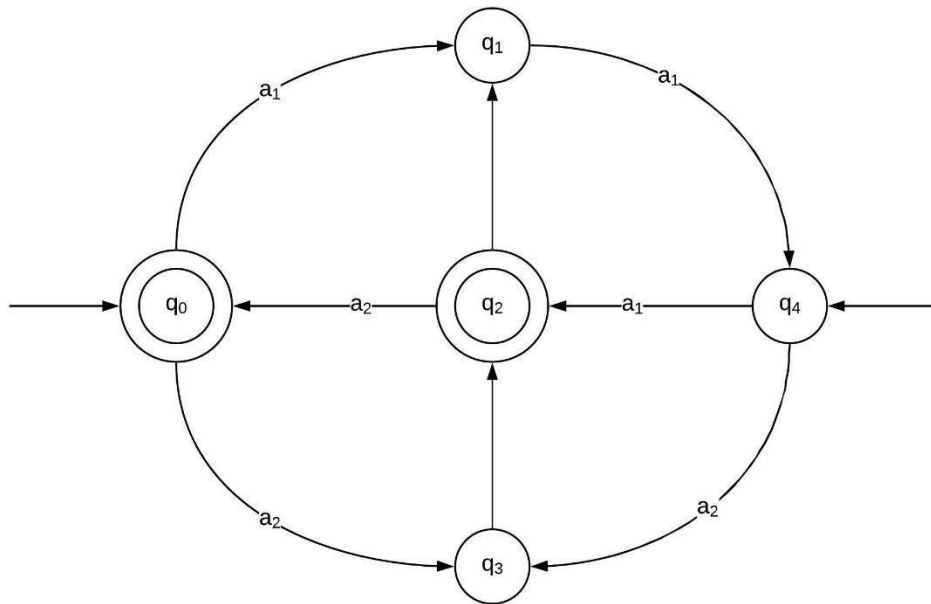


Fig.13. Diagrama de transición no determinista

2.7.2 Lenguaje interpretado Python

Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en la legibilidad de su código. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, dinámico y multiplataforma.

2.7.3 Intérprete

En ciencias de la computación, intérprete o interpretador es un programa informático capaz de analizar y ejecutar otros programas. Los intérpretes se diferencian de los compiladores o de los ensambladores en que mientras estos traducen un programa desde su descripción en un lenguaje de programación al código de máquina del sistema, los intérpretes sólo realizan la traducción a medida que sea necesaria, típicamente, instrucción por instrucción, y normalmente no guardan el resultado de dicha traducción.

2.8 Modelado 3D en SolidWorks

SolidWorks es un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.

El programa permite modelar piezas o conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, construyendo virtualmente la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

Capítulo 3. Diseño del tren inferior dinámico

3.1 Características ideales del tren inferior dinámico

El desarrollo de tren dinámico que se propone realizar requiere lograr una caminata sin frenar su marcha y mantener el equilibrio; dicho tren inferior dinámico es parte de un conjunto de trabajos que tienen como objetivo desarrollar un robot humanoide por lo que dentro de las características ideales de la caminata se pueden encontrar:

- Movimientos constantes.
- Estabilización.
- Velocidad constante.

3.2 Diseño Estructural

Los objetivos de este diseño son la elementalidad y funcionalidad, la estructura consta de seis DOF y está conformada de las piezas que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Piezas que conforman la estructura del tren inferior dinámico (TID)

Pieza	Cantidad
Pierna	2
Eslabones	6
Base(cadera)	1
Articulaciones rotacionales	6

Se plantea la construcción con diversos materiales tanto para las pruebas como para el resultado final, entre los que se pueden nombrar: cartón, madera, pvc sólido

y espumado, metal, dichos materiales irán cambiando conforme al desarrollo del tren inferior dinámico, de acuerdo a las necesidades y disponibilidad de los mismos. La altura total esperada y la distancia total entre pierna y pierna, dependen de los cambios que se susciten durante el desarrollo de la tesis titulada (Desarrollo de cabeza robótica interactiva para robot social), la cual se realiza simultáneamente con el presente trabajo, por lo que con base en las medidas de dicha cabeza se han realizado los cálculos necesarios para dimensionar el tren inferior dinámico, de manera que se puedan respetar las proporciones humanas.

En base a la historia del arte por parte de los griegos se menciona que el escultor Policleto estableció el canon de siete cabezas como modelo a un cuerpo perfectamente proporcionado, siguiendo esa base las piernas deben de medir el aproximado a cuatro cabezas para estar en proporción con respecto a la cabeza robótica y al resto del cuerpo, la imagen (El Doríforo) en la que se muestra el canon de Policleto se muestra en la figura 3.1.

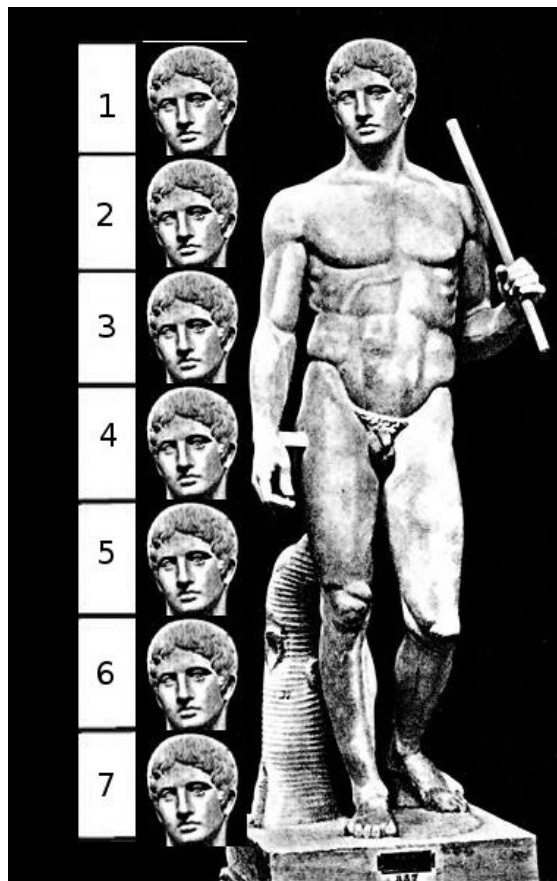


Fig.3.1. Canon de Policleto. El Doríforo (copia del Museo Arqueológico de Atenas).

La cabeza que se está desarrollando presenta aproximadamente una altura de 250 milímetros o 25 centímetros por lo que el tren inferior dinámico debe de presentar una altura aproximada de 100 centímetros.

Habiendo realizado los cálculos preliminares se procedió a realizar los modelados en 3D, tomando en cuenta que las piezas individuales una vez unidas deben aproximar una altura de 1 metro, dando como resultado las medidas que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Dimensiones unitarias de las piezas principales del TID.

Sección	No. piezas	Ancho	Largo	Alto
Arco Superior	4	6 cm	10 cm	35 cm
Arco Inferior	2	6 cm	10 cm	20 cm
Bases o Pies	2	6 cm	18.5 cm	20 cm
Caja	1	15 cm	20 cm	5 cm

La primera de las piezas modelada es el Arco Superior, cada miembro del TID cuenta con dos de estos arcos encontrados para ganar altura; los dos arcos se encuentran atornillados para asegurar la firmeza de la estructura dando como resultado una altura de 70 centímetros, en cada uno de los arcos se colocará un servomotor a manera de articulación. La pieza realizada se muestra en la figura 3.2.

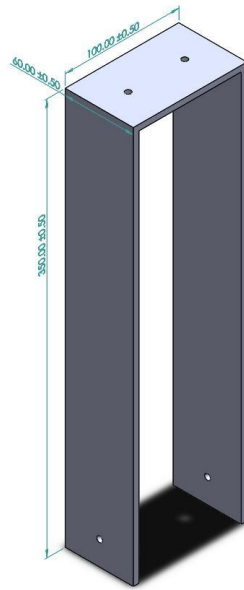


Fig.3.2. Modelado del Arco Superior del TID acotado en Solidworks.

En la parte baja del TID encontramos el Arco inferior, cada miembro del TID contará solo con uno de estos, actúan a manera de tobillo, en esta pieza se encontrará colocado un servomotor para garantizar la movilidad, como se muestra en la figura 3.3.

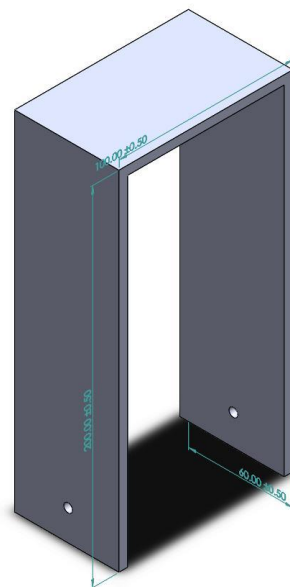


Fig.3.3. Modelado del Arco Inferior del TID acotado en Solidworks.

La siguiente pieza del TID son las bases o pies, servirán de apoyo para toda la estructura, tienen forma rectangular, mediante un servomotor se conectarán a los arcos inferiores como se muestra en la figura 3.4.



Fig.3.4. Modelado de los Pies o Bases del TID acotado en SolidWorks.

Por último, se modelo la pieza con forma de caja cuya función es almacenar, la fuente de alimentación, sensores y microcontrolador donde todos los sistemas se comunican, además sirve para unir a las piernas individuales del TID como lo hace la cadera humana. La pieza se muestra en la figura 3.5.

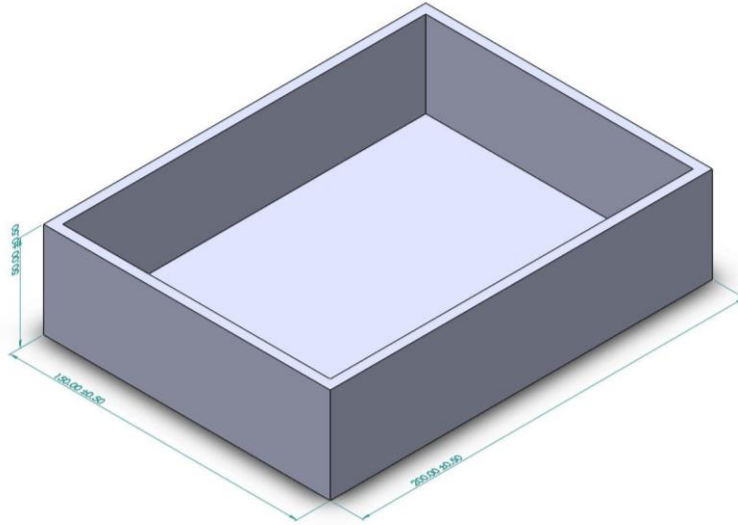


Fig.3.5. Modelado de la Caja del TID junto con sus medidas en SolidWorks.

El ensamble final de las piezas del TID se muestra en la figura 3.6.

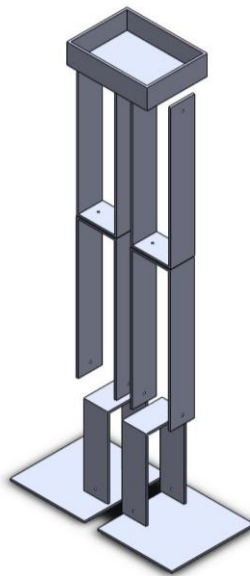


Fig.3.6. Ensamble final del Esqueleto del TID en 3D.

Se realizó la vista del ensamble para verificar la distribución de motores y componentes en la caja o cadera, lo cual se muestra en la figura 3.7.

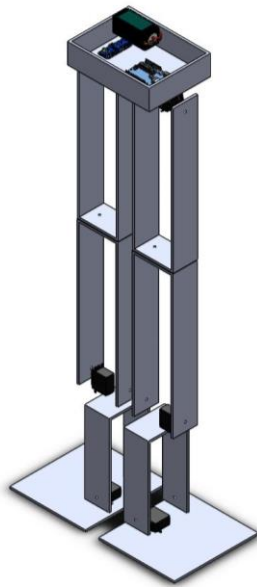


Fig.3.7. Esqueleto del TID 3D con el microcontrolador, servomotores y fuente de alimentación.

3.3 Diseño Electrónico

3.3.1 Servomotores

Se seleccionaron los servomotores Futaba S3003 debido a las características que se enlistan a continuación:

- Control por ancho de pulso PWM.
- Voltaje operacional: 4.8 a 6 Volts.
- Temperatura Operacional -20 a 60 grados Centígrados.
- Torque: 3.2 Kg*cm a 4.8 Volts, 4.1 Kg*cm a 6 Volts
- Corriente requerida: 7.2 mA a 4.8 Volts, 8.0 mA a 6 Volts
- Tres polos de ferrita

3.3.2 Sensores

El Giroscopio y Acelerómetro seleccionados son el MPU-6050 con las características que se enlistan a continuación:

Giroscopio

- Sensores de velocidad angular (giroscopios) de salida digital de los ejes X, Y y Z con un rango de escala completa programable por el usuario de ± 250 , ± 500 , ± 1000 y ± 2000 ° / seg.
- La señal de sincronización externa conectada al pin FSYNC admite la sincronización de imagen, video y GPS
- Los ADC integrados de 16 bits.
- El sesgo mejorado y la estabilidad de temperatura de sensibilidad reduce la necesidad de calibración del usuario
- Mejora del rendimiento de ruido de baja frecuencia.
- Filtro de paso bajo programable digitalmente
- Corriente de funcionamiento del giroscopio: 3.6mA
- Corriente en espera: 5 μ A
- Factor de escala de sensibilidad calibrado de fábrica.
- Autocomprobación del usuario

Acelerómetro

- Acelerómetro de triple eje con salida digital con un rango de escala completa programable de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$.
- Los ADC integrados de 16 bits permiten el muestreo simultáneo de acelerómetros mientras no se requieren multiplexores externos.
- Corriente de funcionamiento normal del acelerómetro: 500 μ A
- Corriente en modo acelerómetro de baja potencia: 10 μ A a 1.25Hz, 20 μ A a 5Hz, 60 μ A a 20Hz y 110 μ A a 40Hz
- Detección de orientación y señalización.
- Detección de tap
- Interrupciones programables por el usuario.
- Autocomprobación del usuario.

3.3.3 Controlador

Se refiere al sistema en el cual se guardará y ejecutará el programa diseñado a partir de una máquina de estados finitos, que tiene la finalidad de coordinar la activación de servomotores y sensores del tren inferior dinámico, los cuales permitirán la implementación del sistema de caminata propuesto.

El sistema empotrado funcionará como un sistema de control de lazo cerrado ya que cuenta con la retroalimentación de los sensores para corregir los posibles errores de posicionamiento con respecto al centro de gravedad del tren inferior dinámico.

3.3.4 Sistema de potencia

Batería tipo LiPo

Las baterías LiPo (abreviatura de Litio y polímero) recargables compuestas en ocasiones de múltiples celdas usadas en aplicaciones que requieren corrientes superiores a 1A con bajo peso y tamaño reducido.

Características generales:

- Vida útil: 2 a 3 años o unas 500 cargas completas
- Formas: son fabricadas en diversas formas y tamaños
- Eficiencia: mejor relación tamaño eficiencia que otras tecnologías
- Tasa de descarga: Alta tasa de descarga desde 1A hasta mas de 25A
- Voltaje de Celda: Cada celda tiene 3.7V, y se puede encontrar baterías de 1 a 6 celdas

Ya que cada celda nos puede proporcionar 3.7 Volts se buscará una con tres o cuatro celdas para cumplir con un aproximado de 12 Volts además se busca que cumpla con un amperaje de 1.5A. La batería utilizada se muestra en la figura 3.7.



Fig.3.7. Batería tipo LiPo de tres celdas marca TURNIGY

Driver PCA9685

El Módulo Controlador PCA9685 tiene la placa diseñada para el control de servos, además cuenta con una bornera para la alimentación de los servos y conectores para la alimentación de la parte lógica junto con los pines I2C para comunicarse con sistemas empotrados.

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de Operación: 5V
- Interfaz: I2C
- Bornera de conexión para voltaje de alimentación
- Diseño de conector I2C para utilizar varios módulos con el mismo BUS
- Frecuencia de PWM hasta de 1.6 KHz
- Salida de 12 bits de resolución.
- Salidas configurables como Push-Pull u Open-Drain
- Se pueden activar/desactivar todas las salidas rápidamente con el Pin Enable

3.3.5 Diagrama de lazo cerrado para caminata equilibrada

El sistema de lazo cerrado que se propuso consta del código de programación, donde se implementará la máquina de estados y las funcionalidades de cada estado para poder llevar a cabo la caminata equilibrada; dicho código se ejecutará sobre el sistema empotrado Raspberry PI 2 el cual envió las señales digitales hacia los servomotores y sensores alimentados por el sistema de potencia. Los sensores se encargaron de detectar inclinaciones y aceleraciones del tren inferior dinámico, con esta información se retroalimenta al sistema empotrado, cerrando así el sistema como se muestra en la figura 3.8.

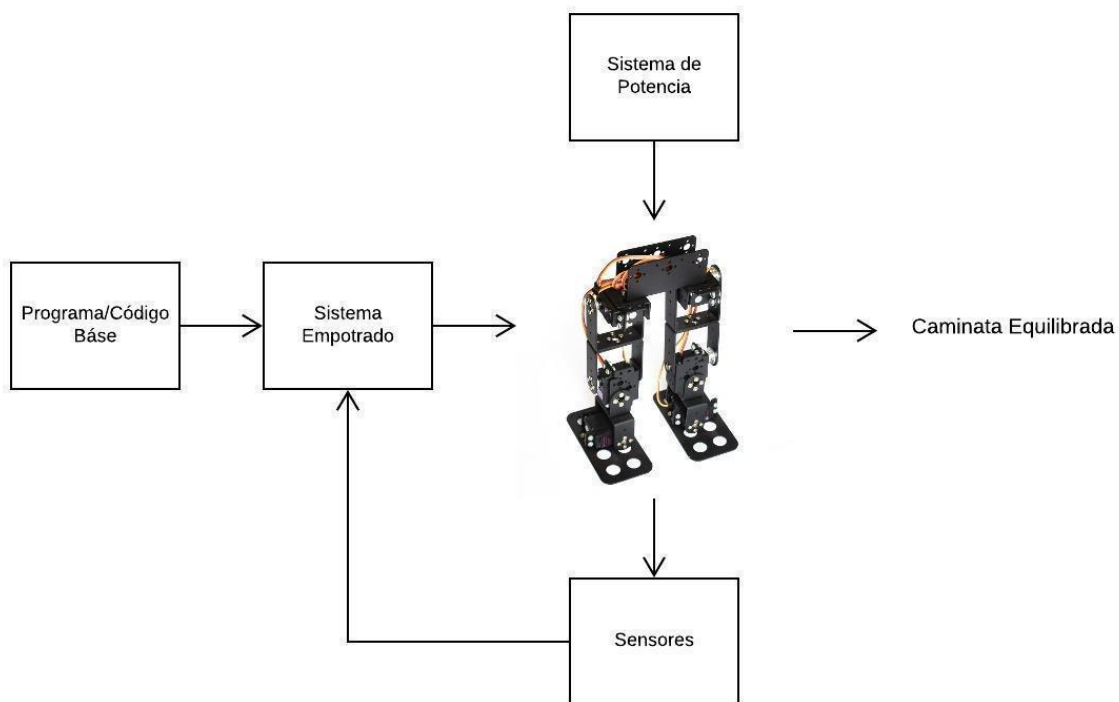


Fig.3.8. Diagrama a bloque de lazo cerrado para caminata equilibrada

3.4 Diseño Lógico

3.4.1 Diseño lógico general

En la Tabla 3.2 se presentan las acotaciones respectivas al diagrama de estados del funcionamiento del tren inferior dinámico.

Tabla 3.2. Tabla de estados del tren inferior dinámico.

Estado	Significado
S0	Reposo
S1	Mover un servomotor
S2	Sensor Giroscopio
S3	Sensor Acelerómetro

En el diagrama de estados que se presenta en la figura 3.9 se representa que en el estado inicial el tren inferior dinámico se encuentra en reposo, dicho estado cambia cuando un servomotor cualquiera recibe una señal de control y como resultado se logra el movimiento a una posición determinada. Después de haberse realizado el movimiento es necesario censar las posición y velocidad del tren inferior dinámico para saber si es necesario que se disminuya la velocidad o se detenga por completo el sistema y volver a comenzar. Por el contrario, si las mediciones son las adecuadas el sistema puede volver al estado de movimiento en el cual los servomotores realizarán otra orden de control.

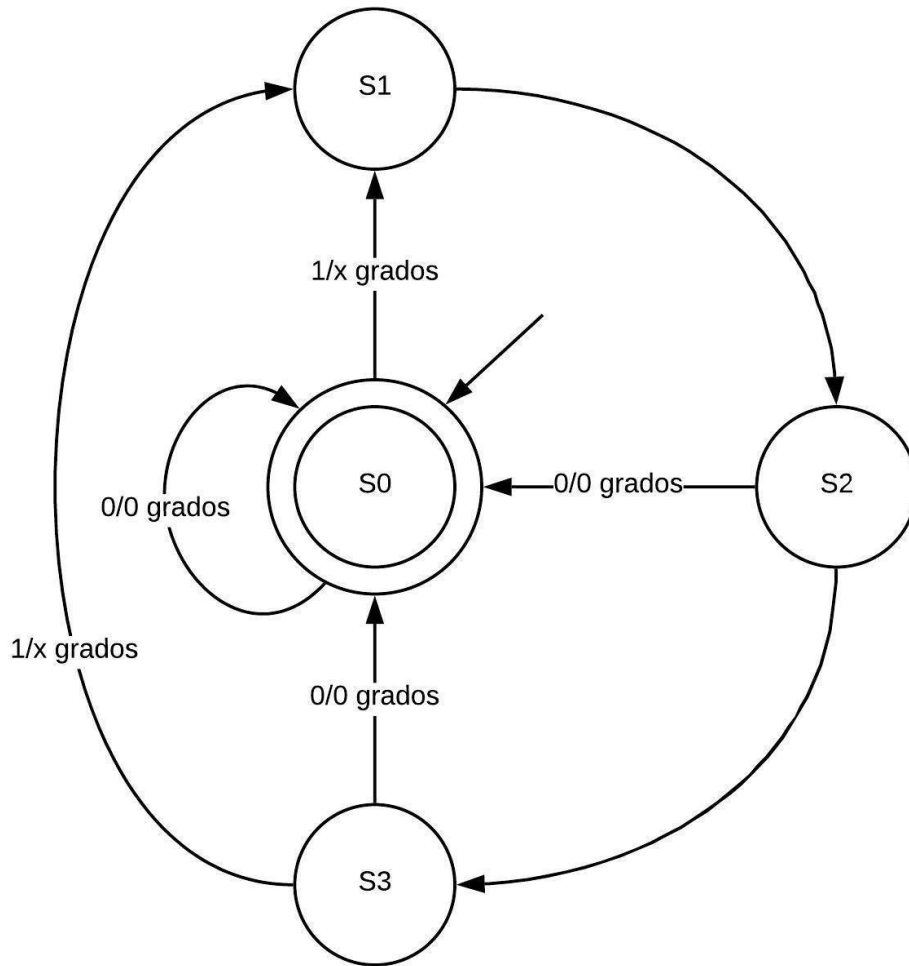


Fig.3.9. Diagrama de estados del funcionamiento del tren inferior dinámico

3.4.2 Diseño lógico del ciclo de marcha

Esquema basado en las ocho fases de la marcha humana

Para representar que un servomotor específico de una pierna se encuentra en movimiento se utilizaron tres bits, cada uno de los cuales representa una articulación de una pierna, los bits no siguen la secuencia binaria convencional puesto que de esta manera se pueden realizar todas las combinaciones necesarias de movimiento entre los servomotores como se detalla en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Conversión a servomotores en movimiento.

No. Servomotor	Articulación	Código
----------------	--------------	--------

1	Cadera	001
2	Rodilla	010
3	Tobillo	100

Dichos bits se pueden combinar y a su vez se puede extender la cadena en otras tres unidades para poder representar los movimientos tanto del miembro izquierdo como del miembro derecho.

La locomoción humana normal se ha descrito como una serie de movimientos alternantes, rítmicos, de las extremidades y del tronco que determinan un desplazamiento hacia delante del centro de gravedad. [30] Fishman.

Dicha serie de movimientos se divide en dos bloques, Balanceo y Apoyo como se muestra en la Fig 3.10. cada uno de estos a su vez se divide en una serie de pasos dando como resultado ocho intervalos, los cuales se muestran en la Tabla 3.4.

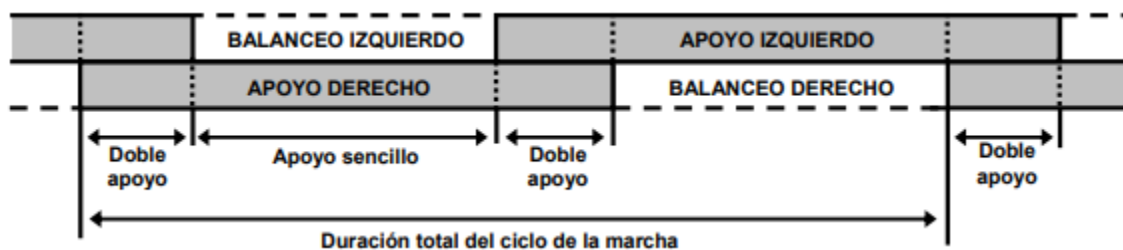


Fig 3.10. Representación de los dos componentes (balanceo y apoyo) principales de la marcha humana, recuperado de: [8]

Basándose en porcentajes, la fase de Apoyo debe durar un 60% del ciclo, la fase de Balanceo un 40% y los momentos en los que ocurre un Doble Apoyo deben durar un 20% de todo el ciclo de marcha, donde los estados Toque de Talón (TT) y Toque de Punta (TP) son utilizados como referencia, dicho ciclo de marcha en base al tiempo se muestra en la Figura 3.11

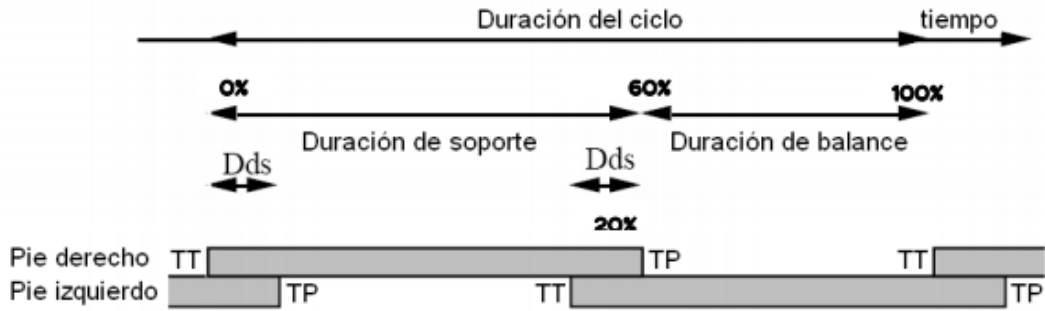


Fig 3.11 Línea de tiempo del ciclo de marcha, recuperado de: [9]

Tabla 3.4. Estados y descripción del ciclo de la marcha.

Estado	Descripción
Periodo de Apoyo	
Contacto con el talón	Instante en que el talón toca el suelo
Apoyo Plantar	Contacto de la parte anterior del pie con el suelo
Apoyo Medio	Momento en que el trocánter mayor se encuentra alineado con el centro del pie verticalmente
Elevación del talón	Instante en que el talón se eleva del suelo

Despegue del pie	Momento en el que los dedos se elevan del suelo
Periodo de Balanceo	
Aceleración	Aceleración del extremo de la pierna justo después de que los dedos se despegan del suelo
Balanceo Medio	La pierna en movimiento rebasa a la pierna en apoyo como un péndulo
Desaceleración	La pierna desacelera al acercarse al final del intervalo

Cada estado corresponde a cada una de las ocho fases de la caminata, junto con la combinación necesaria de los movimientos de los servomotores. Dado que el TID está compuesto por dos piernas quiere decir que su ciclo de marcha se puede representar con dos máquinas de estados, que, aunque contienen los mismos estados no necesariamente tienen por qué iniciar en el mismo estado, en el diseño que se presenta en este trabajo, se añadió un estado extra (reposo) donde las piernas están estáticas y se puede ver como si las piernas simplemente estuvieran detenidas.

Tabla 3.5 Estados de ambas piernas durante el ciclo de marcha.

Pierna Derecha	Pierna Izquierda	Casos donde existe un doble apoyo
S1	S4	X
S2	S5	
S3	S6	

S4	S7	
S5	S8	X
S6	S1	X
S7	S2	
S8	S3	

En el diagrama de estados de la figura 3.12 se muestra el ciclo normal de la caminata de manera circular, ya que se seguirá repitiendo en ambas piernas para que el TID realice una x cantidad de pasos o caminata. El ciclo se detiene si se cumple la excepción, donde los movimientos de las articulaciones (equivalentes a servomotores) no coinciden con los requeridos para cambiar al siguiente estado.

A pesar de que en un momento inicial el TID se encuentre en el estado de reposo (S0) no se marcó este como estado inicial, puesto que se considera como inicial el momento del inicio de los movimientos de las articulaciones, es decir el estado S1 o contacto con el talón.

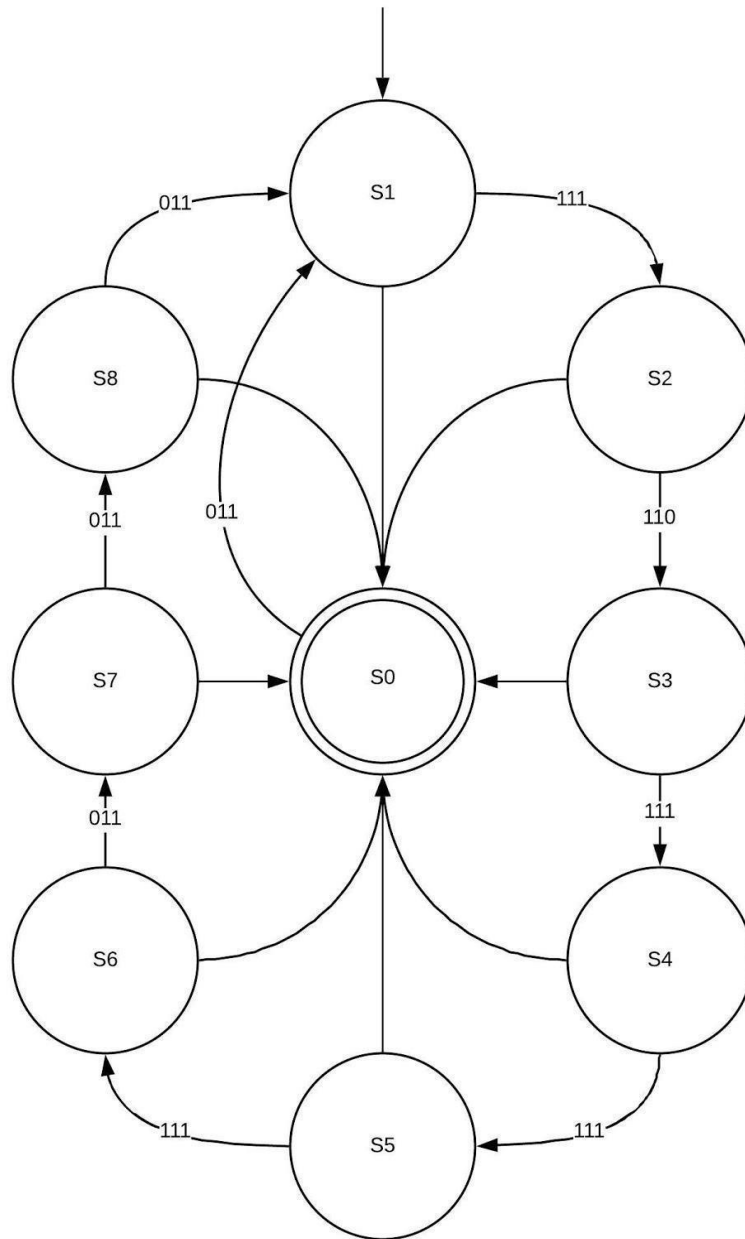


Fig 3.12. Diagrama de estados del movimiento de un miembro o pierna del TID.

Para finalizar el diseño lógico se presenta la Máquina de Estados (ME) de la figura 3.13 es la referente a la pierna que se analice en un momento determinado, es decir si se analiza la pierna derecha, la máquina de estados corresponde a dicha pierna; mientras que la ME de la pierna izquierda es exactamente la misma, salvo que el estado inicial que se marcaría sería el S4 o Elevación del talón como se marcó en

la Tabla 3.5. de manera que un ciclo de caminata del TID se puede representar como se muestra en la Fig. 3.13.

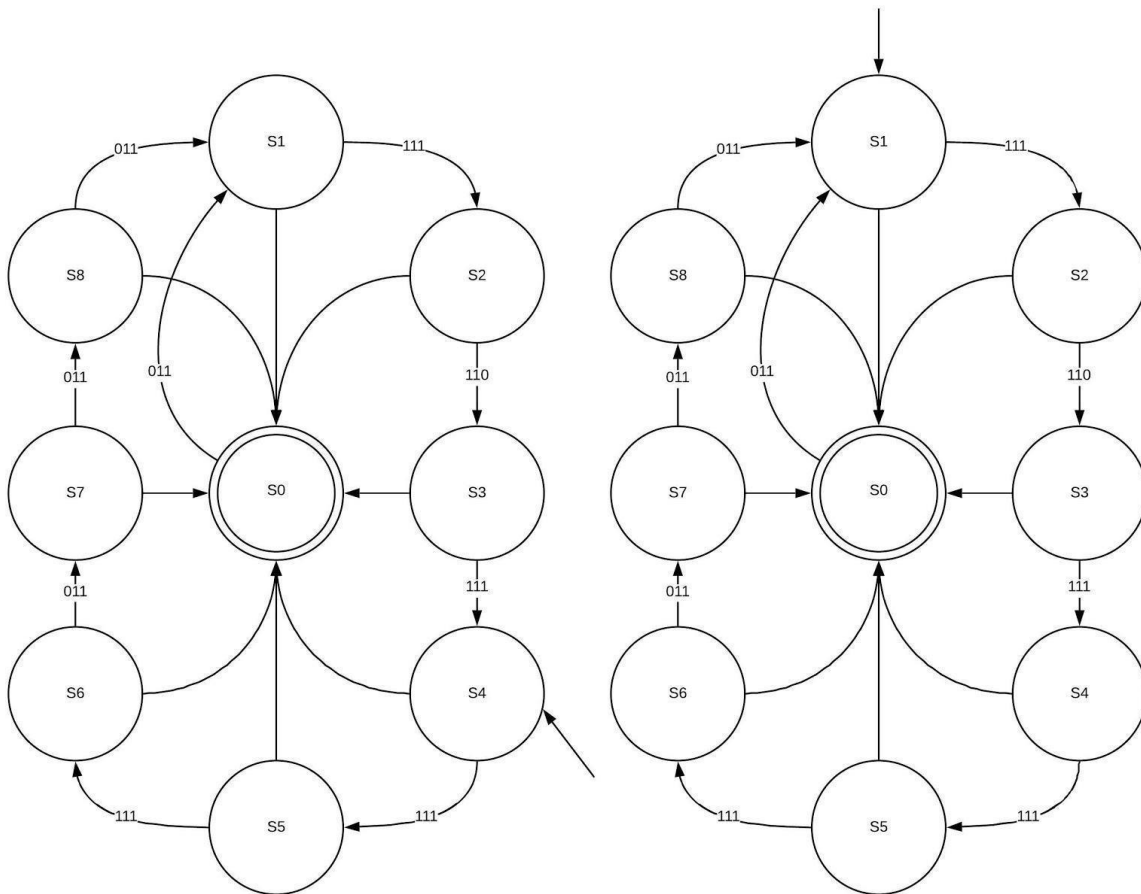


Fig 3.13. Máquinas de Estados de cada una de las piernas (izquierda-derecha) del TID.

Capítulo 4. Implementación Tren Inferior Dinámico (TID) del Humanoide

4.1 Ensamblaje

Como primera parte para el ensamblaje del esqueleto de prueba, se buscó realizar de un material que nos permitiera ajustar y reemplazar las piezas de manera rápida y que no tuviera un impacto en el costo del desarrollo, de esta manera se decidió utilizar cartón tanto de una como de dos capas, así como pegamento blanco, periódico y pintura. El esqueleto ensamblado se compone de cuatro secciones principales que se listan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Dimensiones unitarias de las piezas principales del TID.

Sección	No. piezas	Ancho	Largo	Alto
Arco Superior	4	6 cm	10 cm	35 cm
Arco Inferior	2	6 cm	10 cm	20 cm
Bases o Pies	2	6 cm	18.5 cm	20 cm
Caja	1	15 cm	20 cm	5 cm

4.1.1. Evidencias Fotográficas

La base o pie del TID se encuentra en la parte inferior del esqueleto y es la que tiene contacto directo con el suelo durante el proceso de caminata, cuenta con unas medidas base de 18.5 cm y altura de 20.5 cm como se muestran en la Figura 4.1.

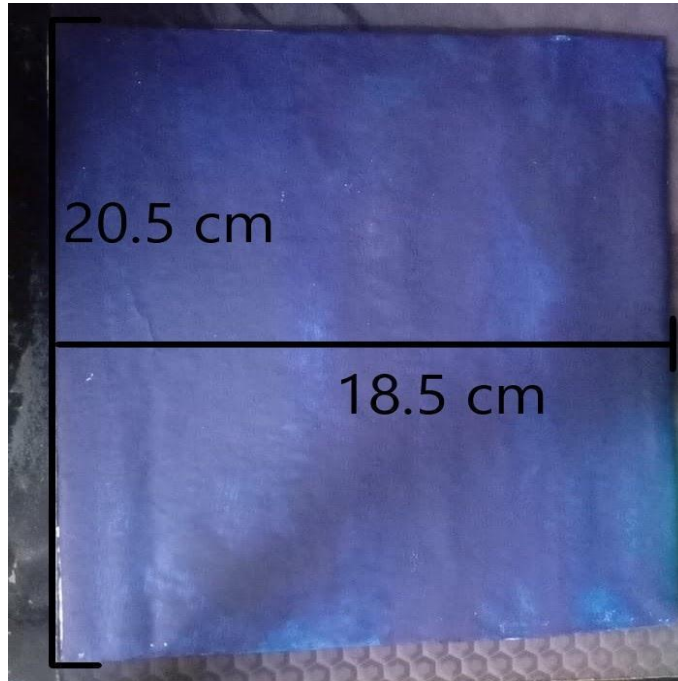


Fig.4.1. Base o pie del tren inferior dinámico.

Los arcos superiores del TID son las piezas más grandes del esqueleto, corresponden al fémur de un ser humano, se requieren dos arcos colocados de manera encontrada uno con otro para obtener la altura deseada y una mayor estabilidad del TID, las piezas tienen un ancho de 6 cm, un largo de 10 cm y un alto de 35 cm, como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3.

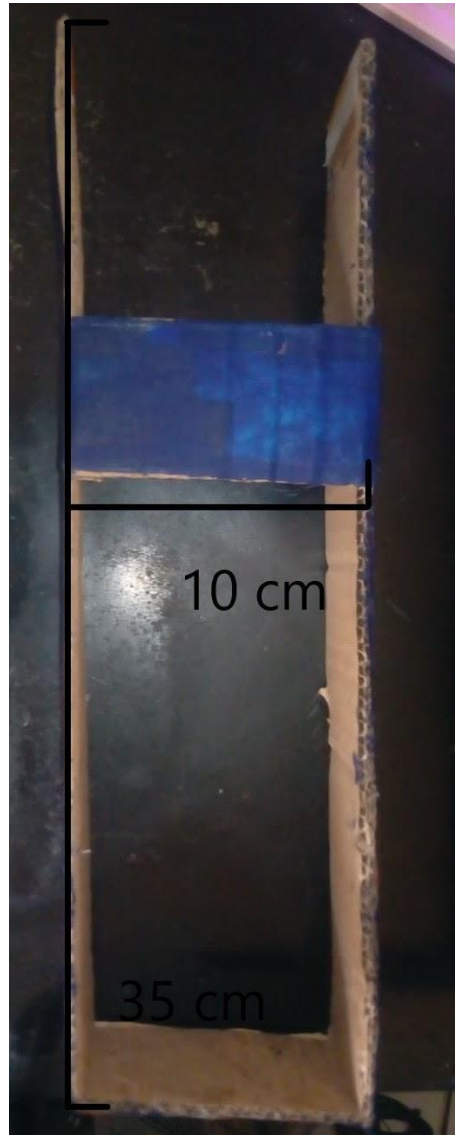


Fig.4.2. Vista frontal del arco del TID.

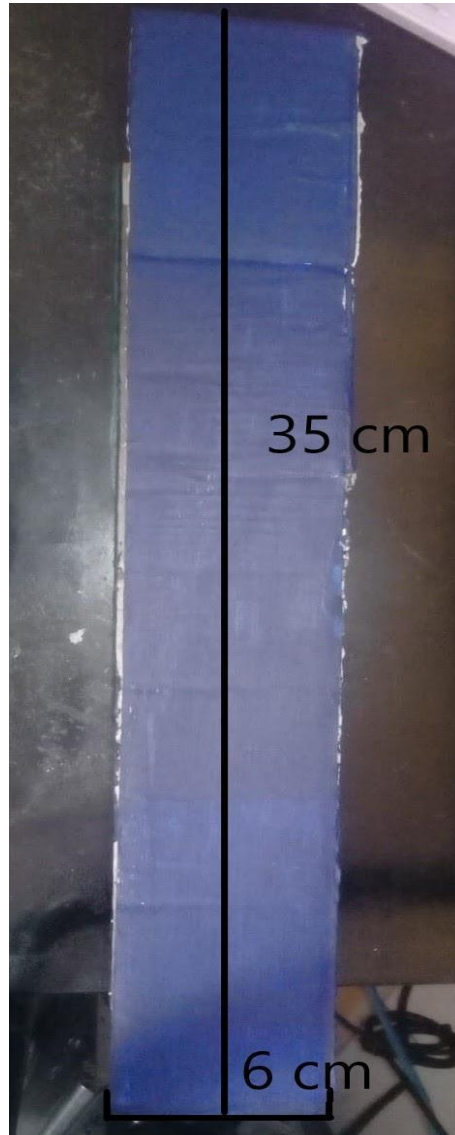


Fig.4.3. Vista lateral del ITD.

Los arcos inferiores del TID asumen el papel de los tobillos de un ser humano y se encuentran entre las bases del TID y los arcos superiores. En estas piezas se han colocado cuatro servomotores, los cuales brindan gran parte de la movilidad ya que conectan los arcos superiores con las bases; tienen unas medidas de 6 cm de ancho, 10 cm de largo y 20 cm de alto como se muestra en las figuras 4.4 y 4.5.

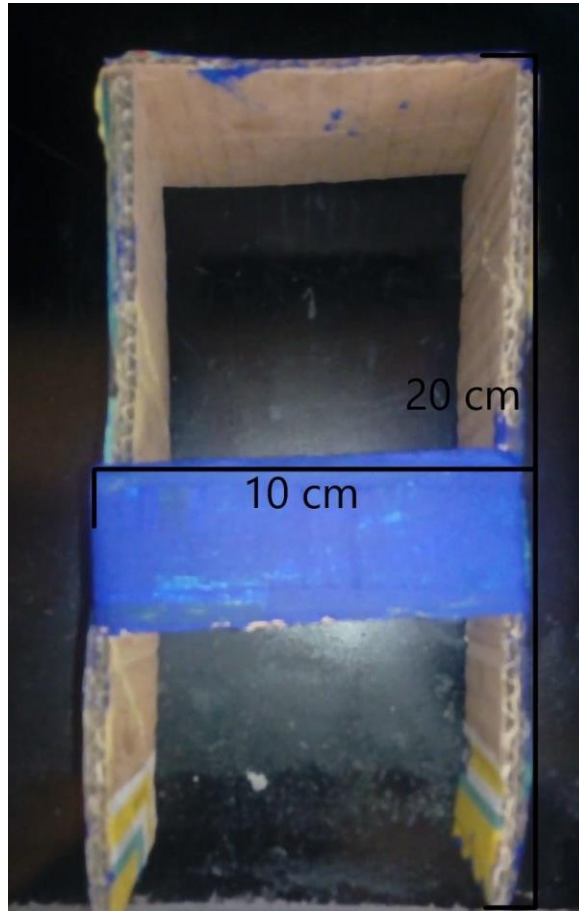


Fig.4.4. Parte frontal del tobillo del TID.

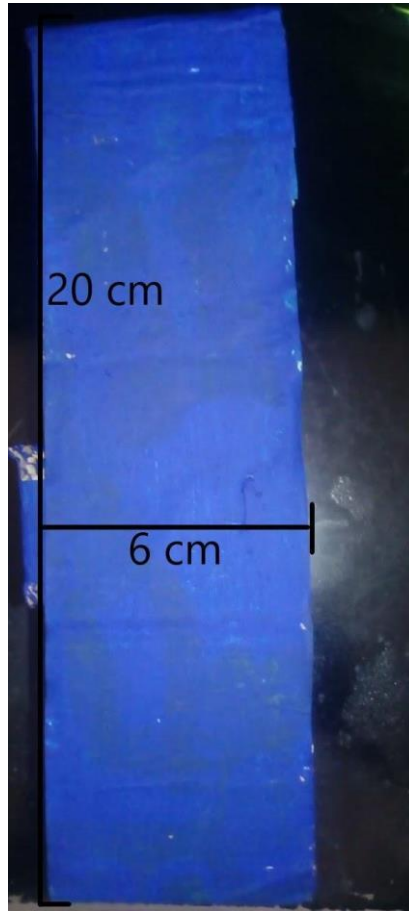


Fig.4.5. Vista lateral del tobillo del TID.

Capítulo 5. Resultados, conclusiones y trabajo futuro

5.1. Resultados

En la primera etapa de la investigación se encontró información valiosa respecto a los robots bípedos y sus antecedentes, se esclarecieron algunos términos como grados de libertad, caminata dinámica y estática.

Se decidió implementar el modelo de Tren Inferior Dinámico (TID), debido a las características de control de movimientos, basados en identificación de información de su entorno.

Además, se encontró información respecto a los diferentes tipos de articulaciones, lo cual permitió seleccionar la articulación rotacional como ideal para el desarrollo del TID.

Conforme se avanzó en la investigación se lograron puntualizar ideas y continuar con el diseño del TID, para lo cual se requirió información detallada sobre el ciclo de marcha de un ser humano, dicha información fue fundamental en el planteamiento y diseño de una máquina de estados para el control del ciclo de marcha del TID.

El diseño lógico del TID consta de dos máquinas de estados, la primera se le denominó “máquina general” que cumple con la función de representar el sistema de sensores, su interacción con el microcontrolador y la respuesta de los actuadores pertenecientes a las articulaciones del TID.

La segunda máquina de estados “máquina de marcha” se diseñó para manipular los movimientos de las piernas del robot, en base a las fases de la marcha humana. Dicha máquina permite programar los movimientos de cada articulación de manera individual, en función de las demás articulaciones que conforman el TID y generar la secuencia de caminata ideal que emule los pasos de la marcha humana.

El diseño estructural del TID se basó en cumplir con proporciones similares a las humanas, con la finalidad de formar un humanoide completo, en colaboración de diferentes trabajos de tesis enfocados en desarrollar las diferentes partes del humanoide. Se buscó que las medidas fuesen proporcionales entre sí, tomando como referencia principal las dimensiones de la cabeza. Como resultado de este requisito se estableció la altura del TID en un metro (equivalente a cuatro cabezas).

Con estas medidas se comenzó a diseñar el esqueleto del robot mediante el uso de software CAD, se fragmentó el TID en diferentes piezas individuales las cuales al unir las forman cada una de las piernas del mismo, y estas a su vez al volverlas a unir formarán el TID completo, además haciendo uso de este software se le añadieron los diferentes servomotores, micro controlador y fuente de alimentación para poder visualizar un ideal del producto final.

Se construyó el “esqueleto prototipo” en base al diseño 3D realizado, para lo que se utilizaron piezas de cartón (unidas con periódico) cubiertas con pintura, el objetivo fue corroborar el funcionamiento del diseño 3D, corregir errores y visualizar el tamaño real.

5.2. Conclusión

Se puede construir un Tren Inferior Dinámico aplicando los conocimientos de las ciencias de la computación, desarrollando una investigación formal, la cual permitió la obtención de información de otras áreas de estudio como la biología y medicina que a su vez permitieron el afinamiento del diseño e implementación del TID.

La aportación de este trabajo consiste en el desarrollo, diseño e implementación de un Tren Inferior Dinámico que puede realizar un ciclo de marcha con base en las fases de la caminata humana, este ciclo es modificable con respecto a información que recibe de su entorno, por medio de sensores, lo que lo convierte en dinámico.

De la fase de investigación se concluye que no solo se necesitan conocimientos de las ciencias de la computación o de la robótica para poder llevar a cabo un proyecto más desarrollado y con fundamentos basados en la especie humana, se requieren conocimientos, de la biología, la medicina, historia del arte, etc.

De la fase de diseño se concluye que no necesariamente se requiere de un diseño complejo para poder cumplir el objetivo principal, sin embargo, si se requieren de dos etapas, diseño teórico, el cual comprende el diseño de las máquinas de estados y posterior modelado con software CAD del esqueleto del TID y diseño práctico él comprende la corrección de errores y mejoras que se puedan aplicar a los diseños ya planteados.

La etapa de construcción fue una de las más difíciles puesto que dada la situación que se vivió, limitó el desarrollo del prototipo factible y resistente, por lo que no se pudo corroborar el funcionamiento real en el esqueleto final del TID.

5.3. Trabajo futuro

Como trabajo a futuro se plantea el diseño y desarrollo de un nuevo esqueleto para el Tren Inferior Dinámico, realizado con diferentes materiales más resistentes y que

a su vez nos permitan realizar diferentes y más tipos de pruebas de campo para poder fortalecer y terminar de validar toda la teoría que se encuentra detrás del desarrollo del TID.

Actualmente se están desarrollando las partes que complementan el cuerpo de un robot humanoide, el cual se plantea que en un futuro próximo pueda ensamblarse, probarse y aplicarse como un robot social.

Referencias

- [1]. ERRUSTRONIX. (2016, julio 18). Definiciones de Robots y tipos de robots. 2020, enero 19, de ERRUSTRONIX Sitio web: <http://ferrustronix.com/blog/2016/07/18/definiciones-de-robots/>
- [2]. Thang Z. (2007, octubre). Reference Trajectory Generation for 3-Dimensional Walking of a Humanoid Robot. TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY, 12, pp.577-584.
- [3]. Tzoo-Hseng S. Li. (2017, marzo 15). Natural Walking Reference Generation Based on Double-Link LIPM Gait Planning Algorithm. IEEE Access, N/A, pp.1-11. 2020, enero 14, De IEEE Access Base de datos.
- [4]. Galloway K. (2015, abril 27). Torque Saturation in Bipedal Robotic Walking Through Control Lyapunov Function-Based Quadratic Programs. IEEE Access, N/A, pp.1-10. 2020, enero 14, De IEEE Access Base de datos.
- [5]. Navarro F. (2012). Resumen ejecutivo. En Generación de Trayectorias para el tren inferior del robot humanoide TEO(5). Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- [6]. Bravo, Leonardo E. (2006). Generación de modelos de caminata bípeda a través de diversas técnicas de modelamiento. Ingeniería, 11, pp.4-9.
- [7] Mark R. Miller; Rex Miller. Robots and Robotics: Principles, Systems, and Industrial Applications. Definition, Chapter (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2017). <https://www.proxydgb.buap.mx:2679/content/book/9781259859786/toc-chapter/chapter1/section/section3>
- [8] Neil Sclater. Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook, Fifth Edition. STATIONARY AND MOBILE ROBOTS, Chapter (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, 2011). <https://www.proxydgb.buap.mx:2679/content/book/9780071704427/chapter/chapter3>

- [9] Pérez Porto, J., Merino, M.. Publicado: 2010. Actualizado: 2013. Definición de robot, Definicion.de. Recuperado de: <http://definicion.de/robot/>
- [10] Vidal, Antonio & Castro-González, Álvaro & Alonso Martín, Fernando & Castillo, José & Salichs, Miguel. (2017). Evolución de la robótica social y nuevas tendencias.
- [11] Núñez, Pedro & Bustos, Pablo & Jaramillo, E & Bachiller, Pilar & García-Varea, Ismael. (2011). Robots Sociales para la Mejora de la Calidad de Vida de las Personas Dependientes.
- [12],[14] Revista de Robots. (N/A). QUÉ ES UN ROBOT Y EJEMPLOS DE TIPOS DE ROBOTS. 29 de abril de 2020, de Revista de Robots Sitio web: https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/que-es-un-robot-y-tipos-de-robots/#Robotica_de_servicios
- [13],[20] Reyes Cortés, Fernando. Robótica: control de robots manipuladores. : Alfaomega Grupo Editor, . p 43
- [15],[17] Gordon McComb. (2011). ROBOT BUILDER'S BONANZA. New York Chicago : McGraw-Hill, p 50.
- [16] <https://humanoide.click>. (2019). ROBOT HUMANOIDE, QUÉ ES Y EJEMPLOS. 28 de abril de 2020, de Humanoide.click Sitio web: <https://humanoide.click>
- [18] Henry Gray, F.R.S.. (1918). Anatomy of the Human Body. Philadelphia: LEA & FEBIGER. p 1336
- [19] Miranda Colorado, Roger. Cinemática y dinámica de robots manipuladores Primera Edición Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.,México. p 5.
- [21], [22], [23], [24] Marco Antonio Pérez Cisneros, Erik Valdemar Cuevas Jiménez, Daniel Zaldívar Navarro. (2014). FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA Y MECATRÓNICA CON MATLAB® Y SIMULINK. Madrid, España: RA-MA. p. 119-120
- [25],[26] Reyes Cortés, Fernando. Robótica: control de robots manipuladores. : Alfaomega Grupo Editor, . p 82
- [27] Neil Sclater. Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook, Fifth Edition. STATIONARY AND MOBILE ROBOTS, Chapter (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, 2011).

<https://www.proxydgb.buap.mx:2679/content/book/9780071704427/chapter/chapter3>

[28] Pardos Gotor J. M. (2005) Algoritmos de Geometría Diferencial para la Locomoción y Navegación Bípedas de Robots Humanoides Aplicación al robot RH0 (tesis de doctorado). Universidad Carlos III de Madrid, España.

[29] Jorge Alejandro Gutiérrez Orozco. (15 de septiembre de 2008). Máquinas de Estados Finitos Breve Introducción. Departamento de Computación del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional , N/A, 16. 19 de mayo de 2020, De Departamento de Computación del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Base de datos.

[30] Fishman DS. (1967). Aspectos psicológicos de la amputación. 8 de agosto de 2020, de Columbia: Columbia University Press Sitio web: <http://www.oandplibrary.org/reference/ortetica/LLO-02.pdf>

Referencias Imágenes

[1] Henry Gray. (1918). Back of left lower extremity. [Figura] Recuperado de: Anatomy of the Human Body. Philadelphia: LEA & FEBIGER. p 1338

- [2],[3],[4],[5] Marco Antonio Pérez Cisneros, Erik Valdemar Cuevas Jiménez, Daniel Zaldívar Navarro. (2014). Cuatro articulaciones muy comunes en sistemas mecatrónicos. [Figura] Recuperado de: FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA Y MECATRÓNICA CON MATLAB® Y SIMULINK. Madrid, España: RA-MA. p. 119
- [6],[7] Raspberry Pi Foundation. (2014). Raspberry Pi 2 Model B. [Foto] Recuperado de: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [8] Francisco Hernández Stengele, (2008). Representación de los principales componentes de la marcha. [Figura] Recuperado de: Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana, Puebla, México: p.38
- [9] Francisco Hernández Stengele, (2008). Estructura Temporal del Ciclo de la Marcha Humana. [Figura] Recuperado de: Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana, Puebla, México: p.39