



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ROBOT CUADRÚPEDO DE 12 GDL ENFOCADO A  
TAREAS DE SERVICIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

MECÁNICA - MECATRÓNICA

P R E S E N T A :

ANABEL AVILÉS LEDESMA



TUTOR

DR. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA

2011

## **JURADO ASIGNADO**

|                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| <b>Presidente:</b>  | Dr. Marcelo López Parra            |
| <b>Secretario:</b>  | Dr. Francisco Cuenca Jiménez       |
| <b>Vocal:</b>       | Dr. Víctor Javier González Villela |
| <b>1° Suplente:</b> | M.I. Octavio Díaz Hernández        |
| <b>2° Suplente:</b> | M.I. Ulises Martín Peñuelas Rivas  |

Lugar donde se realizó la tesis:

**Facultad de Ingeniería, UNAM.**

### **TUTOR DE TESIS**

**DR. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA**

*México D.F., 2011*

## *Agradecimientos*

---

A dios, por la salud y las bendiciones que me ha dado.

A mi familia, porque tenerlos como padres es toda una bendición, y a ustedes, Joselito y Bety, tenerlos como hermanos es el mejor regalo que me ha dado la vida. Porque siempre me dan su apoyo y me impulsan a crecer. Por fomentar en mí, la lucha por los sueños y ayudarme a hacerlos realidad. Por todos los esfuerzos realizados y las adversidades vencidas para ayudarme a ser lo que soy. Mi triunfo también lo es suyo. A ustedes, todo mi amor, gratitud y respeto.

A Jorge Luis y Crystal, mis excelentes amigos, por haber vivido a mi lado los dos mejores años de mi vida y haberlos llenado de momentos inolvidables de alegría y felicidad con su especial compañía. Por su incondicional apoyo y la gran confianza, pero sobre todo por haber contribuido de manera importante a mi formación personal y guía académica. Amigos, Gracias por crecer conmigo!, a ustedes mi cariño e infinita gratitud.

A mi tutor, Víctor Javier González Villela, quien no solo supo ser mi guía en este andar por la Universidad, sino también un buen y sincero amigo. Gracias por su apoyo y consejo.

A mis profesores por brindarme sus conocimientos y hacer mía su experiencia. Especialmente a Francisco Cuenca y Oscar Rendón, mi gratitud y respeto.

A mis compañeros de trabajo, de quienes siempre hubo algo que aprender y momentos buenos que compartir.

A la UNAM, mi Alma Máter, por permitirme una vez más formarme en sus aulas y con esta oportunidad haberme dado los mejores años de mi vida.

Al CONACYT, a quien agradezco el financiamiento para hacer posibles mis estudios de maestría en esta Universidad.

Al apoyo brindado por la DGAPA, UNAM, a través del proyecto PAPIIT INI08308, con título "Investigación y desarrollo en robótica móvil, robótica paralela y sistemas mecatrónicos".

*Por mi raza hablará el espíritu. Orgullosamente UNAM!*



Las investigaciones enfocadas en el desarrollo de la robótica están enormemente motivadas ante la expectativa de tener robots que puedan trabajar con nosotros y por nosotros en los ambientes en donde nos desenvolvemos día con día, asistiéndonos en el trabajo y el hogar en la ejecución de diferentes tareas, de modo que los humanos, podamos tener un mayor tiempo de esparcimiento y una mejor calidad de vida.

La actual oferta comercial de robots de servicio ofrece robots programados para tareas particulares a precios de venta muy elevados, permitiendo que solo empresas y el sector privilegiado de la población adquiera uno de estos equipos. Las plataformas robóticas multipropósito acercan la tecnología a las masas, por la disminución de monto de inversión que esto implica, pues permite con una sola inversión aumentar la productividad y la eficiencia en varias tareas. Dicho lo anterior, se expone la necesidad de satisfacer varias necesidades con una misma solución por lo que buscando la innovación principalmente en la robótica de servicios, este trabajo presenta el desarrollo completo de un robot caminante cuadrúpedo de 12 GDL cuyas principales características son la capacidad de adaptabilidad y la versatilidad, pues dicho robot fue diseñado con el propósito de ser utilizado como una plataforma multipropósito a la que puedan ser adaptadas diferentes herramientas y poder así desempeñar diferentes tareas.

El conjunto de los capítulos que aborda este trabajo parte desde la investigación del estado del arte, el diseño mecánico, análisis cinemático, diseño de trayectorias, la descripción del sistema de control y una sección de pruebas y resultados que validan la funcionalidad del prototipo construido y la eficacia de los algoritmos matemáticos utilizados.

**Resumen**

**Introducción** **1**

**Objetivos** **9**

**1. Plataforma multipropósito** **10**

1.1. Planteamiento del problema . . . . . 10

1.2. Requerimientos del sistema . . . . . 12

1.3. Solución propuesta . . . . . 12

**2. Diseño Mecánico** **14**

2.1. Generación de conceptos . . . . . 15

2.1.1. Concepto ZZ-Z . . . . . 15

2.1.2. Concepto ZXX -1 . . . . . 16

2.1.3. Concepto ZXX -2 . . . . . 16

2.2. Selección de conceptos . . . . . 17

2.2.1. Matriz de decisión . . . . . 17

2.2.1.1. Descripción del proceso de evaluación . . . . . 17

2.2.1.2. Justificación de calificación de los criterios de selección . . . . . 18

2.3. Diseño de componentes y construcción física . . . . . 20

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.1.    | Mejora al diseño de componentes . . . . .   | 20        |
| 2.3.1.1.  | Torso . . . . .   | 20        |
| 2.3.1.2.  | Extremidades . . . . .  | 21        |
| 2.3.2.    | Construcción . . . . .  | 24        |
| 2.4.      | Actuadores del Sistema . . . . .  | 26        |
| <b>3.</b> | <b>Análisis cinemático</b>  | <b>29</b> |
| 3.1.      | Marcos de referencia sobre el robot . . . . .   | 30        |
| 3.2.      | Matriz Cinemática . . . . .   | 31        |
| 3.2.1.    | Posición . . . . .  | 31        |
| 3.2.1.1.  | Vectores de posición . . . . .  | 34        |
| 3.2.2.    | Orientación . . . . .   | 34        |
| 3.2.3.    | Matriz Cinemática . . . . .   | 35        |
| <b>4.</b> | <b>Diseño de Trayectorias</b>   | <b>37</b> |
| 4.1.      | Diseño de trayectorias del robot . . . . .  | 37        |
| 4.1.1.    | Base canónica de la curva . . . . .   | 39        |
| 4.2.      | Ecuaciones de la trayectoria para movimiento de miembros . . . . .                      | 40        |
| <b>5.</b> | <b>Sistema de Control</b>   | <b>44</b> |
| 5.1.      | Hardware de control . . . . .   | 44        |
| 5.2.      | Algoritmo de cinemática inversa . . . . .   | 46        |
| 5.3.      | Conversión de valores de los GDL a los rangos de movimiento de los actuadores . . . . . | 47        |
| 5.4.      | Descripción de la secuencia de tareas para el seguimiento de trayectorias . . . . .     | 49        |
| 5.5.      | Prueba . . . . .  | 52        |
| 5.6.      | Resultados . . . . .  | 53        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>  | <b>57</b> |
| 6.1.      | Conclusiones . . . . .  | 57        |
| 6.2.      | Trabajo Futuro . . . . .  | 58        |
|           | <b>Bibliografía</b>   | <b>59</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Componentes de un sistema robótico . . . . .                            | 1  |
| 2.   | Manipulador. KUKA robot. [8] . . . . .                                  | 2  |
| 3.   | Caminante. Wabian. Waseda University, Japan. [20] . . . . .             | 3  |
| 4.   | Móvil. Spirit Rover. [13] . . . . .                                     | 3  |
| 5.   | Ventajas de los robots caminantes vs. robots móviles. [3] . . . . .     | 4  |
| 6.   | Robots de servicio para uso personal y doméstico . . . . .              | 7  |
| 7.   | Ventas de robots para uso profesional. [5] . . . . .                    | 7  |
| 8.   | Ventas de robots para uso personal y doméstico. [5] . . . . .           | 8  |
| 1.1. | Robots de servicio . . . . .  | 11 |
| 1.2. | Robot cuadrúpedo caminante . . . . .                                    | 12 |
| 1.3. | Extremidad . . . . .  | 13 |
| 2.1. | Concepto ZZ-Z . . . . .   | 15 |
| 2.2. | Concepto ZXX -1 . . . . .   | 16 |
| 2.3. | Concepto ZXX -2 . . . . .   | 17 |
| 2.4. | Espacio de trabajo. Concepto ZXX-2 . . . . .                            | 19 |
| 2.5. | Torsos . . . . .  | 21 |
| 2.6. | Torso mejorado . . . . .  | 21 |
| 2.7. | Diseño de los componentes de la sección hombro-codo del brazo . . . . . | 22 |
| 2.8. | Unión codo-extremo actuante . . . . .                                   | 23 |

|  |    |
|--|----|
| 2.9. Extremo actuante . . . . .                            | 23 |
| 2.10. Torso . . . . .                                      | 24 |
| 2.11. Piezas . . . . .                                     | 25 |
| 2.12. Juntas Actuadas . . . . .                            | 26 |
| 2.13. Distribución de juntas del robot . . . . .           | 26 |
| 2.14. Servomotor Vigor VS-11 . . . . .                     | 27 |
| 2.15. Servomotores con elementos de acoplamiento . . . . . | 28 |
| 3.1. Bases Principales. . . . .                            | 30 |
| 3.2. Rotación $R_{A1}$ . . . . .                           | 32 |
| 3.3. Rotación $R_{A2}$ . . . . .                           | 33 |
| 3.4. Rotación $R_{A3}$ . . . . .                           | 33 |
| 4.1. Spline cúbico . . . . .                               | 39 |
| 4.2. Spline cúbico con base . . . . .                      | 40 |
| 4.3. Parábola en el plano X-Z . . . . .                    | 41 |
| 5.1. Sucesión de pasos del robot . . . . .                 | 51 |
| 5.2. Posición canónica . . . . .                           | 53 |
| 5.3. Grados servo vs PWM . . . . .                         | 54 |
| 5.4. Comportamiento del robot sobre el spline. . . . .     | 55 |
| 5.5. Trayectoria de los miembros . . . . .                 | 56 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Matriz de decisión . . . . .                                   | 18 |
| 2.2. Comparación de materiales . . . . .                            | 18 |
| 2.3. Área para ubicación de bahía de carga y acoplamiento . . . . . | 19 |
| 2.4. Especificaciones técnicas de los servomotores . . . . .        | 28 |
| 5.1. Características del ATmega 2560 . . . . .                      | 46 |
| 5.2. Grados servo vs PWM . . . . .                                  | 53 |

La robótica es comúnmente definida como la ciencia que estudia la conexión inteligente entre percepción y acción [17]. Un robot es un sistema mecánico multipropósito fijo o móvil que puede ser controlado automáticamente, reprogramable y de varios grados de libertad [7]. El componente esencial de un robot es el sistema mecánico dotado, en general, con un aparato de locomoción (ruedas, orugas, piernas mecánicas) y un aparato de manipulación (brazo mecánico, extremo actuante, manos artificiales) [17].

Un sistema robótico es en realidad un sistema complejo, funcionalmente constituido por múltiples subsistemas (Fig. 1) [17].

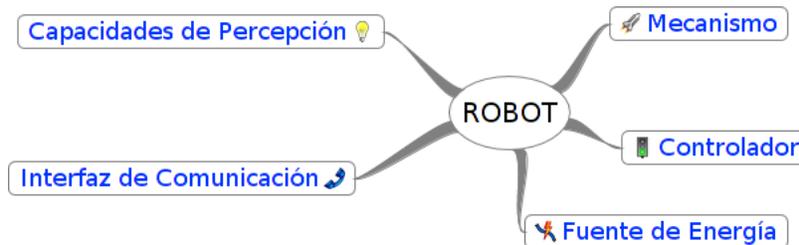


Fig. 1: Componentes de un sistema robótico

**Mecanismo** Consiste en una estructura mecánica articulada accionada por actuadores, ya sean eléctricos, neumáticos o hidráulicos, que transmiten su movimiento a las juntas y la elección de los materiales [7].

**Capacidades de percepción** Son las que ayudan al sistema mecánico del robot a adaptarse a las perturbaciones y los cambios impredecibles en el ambiente que se desempeña. Consiste en los sensores internos, que proveen información sobre el estado de robot, como las posiciones y las velocidades de las juntas y en los sensores externos que obtienen información sobre el ambiente, como por ejemplo, detección de contacto, medición de distancia y visión artificial.

**Controlador** Es la capacidad de conectar la acción y la percepción de manera inteligente [17]. Comanda la ejecución de las acciones para lograr los objetivos fijados por el método de planeación de tareas, así como las restricciones impuestas por el robot y el ambiente. Genera las señales de entrada para los actuadores como consecuencia de las salidas de los sensores y de las instrucciones del usuario.

**Interfaz de comunicación** Esta es utilizada por el usuario para programar las tareas que el robot debe llevar a cabo.

**Fuente de energía** Es el dispositivo que se encarga de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del robot.

La *adaptabilidad*, que es la capacidad del robot de ajustar sus movimientos a los cambios sufridos en el medio ambiente mientras ejecuta sus tareas y la *versatilidad*, que se refiere a la variedad de tareas o a las varias formas que tiene un robot de ejecutar un sola tarea sin necesidad de cambiar su estructura mecánica o el sistema de control, son cualidades que describen la flexibilidad de un robot.

Se pueden distinguir principalmente tres tipos de robots [7] :

- Manipuladores - Imitan el brazo humano. (Fig. 2)



Fig. 2: Manipulador. KUKA robot. [8]

- Caminantes - Imitan la locomoción de humanos, insectos y otro tipo de animales. (Fig. 3)

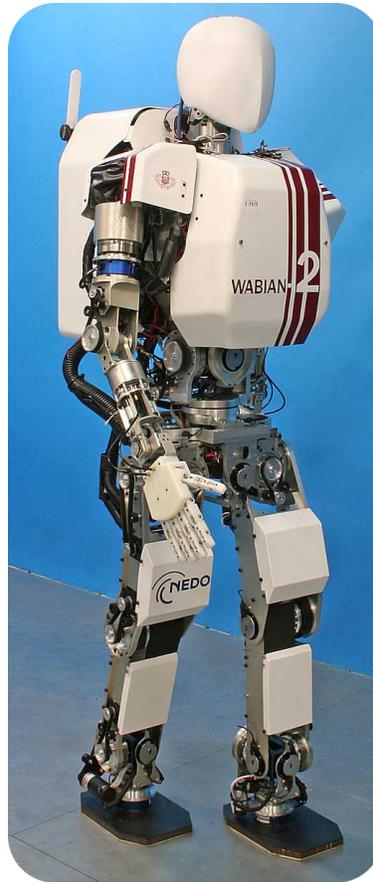


Fig. 3: Caminante. Wabian. Waseda University, Japan. [20]

- Móviles - Son aquellos que basan su locomoción en ruedas. (Fig. 4)

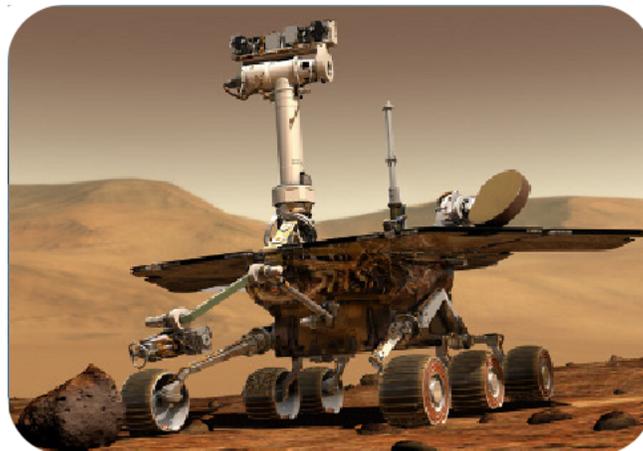


Fig. 4: Móvil. Spirit Rover. [13]

Si bien los robots manipuladores son utilizados en aplicaciones donde su base permanece fija por su propia naturaleza, es posible acoplarlos a un robot distinto que les brinde movilidad. Por otra

parte cuando se requiere un desplazamiento autónomo del robot, la decisión de diseño se centra en elegir entre un robot móvil y un caminante y esa decisión depende en gran parte de las actividades a realizar, pero sobre todo, del terreno en que deba desenvolverse. Cuando el objetivo es que el robot se desenvuelva en cualquier tipo de terreno, ya sea natural o artificialmente creado, los caminantes presentan mayores ventajas, estas son (Fig. 5):

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Movilidad</b>                     |  |
|                                      |  |
| <b>Evasión de Obstáculos</b>         |  |
| <b>Suspensión</b>                    |  |
| <b>Terreno Natural (discontinuo)</b> |  |
| <b>Deslizamiento y Atasco</b>        |  |
| <b>Daño Ambiental</b>                |  |
| <b>Velocidad Promedio</b>            |  |

Fig. 5: Ventajas de los robots caminantes vs. robots móviles. [3]

**Movilidad** Son intrínsecamente sistemas omnidireccionales. Pueden cambiar de sentido independientemente de la dirección de la referencia principal del cuerpo del robot, mientras que un robot con ruedas tendría que dar todo un giro para cambiar su sentido. Pueden orientar y mover su cuerpo, dejando fijos los extremos actuantes y solo cambiando la longitud de las piernas [3].

**Evasión de obstáculos** Los caminantes pueden superar e incluso pasar sobre objetos cuya altura es menor que la distancia del robot al piso, mientras que un robot con ruedas solo puede superar

obstáculos ligeramente más altos que la mitad del radio de su rueda [9]. Los robots con orugas pueden superar obstáculos más altos que los vehículos con ruedas, pero llevando a cabo grandes movimientos con su cuerpo.

**Suspensión** Esta ventaja consiste en la capacidad de un caminante de adaptarse a las irregularidades del terreno debido a las diferentes longitudes que pueden tomar sus piernas, por lo tanto, pueden desplazarse sobre terrenos accidentados solo con la nivelación de su cuerpo permitiendo movimientos más suaves. En contraste, un robot con ruedas es siempre paralelo al terreno y adopta inclinaciones similares a las del suelo, lo que le dificulta el desplazamiento sobre terrenos discontinuos.

**Terreno natural (discontinuo)** Los robots móviles requieren terrenos pavimentados y continuos para moverse eficientemente, mientras que los robots caminantes no necesitan un terreno preparado para moverse, ya que pueden desplazarse sobre terrenos arenosos, lodosos, rígidos y suaves con eficiencia similar. Además no necesitan terreno continuo para moverse.

**Deslizamiento y atasco** Las llantas tienden a hundirse en terreno poco compactado, lo que hace difícil su desplazamiento sobre este tipo de terreno. En un caminante, cuando las piernas se apoyan aplican una fuerza puntual sobre el suelo, haciendo que este se compacte, permitiendo un mejor apoyo.

**Daño ambiental** Los caminantes solo tocan el suelo en algunos puntos, mientras que los robots con ruedas u orugas, marcan sus huellas dobles y continuas a lo largo del terreno.

**Velocidad promedio** Los móviles se pueden desplazar a una velocidad más alta sobre terrenos planos y continuos, pero cuando el terreno pierde estas características, los caminantes son la mejor opción [3].

La robótica ha evolucionado de una manera tal, que actualmente podemos ver robots industriales trabajando en fábricas automotrices, vehículos guiados automáticamente moviendo grandes cargas en rutas predefinidas, robots operados remotamente neutralizando bombas, e incluso robots semi autónomos que van a Marte moviéndose de un lado a otro comandados desde la Tierra. (Fig. 4)

Los robots han sido utilizados ampliamente en aplicaciones de automatización industrial, aunque desde la década pasada, otras áreas de aplicación han surgido como por ejemplo las médicas, de servicio (de limpieza, seguridad), espaciales, transporte, submarinas, entretenimiento, entre otras, en las cuales, el robot trabaja de manera independiente o de manera cooperativa con un operador para llevar a cabo tareas complejas en un ambiente de mayor o menor complejidad [7].

Desde los albores de la robótica se ha trabajado incansablemente para lograr la autonomía robótica, significando esto que los robots actúen inteligentemente en ambientes desconocidos e impredecibles. Con la creación de infraestructura enfocada en la robótica móvil y la robótica caminante es como se enfrenta la solución de autonomía.

Los robots irán cada vez más y más lejos en nuestra sociedad. Las investigaciones enfocadas en el desarrollo de la autonomía robótica están enormemente motivadas ante la expectativa de tener robots que puedan trabajar con nosotros y por nosotros en los ambientes en donde nos desenvolvemos día con día, asistiéndonos en el trabajo y el hogar, siendo nuestros ayudantes pero también nuestra compañía en la ejecución de diferentes tareas, de modo que los humanos, podamos tener un mayor tiempo de esparcimiento y una mejor calidad de vida [11].

La robótica se está volviendo cada vez más importante en nuestras economías y sociedades, y están comenzando a influenciar la forma en como hacemos las cosas. La limpieza, transportación, el sector salud e incluso el entretenimiento, perciben el incremento en el uso de los robots. Por años las novedades robóticas se han enfocado en la producción industrial, sin embargo actualmente han pasado a las solicitudes de servicio. Dada la amplia gama de aplicaciones potenciales, se espera que a su debido tiempo el mercado de robots de servicio llegue a ser mucho más grande que el mercado de robots industriales. Los sistemas robotizados evitan la presencia de trabajadores en entornos peligrosos y realizan tareas de forma automática, además de reducir costos de operación y mejorar el nivel tecnológico y la productividad de la industria de servicios en el mantenimiento de industrias, edificios y hogares.

Los robots de servicio no tienen una definición estricta aceptada internacionalmente, que los delimite de otros tipos de equipos, en particular, de los robots manipuladores industriales. Aunque la IFR (International Federation of Robotics), ha adoptado una definición preliminar, “Un robot de servicio, es un robot que opera de manera parcial o totalmente autónoma, para realizar servicios útiles para el bienestar de los humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura.”

Con esta definición, los robots industriales también podrían ser considerados como robots de servicio, siempre que no sean instalados en operaciones de manufactura. Debido a la gran cantidad de formas y estructuras así como áreas de aplicación, los robots de servicio no son fáciles de definir.

Según las estadísticas de la IFR, hacia el final del 2009, se habían vendido 76,600 unidades de robots de servicio para uso profesional en todo el mundo, de las cuales 23,200 unidades corresponden a robots de servicio en aplicaciones de defensa, representando el 30 %. Siguen los robots de campo (minería, ganadería, agricultura, pero principalmente robots de ordeño) con 25 %, robots de limpieza y robots para aplicaciones médicas con 8 % cada uno y robots submarinos con 7 %. Robots para construcción y demolición y plataformas robóticas móviles para uso general con 6 % cada una, sistemas logísticos 5 % y robots para rescate y aplicaciones de seguridad con 4 % conforman los siguientes rangos del total de la estadística, dando un total de \$13.2 billones de dólares.

En lo relativo a robots de servicio para uso personal y privado, alrededor de 5.6 millones de unidades para uso doméstico y alrededor de 3.1 millones de unidades para entretenimiento y ocio fueron vendidos.

Los robots de servicio para uso personal y doméstico son registrados por separado ya que su valor unitario en general, es solo una fracción de los muchos tipos de robots de servicio para uso profesional. Además son producidos para canales de mercado y precios completamente diferentes. Estos se

encuentran principalmente en las áreas del “qué hacer doméstico” (limpieza con aspiración y podadores de césped) (Fig. 6) y “entretenimiento y ocio” (robots de juguete, sistemas de entretenimiento y robots educativos y para aprendizaje).



(a) Limpieza con aspiración. iRobot Roomba. [6]



(b) Podador de césped. Field Robotics Israel. [15]

Fig. 6: Robots de servicio para uso personal y doméstico

El mercado de robots que brindan asistencia a personas discapacitadas es aún pequeño, pero se espera un crecimiento sustancial en los siguientes diez años. Robots para transportación personal y robots para seguridad y vigilancia también tendrán un incremento importante en el futuro.

En 2009, más de 26,000 robots podadores y alrededor de un millón de robots aspiradores de limpieza fueron vendidos, 7 % menos que en el 2008.

En cuanto a las proyecciones para el periodo 2010-2013 referidas a los robots de servicio para uso profesional, se prevé que la población aumente a alrededor de 80,000 unidades. Las áreas de aplicación con fuerte crecimiento serán las de defensa, rescate y aplicaciones de seguridad, robots de campo, sistemas logísticos, robots para exploración, aplicaciones médicas y plataformas robóticas para uso múltiple. La Fig. 7 presenta la estadística de la venta de robots para uso profesional hasta antes del 2009, en el 2009 y las proyecciones comprendidas del 2010 al 2013.

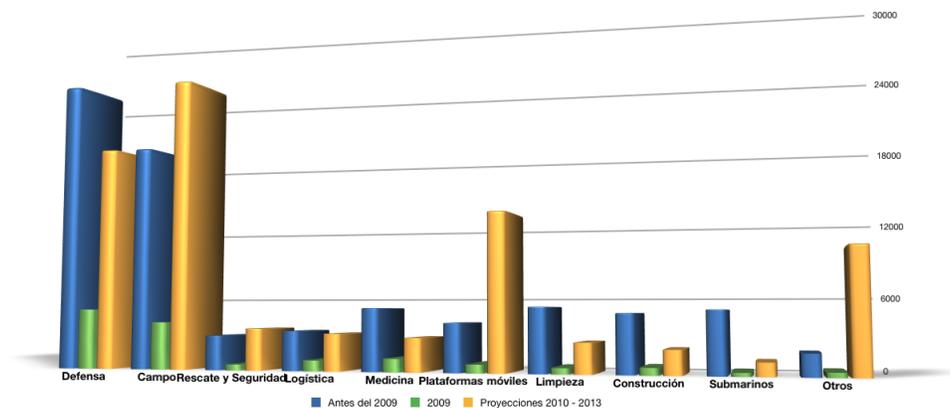


Fig. 7: Ventas de robots para uso profesional. [5]

Respecto a las proyecciones para el mismo periodo (2010-2013), de robots de servicio para uso personal, se preveen ventas de todos los tipos de robots domésticos (limpieza con aspiración, podadores de césped, limpiadores de ventanas y de otros tipos). Estas podrían alcanzar 6.7 millones de unidades. La Fig.8 presenta la estadística de la venta de robots para uso personal y doméstico hasta antes del 2009, en el 2009 y las proyecciones comprendidas del 2010 al 2013.

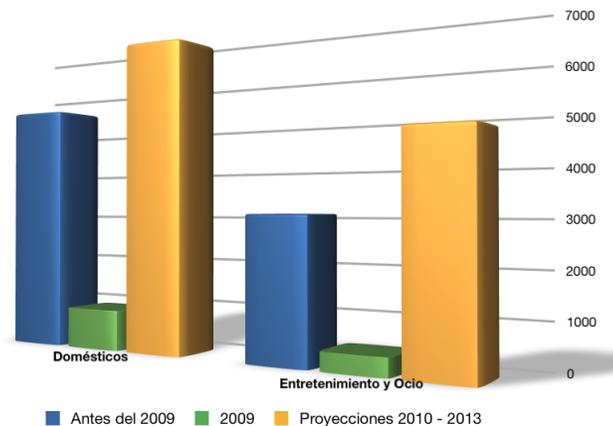


Fig. 8: Ventas de robots para uso personal y doméstico. [5]

El mercado para robots de entretenimiento y ocio, que incluye robots de juguete, está previsto con 4.6 millones de unidades, la mayoría de los cuales, tendrán un muy bajo precio, comparados con los demás.

La robótica de servicio, representa una gran promesa para el mercado futuro. Según las estadísticas previamente presentadas, la demanda de robots para aplicaciones de servicio será enorme. Actualmente, sin embargo, las opciones existentes son ofrecidas a precios muy altos, haciendo que en su gran mayoría solo sean captadas por empresas y un sector privilegiado de la población. Las opciones comerciales son robots programados con tareas específicas, lo que hace necesario adquirir un robot para cada tarea que se desee automatizar, pues es difícil encontrar robots multipropósito. El desarrollo de robots multipropósito acerca la tecnología a las masas, pues permite con una sola inversión aumentar la productividad y la eficiencia en varias tareas. Este tipo de robots no solo incrementarán la inversión en el sector, sino que también impulsará los desarrollos complementarios debido a la gran demanda generada. Este efecto será potenciado si la alternativa generada es más económica con respecto a la oferta actual, acelerando de este modo la adopción de tecnología robótica al común de la población, con los beneficios añadidos que esto genera.

Este proyecto se enfoca en el desarrollo de una plataforma robótica multipropósito enfocada al sector servicio, que permita el uso de distintas herramientas ampliando el rango de aplicación.

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar una plataforma robótica multipropósito enfocada al sector servicio.

### **Objetivos Particulares**

- Diseñar y desarrollar una estructura mecánica capaz de soportar y permitir el desplazamiento de los subsistemas que componen al robot.
- Generar el modelo cinemático del robot.
- Generar algoritmos de trayectorias que controlen el movimiento del robot.
- Diseñar y desarrollar los circuitos electrónicos que permitan la interacción entre los actuadores y el sistema de control.
- Desarrollar la interfaz de comunicación humano-máquina.

### 1.1. Planteamiento del problema

Los sistemas robotizados son capaces de realizar tareas de forma autónoma, evitan la presencia de trabajadores en entornos peligrosos, reducen los costos de operación, mejoran el nivel tecnológico y la productividad de la industria de servicios en el mantenimiento de industrias, edificios y hogares. Muchos países están invirtiendo en establecer el nuevo mercado de los robots de servicio, que cohabitará con los humanos en la vida diaria [17]. Mientras tanto, la actual oferta comercial de robots de servicio ofrece robots programados para tareas particulares a precios de venta muy elevados, permitiendo que solo empresas y el sector privilegiado de la población adquiera uno de estos equipos, por lo tanto las aplicaciones en las que estos robots se desarrollan son enfocadas en satisfacer las necesidades de este mercado.

El desempeño de tareas monótonas y repetitivas, como por ejemplo, riego y poda de césped, barrer, trapear, pintar, fumigar, entre otras tantas, las puede ejecutar un robot. Si bien es cierto, que ya existen robots que cortan el césped, robots que barren, robots que trapean, robots que pintan y fumigan (Fig. 1.1), también es cierto que el desarrollo de robots multipropósito está rezagado.



(a) Podador de césped. Robomow. USD 2,500[15]



(b) Limpieza con aspiración. iRobot Roomba. USD 600 [6]



(c) Trapear. Mint Cleaner USD 250[10]



(d) Pintor. RXPaint60 painting robot. [18]



(e) Fumigador. Robot Holandés. [14]

Fig. 1.1: Robots de servicio

Las plataformas robóticas multipropósito acercan la tecnología a las masas, por la disminución de monto de inversión que esto implica, pues permite con una sola inversión aumentar la productividad y la eficiencia en varias tareas. La inversión en este tipo de robots permitiría que se elevara la calidad de vida y brindaría un mayor tiempo de esparcimiento a la población.

Dicho lo anterior, se expone la necesidad de satisfacer varias necesidades con una misma solución para reducir en gran medida los costos y elevar la calidad de vida de la población.

## 1.2. Requerimientos del sistema

La tarea es desarrollar una plataforma robótica multipropósito enfocada al sector servicio. El sistema a desarrollar debe tener características que le faciliten y garanticen la ejecución de sus tareas. A estas características les llamamos “*requerimientos del sistema*” y son los siguientes:

- Contar con un diseño mecánico que permita la adaptación de diferentes implementos de trabajo.
- Ser capaz de llegar al lugar en donde debe realizar la tarea.
- Seguir las trayectorias fijadas por el usuario, adaptándose a diferentes tipos de terreno.
- Garantizar la ejecución de las tareas de una manera rápida y eficiente.
- Evadir obstáculos que se le presenten a lo largo del camino.
- Poder variar su altura con respecto al piso para una mejor ejecución de las tareas asignadas.

## 1.3. Solución propuesta

La función de diseño juega el papel principal de definir la forma física del producto que mejor satisfaga los requerimientos [19]. Conocer los requerimientos permite enfocar la atención en buscar soluciones a los problemas existentes en vez de divagar en necesidades secundarias.

En respuesta a los requerimientos previamente mostrados, se ha diseñado un robot cuadrúpedo caminante de 12 GDL con una estructura mecánica, como se aprecia en la Fig. 1.2, que permite la adaptación de diferentes aditamentos para la ejecución de diversas tareas y su adaptación a diferentes tipos de terreno.

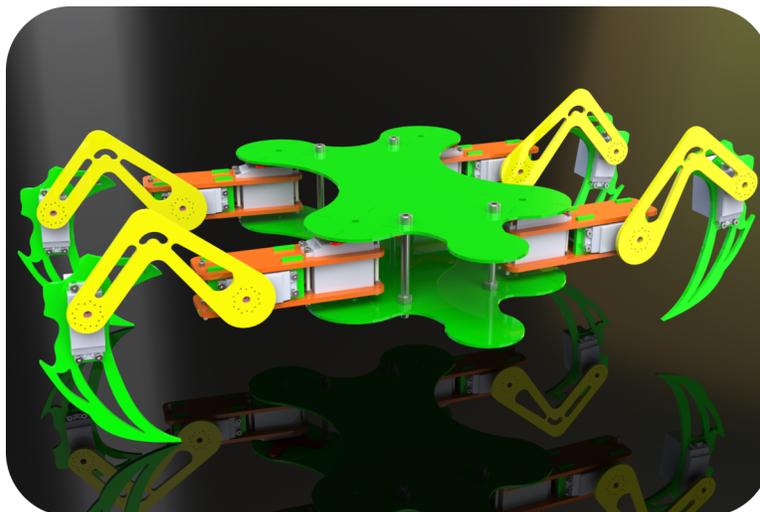


Fig. 1.2: Robot cuadrúpedo caminante

La solución propuesta está compuesta por un subsistema mecánico, un subsistema electrónico, y un subsistema de control, esto permitirá enfocar los esfuerzos de diseño de forma individual a la especialización de las funciones respectivas y a la optimización de cada una de ellas.

El subsistema mecánico consta de una base que soporta al subsistema electrónico y a las extremidades que proporcionan locomoción al sistema. Cada una de las extremidades consta de tres partes: un hombro, un codo y un extremo actuante, como se observa en la Fig. 1.3. Cada una de estas partes, consta de un servomotor, y debido a su configuración forman juntas rotatorias, por lo tanto, cada extremidad proporciona 3 GDL al sistema, dando en total los 12 GDL que tiene el sistema debidos a sus cuatro extremidades.

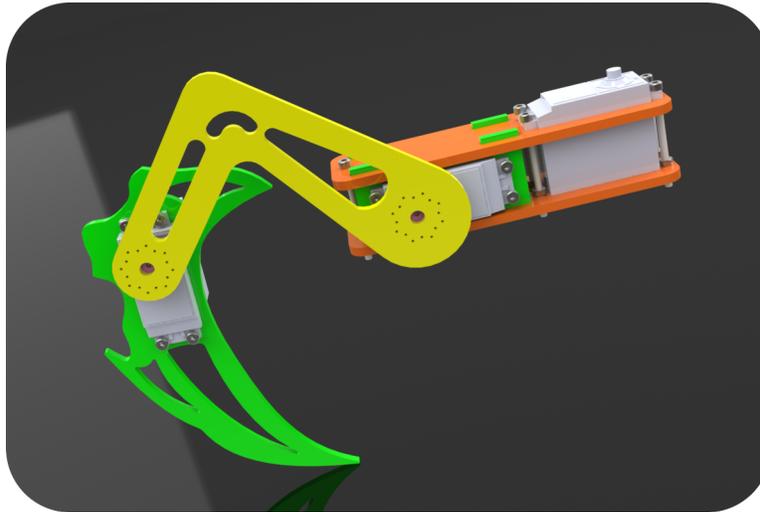


Fig. 1.3: Extremidad

El subsistema electrónico está formado por un microcontrolador que envía señales de modulación de ancho de pulso a los circuitos electrónicos para controlar el giro de los actuadores con base en las instrucciones recibidas por la computadora.

## CAPÍTULO 2

## DISEÑO MECÁNICO

El subsistema mecánico está compuesto por el hardware que forma la estructura del robot, para permitir su interacción con el medio ambiente. El objetivo particular a cumplir en este subsistema es:

- Diseñar y desarrollar una estructura mecánica capaz de soportar y permitir el desplazamiento del resto de los subsistemas que componen al robot.

Además de los requerimientos generales, cada subsistema debe contar con una lista de requerimientos particulares que definan el propósito y la importancia del subsistema. Con base en las necesidades que se han expuesto en el planteamiento del problema, se han generado los siguientes requerimientos para el subsistema mecánico:

- Dimensiones y número de GDL suficientes para permitir al robot evadir obstáculos y tener un mayor espacio de trabajo para desempeñar sus tareas de mejor manera.
- Material resistente y ligero para incrementar su capacidad de carga, para así poder evitar deformaciones excesivas que limiten el adecuado funcionamiento del sistema.
- Estructura que garantice buen equilibrio durante el desarrollo de sus tareas.
- Contar con una bahía de carga y acoplamiento para aditamentos, que garantice su buena sujeción.
- Capacidad de desplazamiento en todo tipo de terrenos para poder evitar limitaciones y garantizar que el robot sea capaz de llegar al sitio donde deba realizar la tarea.

## 2.1. Generación de conceptos

Partiendo del conocimiento de los requerimientos del sistema, se debe diseñar una estructura mecánica que los satisfaga. Para lograr un diseño exitoso, se debe comenzar con el desarrollo de conceptos. Un concepto es usualmente expresado como un bosquejo o un dibujo aproximado en 3D y es frecuentemente acompañado de una breve descripción. Un buen desarrollo de conceptos es crucial, pues es en esta etapa en la cual el concepto es seleccionado y se comienza con el desarrollo del proyecto [19].

Con base en los requerimientos del sistema, presentados en la sección previa, se han propuesto tres diferentes configuraciones para el cuerpo del robot, producto de una previa lluvia de ideas de donde fueron seleccionados por considerarse las mejores opciones, las cuales se muestran a continuación en las Fig. 2.1, 2.2 y 2.3. El objetivo en este paso es explorar las opciones existentes que puedan satisfacer las necesidades presentadas.

### 2.1.1. Concepto ZZ-Z

La estructura del robot mostrado en la Fig. 2.1 se compone de dos bases que forman el torso y cuatro extremidades, cada una de las cuales están compuestas por dos juntas rotacionales que giran alrededor del eje Z, separadas por una distancia  $A_1 \neq 0$  y por una tercera junta Z traslacional cuyo movimiento es conducido por una guía.

El torso presenta cinco extremos circulares, cuatro de los cuales sirven de soporte para las extremidades y un último círculo que sirve como cabeza del cuerpo, sirviendo además como referencia de la dirección de desplazamiento del robot y soporte de sensores para detectar colisiones frontales. Detrás de la cabeza se encuentra el área principal del torso que presenta la zona ideal para la implantación de la bahía de carga y acoplamiento para aditamentos.

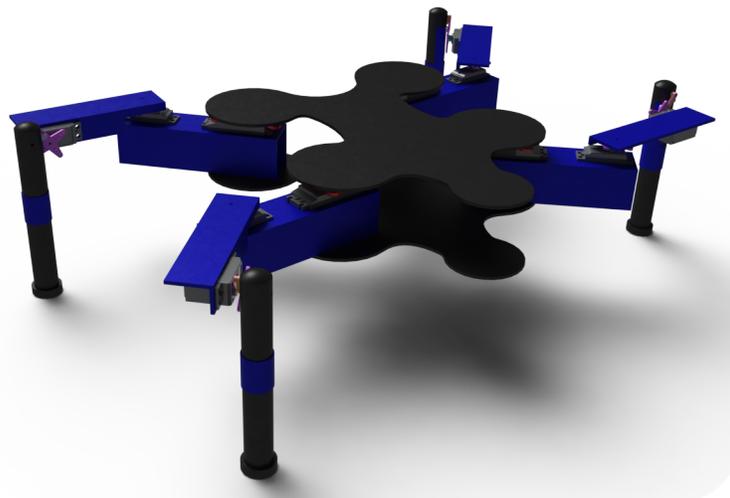


Fig. 2.1: Concepto ZZ-Z

### 2.1.2. Concepto ZXX -1

Este concepto (Fig. 2.2) cuenta con un torso circular que brinda simetría al robot y las ventajas que ello significa, en este se fijan cuatro extremidades. Cada extremidad consta de 3 GDL, la primer junta gira alrededor del eje Z, a su costado y solo separada por las dimensiones del segundo actuador, se encuentra la segunda junta, que gira alrededor del eje X; por último se puede observar una tercer junta cuyo giro es alrededor de X, separada por una distancia  $C_1 \neq 0$ , de las 2 anteriores.

La parte superior del torso ofrece la base de soporte necesaria para el subsistema electrónico; la parte inferior ofrece la mejor zona para la colocación de la bahía de carga y acoplamiento para aditamentos.

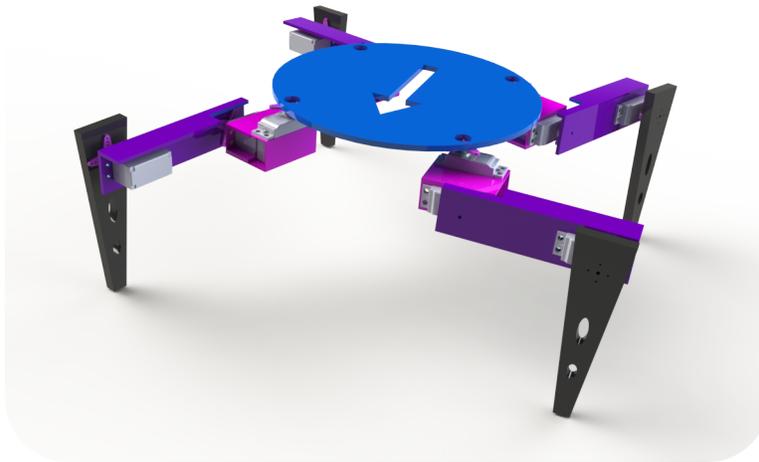


Fig. 2.2: Concepto ZXX -1

### 2.1.3. Concepto ZXX -2

El torso está formado por dos bases simétricas, cada una de las cuales presenta cuatro extremos circulares. A cada uno de dichos extremos se encuentra fijada una extremidad 2.3. En cada una de las extremidades se pueden observar dos juntas, una primera que gira sobre el eje Z, separada de la segunda que gira sobre el eje X, por una distancia  $D_1 \neq 0$ . Una tercer junta se puede observar, cuyo giro es sobre el eje X, unida con la segunda junta por medio de una pieza con forma de eslabón. La tercer junta está adaptada a una pieza que sirve como apoyo contra el suelo.

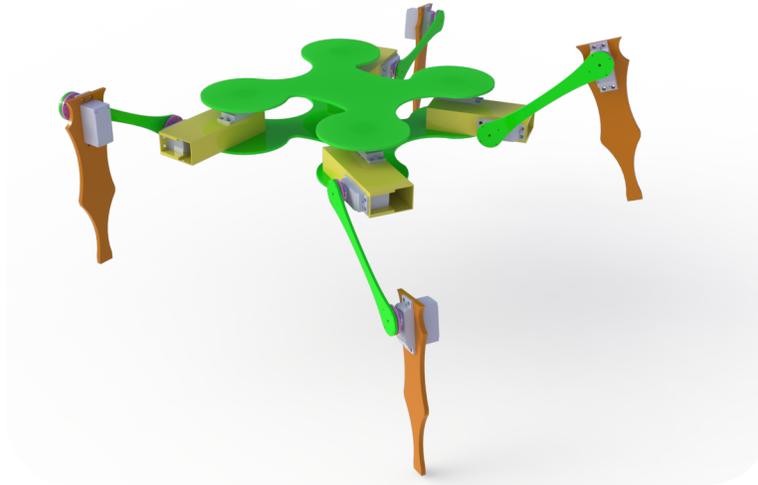


Fig. 2.3: Concepto ZXX -2

## 2.2. Selección de conceptos

La selección del concepto es el proceso de evaluar los conceptos con respecto a los requerimientos o a algún otro criterio, comparando las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos.

### 2.2.1. Matriz de decisión

Con el fin de filtrar el número de conceptos, es importante tener un proceso definido que nos indique los pros y los contras de cada uno de los elementos de las ideas. Esencialmente, se compara cada concepto en los aspectos clave utilizando matrices de decisión. El concepto que obtenga la mejor puntuación, continuará hacia la fase de desarrollo.

#### 2.2.1.1. Descripción del proceso de evaluación

En esta etapa a los requerimientos previamente planteados les llamaremos criterios de selección, a cada uno de estos se les asigna una ponderación en función de su importancia en el diseño del robot, en este caso van del 5 % al 40 %. Después se asignará una calificación que puede ir desde 1 hasta 5, donde 5 es la calificación mayor. Una vez asignada la calificación, se multiplica por la ponderación asignada para cada uno de los casos. Finalmente, se obtiene un total que indica cual es el concepto que responde mejor a la mayoría de los criterios de selección. El desarrollo del proceso anterior, se expone en la Tabla 2.1. Este proceso de selección y puntuación significan que la selección de un concepto para continuarlo hacia la siguiente fase de desarrollo se realiza mediante una técnica adecuada y que no solo está influenciada por los sentimientos [19].

Tabla 2.1: Matriz de decisión

| Criterios de selección                        | $\sigma$ | $C_{ZZ-Z}$ | $\sigma \cdot C_{ZZ-Z}$ | $C_{ZXX-1}$ | $\sigma \cdot C_{ZXX-1}$ | $C_{ZXX-2}$ | $\sigma \cdot C_{ZXX-2}$ |
|---|----------|------------|-------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| Espacio de trabajo                            | 40 %     | 5          | 2                       | 3           | 1.2                      | 4           | 1.6                      |
| Masa [kg]                                     | 20 %     | 2          | 0.4                     | 5           | 1                        | 4           | 0.8                      |
| Estética                                      | 20 %     | 2          | 0.4                     | 5           | 1                        | 4           | 0.8                      |
| Ubicación de la bahía de carga y acoplamiento | 15 %     | 5          | 0.75                    | 2           | 0.3                      | 4           | 0.6                      |
| Morfología del torso                          | 5 %      | 4          | 0.2                     | 2           | 0.1                      | 3           | 0.15                     |
| Total   |          |            | 3.75                    |             | 3.6                      |             | 3.95                     |

Donde  $\sigma$  es la ponderación asignada a cada criterio,  $C_i$  la calificación,  $\sigma \cdot C_i$  la puntuación ponderada, e  $i \in \{ZZ - Z, ZXX - 1, ZXX - 2\}$  el concepto que se califica.

### 2.2.1.2. Justificación de calificación de los criterios de selección

**Material** El material debe ser liviano debido a que de este modo los actuadores no tendrán que trabajar a su máxima capacidad para poder mover el robot, lo que alargará el tiempo de vida de los mismos. Debido a lo anterior, el acrílico fue seleccionado como producto de una comparación de densidad entre este y otros posibles materiales considerados útiles para la construcción del modelo. La Tabla 2.2 muestra dicha comparación.

| Material           | Densidad     |
|--------------------|--------------|
| Nylamid M (blanco) | $1140kg/m^3$ |
| Acrílico           | $1200kg/m^3$ |
| Aluminio           | $2700kg/m^3$ |
| Acero 1020         | $7900kg/m^3$ |

Tabla 2.2: Comparación de materiales

El material propuesto para la construcción del modelo una vez seleccionado el concepto es el acrílico, debido a que se considera más liviano y económico que el aluminio, que es el otro material potencial para construir el modelo, pues su densidad es  $1200kg/m^3$ , resultando menos denso que el aluminio, cuya densidad es de  $2700kg/m^3$ , además de ser más económico que este. A pesar de que la densidad del Nylamid M (nylamid blanco) es ligeramente más baja que la del acrílico, este no presenta la ventaja de la estética, pues comercialmente solo se encuentra en tono blanco, mientras que el acrílico ofrece

todo una gama de colores que se pueden utilizar para darle una apariencia más atractiva al robot, además, la diferencia entre sus densidades es muy poca, por lo que se puede justificar así la viabilidad del acrílico.

**Espacio de trabajo** En relación con el espacio operativo, un índice de desempeño del robot es a lo que se llama el espacio de trabajo, que es la región descrita por el origen del marco del extremo actuante cuando todas las articulaciones del manipulador ejecutan todos los movimientos posibles. El espacio de trabajo está caracterizado por la geometría del manipulador y por los límites mecánicos de las juntas. Es definido como la porción del entorno a la que el robot tiene acceso [17].

En la Fig. 2.4 se presenta una gráfica del espacio de trabajo del concepto seleccionado, a modo de justificar la calificación asignada. Los colores utilizados, son sólo con fines de visualización.

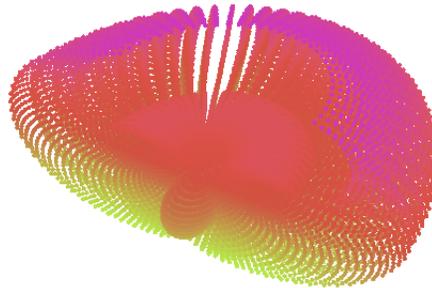


Fig. 2.4: Espacio de trabajo. Concepto ZXX-2

**Ubicación de la bahía de carga y acoplamiento** Se decidió asentar la calificación para este criterio con base al área disponible en cada torso para su implantación. Utilizando el CAD SolidWorks, se obtuvieron dichos datos y se muestran a continuación en la Tabla 2.3

| Concepto     | Área         |
|--------------|--------------|
| <i>ZZ-Z</i>  | $139.16cm^2$ |
| <i>ZXX-1</i> | $119.34cm^2$ |
| <i>ZXX-2</i> | $132.58cm^2$ |

Tabla 2.3: Área para ubicación de bahía de carga y acoplamiento

## **2.3. Diseño de componentes y construcción física**

Una vez que se han completado las matrices de selección se proceden a evaluar los resultados obtenidos. Con el proceso de calificación de conceptos, se filtraron los conceptos y se eligió el concepto que debe avanzar hacia la siguiente fase y a utilizarse como base del diseño final.

Con base en la evaluación de los resultados obtenidos, se decidió que deben incluirse las mejores características de los otros dos conceptos en el concepto seleccionado, a fin de que el diseño se lleve a cabo tomando en cuenta las mejores ideas, como por ejemplo, el torso del concepto ZZ-Z, puede ser utilizado como una mejora al concepto seleccionado pues presenta la ventaja de tener un extremo circular a forma de cabeza del cuerpo que sirve como referencia de la dirección de desplazamiento del robot y permite el soporte de sensores para detectar colisiones frontales.

La masa y la estética, que son ventajas observadas en el concepto ZXX-1 sirven como base para la generación de ideas para aplicarse al concepto ZXX-2, que permitan ofrecer la misma funcionalidad con respecto a su configuración, pero que ofrezcan una mayor estética y disminución de material.

### **2.3.1. Mejora al diseño de componentes**

Se han propuesto mejoras al diseño de los componentes del concepto seleccionado, que es el ZXX-2, que harán más atractiva su apariencia y permitirán el aprovechamiento de la optimización de la masa en otras secciones del robot. Se dividirá la estructura en partes a fin de mostrar la mejora individual de las piezas.

#### **2.3.1.1. Torso**

Como se ha comentado previamente, la opción presentada en el concepto ZZ-Z, ofrece una mayor ventaja frente a la opción presentada por el concepto ZXX-2 que fue el concepto seleccionado. Ambos torsos (Fig. 2.5) presentan una morfología equivalente, la diferencia es un quinto extremo circular a forma de cabeza que presenta uno de ellos.

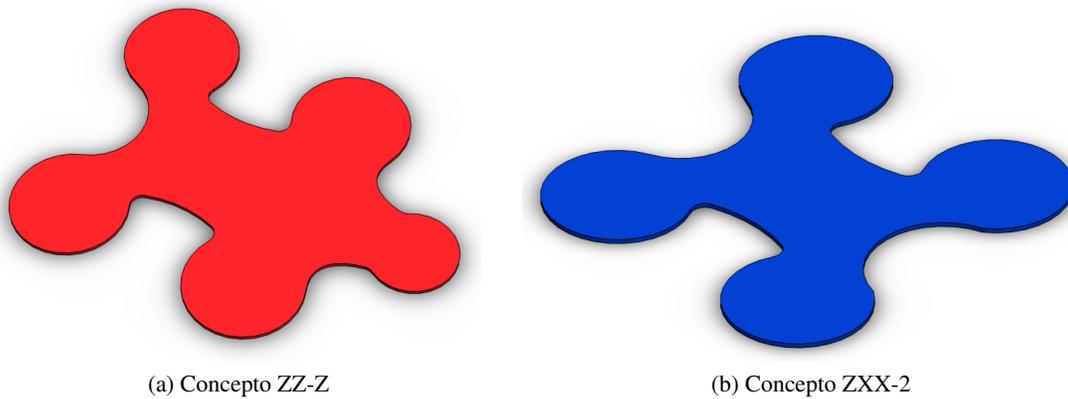


Fig. 2.5: Torsos

La mejora que se decidió, fue el alargamiento de la parte central de la pieza como se puede observar en la Fig. 2.6, a fin de incrementar el área ofrecida para la implementación de la bahía de carga y acoplamiento, mejorando también la armonía con las dimensiones de la estructura en general. La disposición de espacio ofrecido para la ubicación de los circuitos electrónicos también se incrementará, permitiendo una mayor ventilación entre los componentes, lo que mejorará su desempeño y aumentará su tiempo de vida.

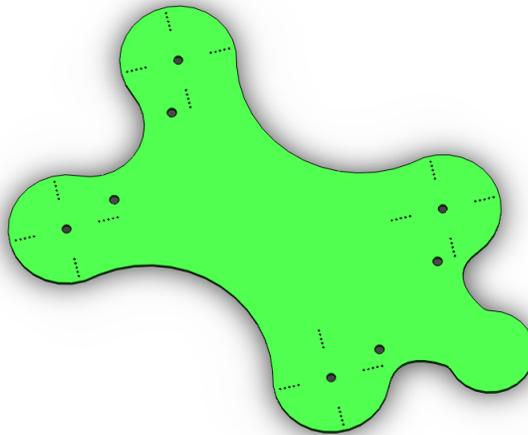


Fig. 2.6: Torso mejorado

### 2.3.1.2. Extremidades

En total, el robot cuenta con cuatro extremidades, cada extremidad está dividida en tres partes a las que llamaremos hombro, codo y extremo actuante.

Los actuadores que conforman las articulaciones correspondientes al hombro y al codo, se encuentran encapsulados entre dos tramos planos de acrílico a forma de tapas (Fig. 2.7b) con orificios rectangulares, de esta forma se elimina el material que como se puede observar en la Fig. 2.8a cubría al cuerpo

de ambos actuadores pero que sin embargo, como producto del rediseño se ha considerado que no es necesario, pues no ofrece ninguna ventaja significativa.

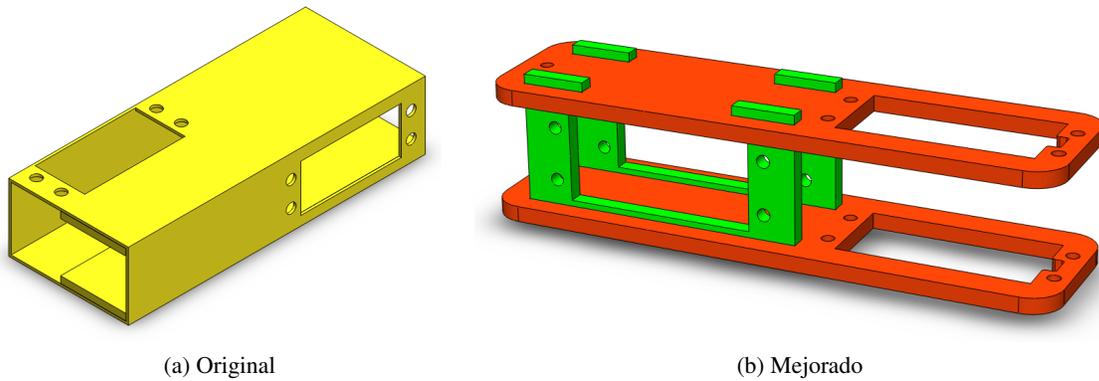


Fig. 2.7: Diseño de los componentes de la sección hombro-codo del brazo

Debido a que el segundo actuador debe tener una orientación a  $90^\circ$  con respecto al primero, se han diseñado piezas que brinden tal soporte a dicho actuador. La orientación de un actuador con respecto de otro, provoca una diferencia en las dimensiones, que se soluciona encapsulando el segundo actuador en dos piezas con forma de “I” (Fig. 2.7b) que a su vez son acopladas en los orificios de las tapas del primer encapsulado, como se aprecia en la Fig. 2.7b.

La segunda sección del brazo corresponde a la pieza que une la articulación del codo con el extremo actuante, que sirve de apoyo contra el suelo. La pieza que cumple esta función en el concepto seleccionado está inspirada en un eslabón simple (Fig. 2.8a) y cumple el propósito para la que fue diseñada. Debido a que se tiene como propósito mejorar la estética del robot, se decidió modificar la morfología de esta pieza, no influyendo en su funcionalidad, sino únicamente en su apariencia.

La nueva pieza diseñada (Fig. 2.8b) está inspirada en la pata de un grillo presentando como características mayor anchura en un extremo que en el otro. Además se ha retirado material con el fin de disminuir la masa de la pieza, se busca que además, los orificios resultantes agreguen estética al diseño.

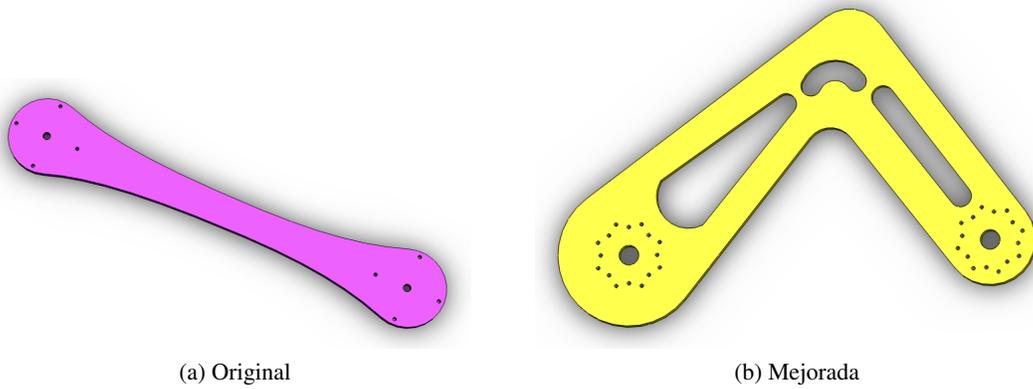


Fig. 2.8: Unión codo-extremo actuante

La última pieza corresponde al extremo actuante. Esta presenta una cavidad para el actuador correspondiente a la tercer articulación y barrenos para sujetarlo. El diseño original presenta una estética sencilla (Fig. 2.9a) que se desea mejorar.

Para poder llevar a cabo una mejora en la estética se decidió que la mejor opción era diseñar un extremo actuante inspirado en la extremidad de algún animal, debido a que la funcionalidad de este tipo de morfologías ya están naturalmente comprobadas. Después de revisar varias opciones, se optó por el diseño basado en la pata de un cangrejo, es decir, una pieza con curvas pronunciadas, en la que se efectuaron cortes que disminuyen la masa de la pieza (Fig. 2.9b).

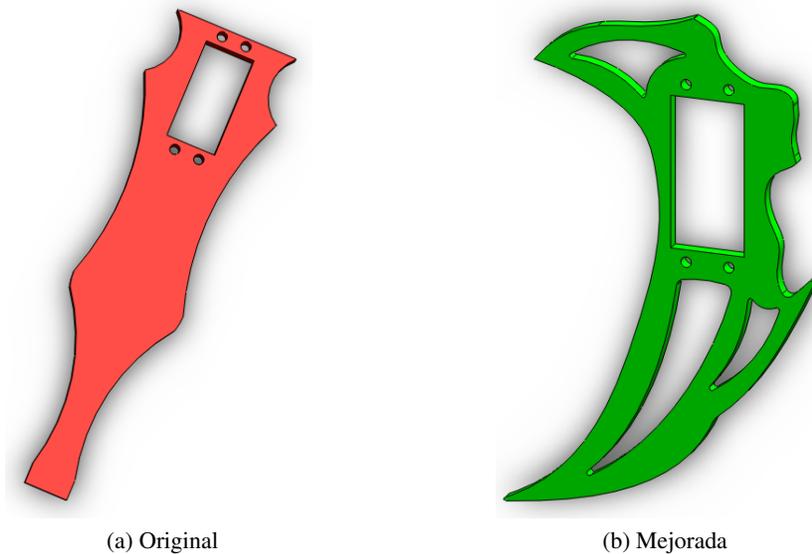


Fig. 2.9: Extremo actuante

### 2.3.2. Construcción

Con la mejora en el diseño de las piezas se incrementó la estética y se redujo material de las mismas. Esto se traduce en una mejor apariencia en la estructura general del robot.

Para llevar a cabo la construcción, es necesario generar los planos de las piezas. Un buen desarrollo de los planos evita errores al momento de maquinar.

Las Fig. 2.10, 2.11a y 2.11b muestran las piezas maquinadas en acrílico negro de 5mm de espesor. Las piezas mostradas en las Fig. 2.11c y 2.11d se maquinaron en acrílico verde de 3mm. La gama de colores en acrílico de 5mm es reducida, y debido a que los efectos mecánicos sobre las piezas por efecto del peso propio del robot no demandan un espesor mayor, es posible optar por acrílico de 3mm en favor de la estética.

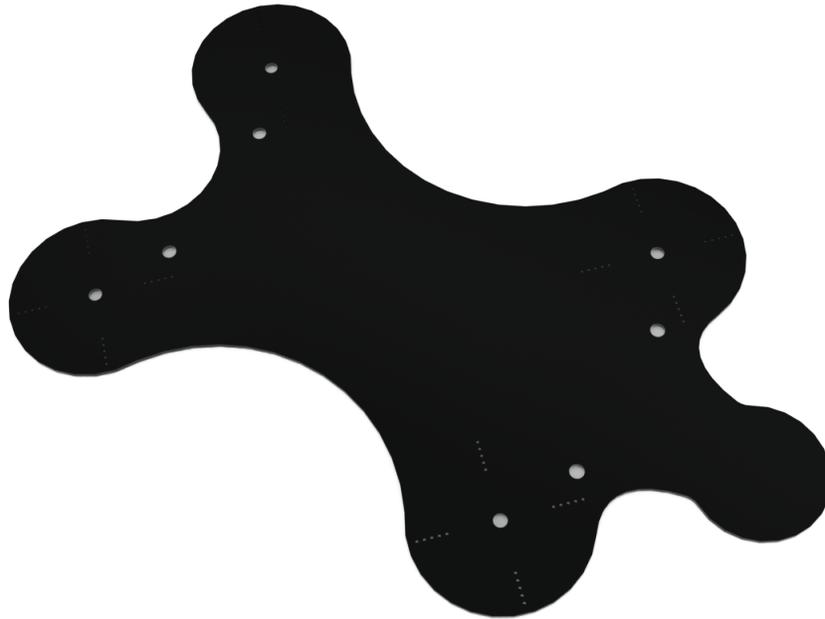


Fig. 2.10: Torso

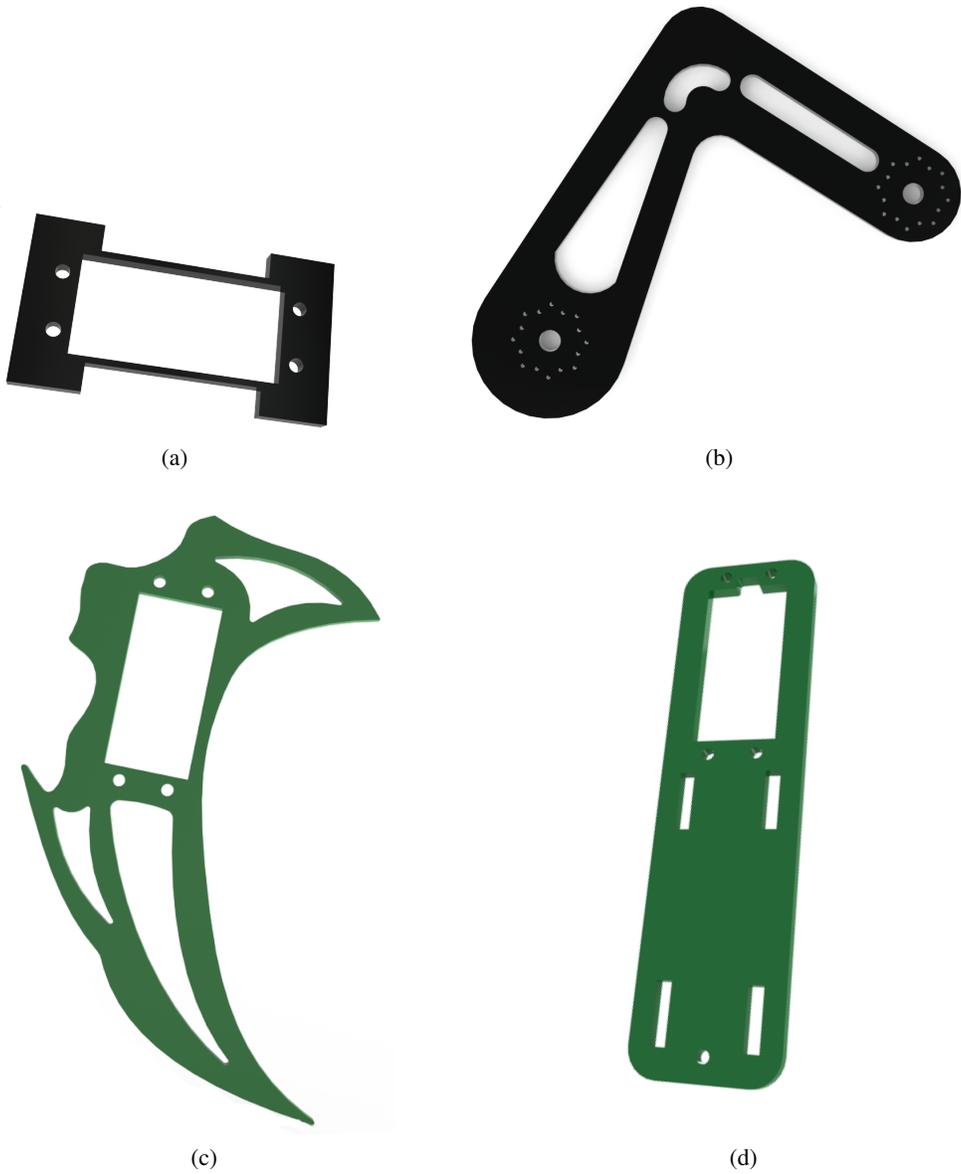


Fig. 2.11: Piezas

## 2.4. Actuadores del Sistema

El diseño mecánico del robot cuenta con tres juntas actuadas en cada extremidad (Fig. 2.12), un motor acoplado a cada una de estas controlará su posición en un tiempo determinado.

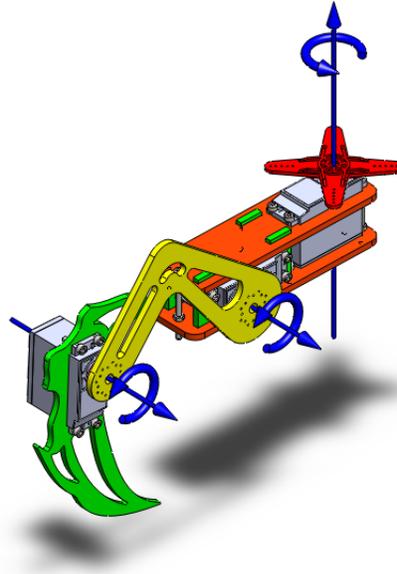


Fig. 2.12: Juntas Actuadas

En la Fig. 2.13 se muestra la distribución de las juntas en el cuerpo del robot.

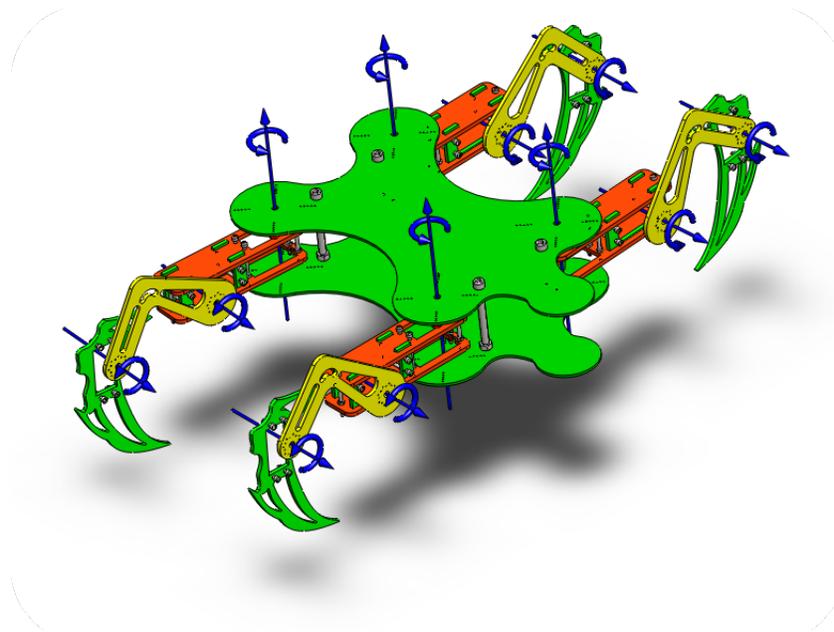


Fig. 2.13: Distribución de juntas del robot

De la variedad de actuadores existentes en el mercado, los servocontrolados ofrecen grandes ventajas con respecto al resto, debido a que en su interior está implementado un controlador electrónico que lleva al eje de salida a la posición deseada. La posición deseada es indicada mediante modulación de ancho de pulso (PWM), evitando así la necesidad de implementar un controlador externo para cada uno de los motores. Otra ventaja es el tren de engranes compuesto con el que cuentan, pues gracias a este, se ofrece un torque de salida mayor al que sería proporcionado si se utilizara únicamente el motor de corriente directa que se encuentra en su interior.

El PWM consiste en enviar un tren de pulsos a una frecuencia determinada, de esta forma se consigue transmitir la información deseada, o en su caso, activar por lapsos cortos de tiempo una carga. El PWM controla la velocidad de los motores de corriente directa mediante una señal de onda cuadrada; al variar la cantidad de tiempo que la señal está presente, se modifica el valor promedio de la señal. Para generar la onda cuadrada se utiliza un microcontrolador, disponiéndolo para que haya una salida tras un periodo de tiempo determinado [1, 4].

Debido a que el robot que se diseña está pensado para ser una plataforma multipropósito, sus actuadores deben contar con una capacidad de torque nominal mayor a la requerida para cargar la masa propia del robot, pues a este serán acoplados módulos de herramientas para llevar a cabo distintas tareas. Por tal motivo, han sido elegidos los servomotores con mayor torque (15kg/cm - 19 kg/cm) de la gama alta de Vigor, marca que ofrece una relación costo beneficio deseable.

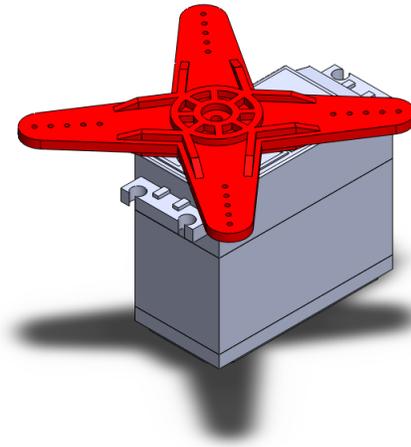


Fig. 2.14: Servomotor Vigor VS-11

Las características de los servomotores seleccionados se presentan en la Tabla 2.4.

| Características           | Valores  |
|---------------------------|--|
| Control de ancho de pulso | 1500 $\mu$ s   |
| Voltaje de operación      | 4.8V ~ 6.0V CD                                       |
| Dirección                 | en contra de las manecillas del reloj                |
| Rango PWM                 | [800 $\mu$ s, 2200 $\mu$ s]                          |
| Velocidad de operación    | 0.22s/60° sin carga(4.8V)<br>0.19s/60° sin carga(6V) |
| Torque                    | $\geq 15kgf.cm$ (4.8V)<br>$\geq 19kgf.cm$ (6V)       |
| Corriente                 | [0.25A, 0.28A]                                       |
| Ángulo de salida          | $\geq 170^\circ$                                     |

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas de los servomotores

Para llevar a cabo el acoplamiento mecánico entre el actuador y los elementos móviles de la estructura del robot, el servomotor cuenta con piezas especialmente diseñadas que se engranan al eje de salida Fig. 2.15 y se acoplan a las piezas descritas en las secciones anteriores.

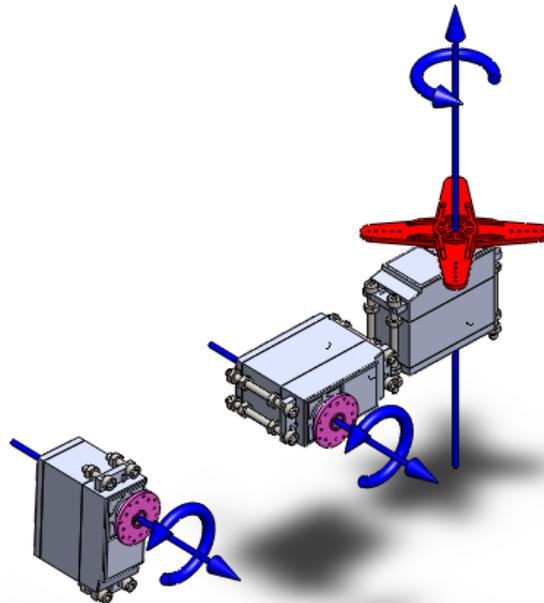


Fig. 2.15: Servomotores con elementos de acoplamiento

La cinemática directa busca determinar la posición y la orientación, en el espacio de trabajo, del extremo actuante del robot, este se obtiene asignando valores a cada una de las juntas que unen los eslabones del robot. El objetivo del análisis de la cinemática directa es determinar el efecto acumulativo del conjunto completo de las variables de las juntas. Existen varias aproximaciones para la obtención de la cinemática directa, en este caso, la convención de Denavit-Hartenberg será utilizada [17, 16].

Para comenzar, se parte del centro del cuerpo del robot con la generación de la base local principal, formada por los vectores  $[\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0, \mathbf{Z}_0]$ , la cual sirve de referencia para generar el resto de bases del robot. Para cada una de las bases generadas se define la dirección  $[\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}]$ .

Las bases que coinciden con el eje de cada una de las juntas se denominan bases principales (Fig. 3.1). Las bases secundarias o auxiliares representan la sucesión de movimientos de rotación necesarios para pasar de una base principal a otra.

Siguiendo la convención de Denavit-Hartenberg solo son permitidos 4 movimientos como máximo entre una base y otra, estos son:

1. Giro sobre el eje Z ( $\theta$ )
2. Traslación sobre el eje Z ( $d_i$ )
3. Traslación sobre el eje X ( $a_i$ )
4. Giro sobre el eje X ( $\alpha$ )

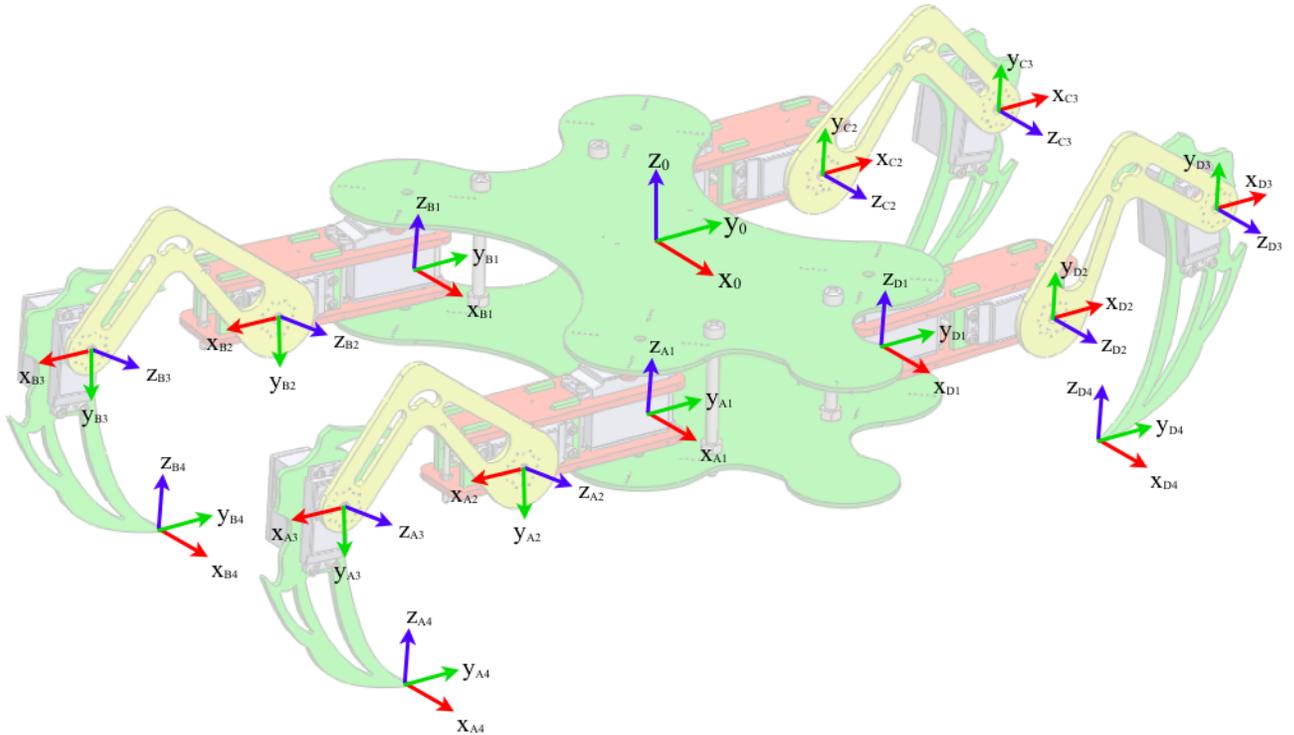


Fig. 3.1: Bases Principales.

El robot cuenta con cuatro extremidades: A, B, C y D, que han sido nombradas en orden alfabético, comenzando por el miembro delantero derecho y recorriendo, en sentido de las manecillas del reloj, la vista superior del robot. Debido a que las extremidades son simétricas, es posible desarrollar la matriz cinemática para una de las extremidades y generalizarla para los tres casos restantes. Cada extremidad será considerada como un manipulador.

Para identificar los vectores y matrices que corresponden a un determinado miembro, se ha agregado un subíndice como identificador del miembro, por ejemplo,  $\mathbf{R}_A$ , que representa una matriz de rotación perteneciente al miembro A, mientras que  $\mathbf{R}_C$ , representa una matriz de rotación entre las bases del miembro C.

La nomenclatura  $\mathbf{P}_{12}$ , hace referencia a un vector medido desde el punto de vista de la base local principal, a la que por facilidad de manejo le llamaremos también base cero. Por el contrario, la nomenclatura  $\mathbf{p}_{12}$ , se refiere a un vector medido desde un punto de rotación diferente del marco local principal.

### 3.1. Marcos de referencia sobre el robot

Para formar cada una de las bases necesarias para determinar el modelo cinemático del robot, es necesario partir desde la base inercial  $[\mathbf{X}_I, \mathbf{Y}_I, \mathbf{Z}_I]$ , desde la que se determina la orientación y posición

del robot en el mundo. Mediante rotaciones alrededor de los ejes principales del marco de referencia inercial, es posible formar el resto de bases necesarias.

La base local principal se encuentra separada de la base inercial solamente por un vector de traslación y una matriz de rotación que varían a lo largo del tiempo, dependiendo de la trayectoria que se desee seguir. Sin embargo, en cada instante, dicha matriz y vector son constantes, de esta manera, es posible transformar un vector expresado en la base local principal, a la base inercial, aplicando solamente una matriz de rotación. Por tal motivo, el análisis se centra en expresar los vectores a lo largo del cuerpo del robot, en términos de la base local principal, pues para algunos de los casos resulta provechoso hacerlo de este modo.

Recordando que las matrices de rotación alrededor de los ejes principales  $X$  y  $Z$  son:

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

donde  $\theta$  es la magnitud ángulo girado.

## 3.2. Matriz Cinemática

### 3.2.1. Posición

A continuación se analizará la construcción de la *matriz cinemática* ( $\mathbf{MC}_A$ ) del miembro A del robot. La matriz cinemática determina la posición y la orientación del extremo actuante con respecto a la base local principal, dados los valores de los grados de libertad del robot. Dicha matriz consta de seis componentes, los tres primeros corresponden a la posición del extremo actuante y las otras tres expresan la orientación del mismo.

Para construir los elementos que determinan la posición del extremo actuante, es necesario llevar a cabo una suma vectorial desde la base principal local hasta el extremo actuante.

$$\mathbf{MC}_{A\text{Pos}} = \mathbf{P}_{A01} + \mathbf{P}_{A12} + \mathbf{P}_{A23} + \mathbf{P}_{A34}. \quad (3.3)$$

Sin embargo, la Ec. 3.3 considera vectores medidos desde la base local principal, y solo se dispone de los vectores medidos desde los marcos locales. Por lo tanto, es necesario expresar las bases locales ubicadas en las juntas en términos de la base cero; para ello, utilizamos matrices de rotación, de esta forma, los vectores en base cero son,

$$\mathbf{P}_{A01} = \mathbf{p}_{A01}, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{P}_{A12} = \mathbf{R}_{A1}\mathbf{p}_{A12}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{P}_{A23} = \mathbf{R}_{A2}\mathbf{p}_{A23}, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{P}_{A34} = \mathbf{R}_{A3}\mathbf{p}_{A34}, \quad (3.7)$$

así, la suma vectorial es,

$$\mathbf{MC}_{APos} = \mathbf{p}_{A01} + \mathbf{R}_{A1}\mathbf{p}_{A12} + \mathbf{R}_{A2}\mathbf{p}_{A23} + \mathbf{R}_{A3}\mathbf{p}_{A34}, \quad (3.8)$$

donde  $\mathbf{R}_{A1}$ ,  $\mathbf{R}_{A2}$ ,  $\mathbf{R}_{A3}$  son las matrices de rotación que expresan el marco de referencia desde el que se han medido  $\mathbf{p}_{A12}$ ,  $\mathbf{p}_{A23}$  y  $\mathbf{p}_{A34}$ , respectivamente, con respecto a la base cero.

A continuación, se muestra la construcción de las matrices de rotación  $\mathbf{R}_{A1}$ ,  $\mathbf{R}_{A2}$ ,  $\mathbf{R}_{A3}$ . La Fig. 3.2 muestra las rotaciones necesarias de la base cero para alcanzar la orientación deseada para medir el vector  $\mathbf{p}_{A12}$ . Como es posible observar, ésta solo requiere de un giro alrededor del eje  $Z$ , cuya magnitud es  $\theta_{A1}$ , por ser este el primer GDL. Así,

$$\mathbf{R}_{A1} = \mathbf{R}_z(\theta_{A1}). \quad (3.9)$$

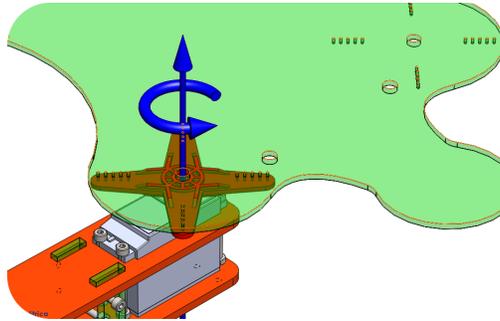


Fig. 3.2: Rotación  $R_{A1}$

La Fig. 3.3 muestra las rotaciones necesarias de la base cero para alcanzar la orientación deseada, para así poder medir el vector  $\mathbf{p}_{A23}$ . Se puede observar que la primer secuencia de pasos corresponde a las contabilizadas por  $\mathbf{R}_{A1}$ , partiendo de ese punto, es necesario llevar a cabo el giro alrededor del eje  $X$  una magnitud constante  $\alpha_{A2}$ , para lograr orientar el eje  $Z$  con el eje de la junta, tal como lo especifica la convención de Denavit-Hartenberg. Finalmente, es necesario tomar en cuenta el giro alrededor del eje  $Z$  con magnitud  $\theta_{A2}$ . Así,

$$\mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_z(\theta_{A1}) \mathbf{R}_x(\alpha_{A2}) \mathbf{R}_z(\theta_{A2}). \quad (3.10)$$

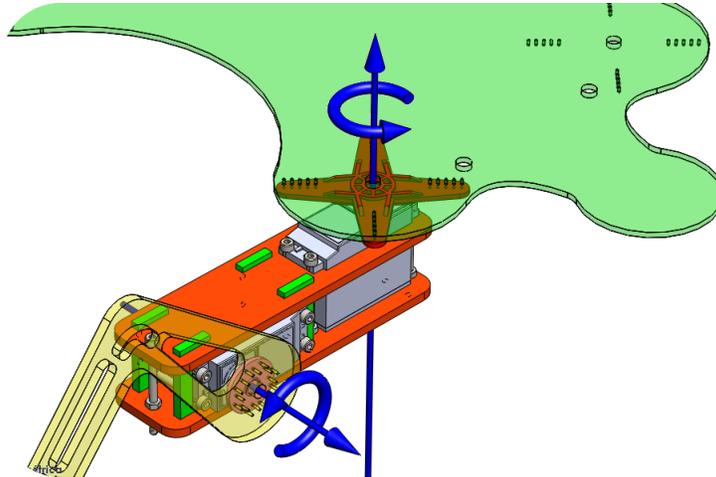


Fig. 3.3: Rotación  $R_{A2}$

Las rotaciones necesarias de la base cero para poder medir el vector  $\mathbf{p}_{A34}$ , pueden apreciarse en la Fig. 3.4, la secuencia de rotaciones es la misma seguida en las dos juntas anteriores, a dicha secuencia se le deben agregar un giro alrededor del eje  $Z$ , con valor  $\theta_{A3}$ , un giro alrededor del eje  $X$ , de magnitud constante  $\alpha_{A3}$ , y finalmente un giro alrededor del eje  $Z$  una magnitud constante  $\beta_{A4}$ , cuyo propósito es alinear las direcciones de la base local  $A_4$ , de forma congruente con el marco de referencia principal local.

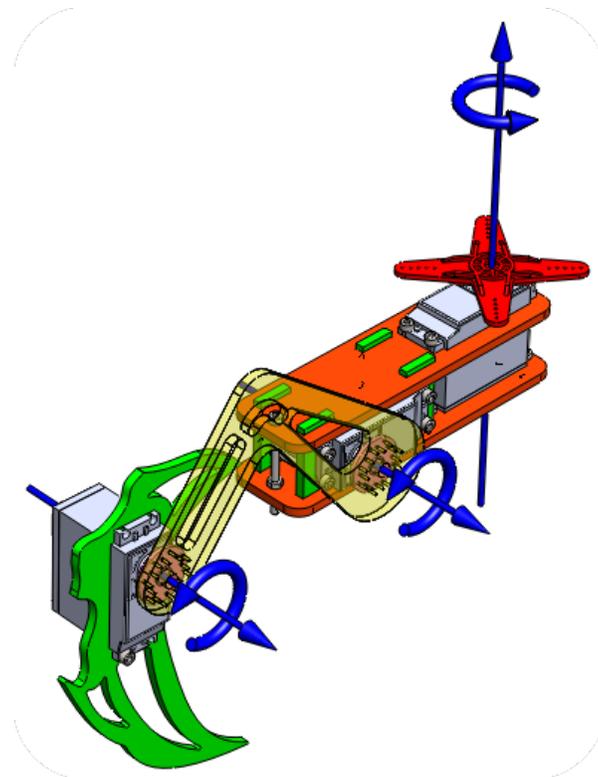


Fig. 3.4: Rotación  $R_{A3}$

Dicha matriz de rotación, se puede observar a continuación

$$\mathbf{R}_{A3} = \mathbf{R}_z(\theta_{A1}) \mathbf{R}_x(\alpha_{A2}) \mathbf{R}_z(\theta_{A2}) \mathbf{R}_z(\theta_{A3}) \mathbf{R}_x(\alpha_{A3}) \mathbf{R}_z(\beta_{A4}), \quad (3.11)$$

### 3.2.1.1. Vectores de posición

Se procede a definir los vectores existentes entre las bases previamente asignadas a cada una de las juntas. Dichos vectores se deben transformar a base inercial a fin de describir las coordenadas de las juntas que componen al robot, con referencia en el origen, pues están medidos desde el punto de vista de una base local.

$$\mathbf{p}_{A01} = [x_{A01}, y_{A01}, z_{A01}]^T,$$

$$\mathbf{p}_{A12} = [a_1, 0, 0]^T,$$

$$\mathbf{p}_{A23} = [a_2, 0, 0]^T,$$

$$\mathbf{p}_{A34} = [x_{A34}, y_{A34}, z_{A34}]^T,$$

donde  $(x_{A01}, y_{A01}, z_{A01})$ , son las coordenadas del origen de la base  $A_1$  medidos desde la base local principal, el cual se localiza coincidente con el eje Z del primer servomotor. La magnitud  $a_1$ , correspondiente a la coordenada  $i$  del vector medido desde la base  $A_2$  hasta la base  $A_1$ ,  $\mathbf{p}_{A12}$ , es la longitud del primer eslabón medido entre los ejes de los dos servomotores que lo componen. De igual forma,  $a_2$ , componente  $i$  de  $\mathbf{p}_{A23}$ , mide la magnitud del desplazamiento sobre el eje  $x$ , entre el servomotor de la segunda junta y el tercer servomotor.  $\mathbf{p}_{A34}$ , está compuesto por las coordenadas del punto del extremo actuante que se encuentra en contacto con el suelo, medidas desde el centro articulado del mismo.

### 3.2.2. Orientación

Debido a que es diferente la orientación del extremo actuante con respecto a la base cero, es necesario definir las tres últimas componentes de la matriz cinemática.

Como se puede observar, los giros que son utilizados para posicionar el extremo actuante son alrededor del eje  $z$  y del eje  $x$ , como lo indica la convención de Denavit-Hartenberg, que es el que se está utilizando. Es necesario solucionar un sistema de ecuaciones que de como resultado las tres componentes restantes de la matriz cinemática. El sistema de ecuaciones propuesto consiste en expresar todos los giros llevados a cabo desde la primer junta hasta el extremo actuante en términos con una cadena de matrices de rotación sobre  $x$  y  $z$  e igualarlos a una rotación sobre  $z$  y una rotación sobre  $x$  con ángulos con magnitud desconocida, a los que llamaremos  $\gamma$  y  $\delta$  respectivamente.

$$\mathbf{R}_{A3} = \mathbf{R}_z(\theta_{A1}) \mathbf{R}_x(\alpha_{A2}) \mathbf{R}_z(\theta_{A2}) \mathbf{R}_z(\theta_{A3}) \mathbf{R}_x(\alpha_{A3}) \mathbf{R}_z(\beta_{A4}) = \mathbf{R}_z(\gamma) \mathbf{R}_x(\phi) \quad (3.12)$$

Resolviendo la Ec. 3.12 se obtienen los valores mostrados en la Ec. 3.13, de esta manera, la orientación del extremo actuante queda definida en términos de los ángulos naturales del sistema de marcos de coordenadas utilizados.

$$\begin{bmatrix} \theta_{A2} + \theta_{A3} \\ 0 \\ \theta_{A1} + 90^\circ \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

### 3.2.3. Matriz Cinemática

La suma vectorial desde la base principal local hasta el extremo actuante, para indicar la posición, se define como:

$$\mathbf{MC}_{A\text{Pos}} = \mathbf{P}_{A01} + \mathbf{P}_{A12} + \mathbf{P}_{A23} + \mathbf{P}_{A34}. \quad (3.14)$$

una vez efectuada la suma, y sustituyendo el valor de los ángulos constantes, el resultado es expresado en la siguiente matriz,

$$\begin{bmatrix} x_{A01} + \cos(\theta_{A1}) \cdot (a_1 + a_2 \cdot \cos(\theta_{A2}) - y_{A34} \cdot \cos(\theta_{A2} + \theta_{A3}) + z_{A34} \cdot \sin(\theta_{A2} + \theta_{A3})) \\ y_{A01} + \sin(\theta_{A1}) \cdot (a_1 + a_2 \cdot \cos(\theta_{A2}) - y_{A34} \cdot \cos(\theta_{A2} + \theta_{A3}) + z_{A34} \cdot \sin(\theta_{A2} + \theta_{A3})) \\ z_{A34} \cdot \cos(\theta_{A2} + \theta_{A3}) - a_2 \cdot \sin(\theta_{A2}) + y_{A34} \cdot \sin(\theta_{A2} + \theta_{A3}) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

agregándole las tres componentes correspondientes a la orientación del extremo actuante con respecto al marco principal se tiene entonces,

$$\mathbf{K}_A = \begin{bmatrix} x_{A01} + \cos(\theta_{A1}) \cdot (a_1 + a_2 \cdot \cos(\theta_{A2}) - y_{A34} \cdot \cos(\theta_{A2} + \theta_{A3}) + z_{A34} \cdot \sin(\theta_{A2} + \theta_{A3})) \\ y_{A01} + \sin(\theta_{A1}) \cdot (a_1 + a_2 \cdot \cos(\theta_{A2}) - y_{A34} \cdot \cos(\theta_{A2} + \theta_{A3}) + z_{A34} \cdot \sin(\theta_{A2} + \theta_{A3})) \\ z_{A34} \cdot \cos(\theta_{A2} + \theta_{A3}) - a_2 \cdot \sin(\theta_{A2}) + y_{A34} \cdot \sin(\theta_{A2} + \theta_{A3}) \\ \theta_{A2} + \theta_{A3} \\ 0 \\ \theta_{A1} + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

lo que completa la *matriz cinemática*, expresando así, la posición y orientación del extremo actuante con respecto al marco principal.

A continuación se muestran las matrices cinemáticas correspondientes a las extremidades B (Ec. 3.17), C (Ec. 3.18) y D (Ec. 3.19), respectivamente, mismas que se pueden determinar siguiendo el procedimiento utilizado para la obtención de la matriz cinemática de la extremidad A, presentado anterior-

mente.

$$\mathbf{K}_B = \begin{bmatrix} x_{B01} + \cos(\theta_{B1}) \cdot (b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_{B2}) - y_{B34} \cdot \cos(\theta_{B2} + \theta_{B3}) + z_{B34} \cdot \sin(\theta_{B2} + \theta_{B3})) \\ y_{B01} + \sin(\theta_{B1}) \cdot (b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_{B2}) - y_{B34} \cdot \cos(\theta_{B2} + \theta_{B3}) + z_{B34} \cdot \sin(\theta_{B2} + \theta_{B3})) \\ z_{B34} \cdot \cos(\theta_{B2} + \theta_{B3}) - b_2 \cdot \sin(\theta_{B2}) + y_{B34} \cdot \sin(\theta_{B2} + \theta_{B3}) \\ \theta_{B2} + \theta_{B3} \\ 0 \\ \theta_{B1} + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{K}_C = \begin{bmatrix} x_{C01} + \cos(\theta_{C1}) \cdot (c_1 + c_2 \cdot \cos(\theta_{C2}) + y_{C34} \cdot \cos(\theta_{C2} + \theta_{C3}) - z_{C34} \cdot \sin(\theta_{C2} + \theta_{C3})) \\ y_{C01} + \sin(\theta_{C1}) \cdot (c_1 + c_2 \cdot \cos(\theta_{C2}) + y_{C34} \cdot \cos(\theta_{C2} + \theta_{C3}) - z_{C34} \cdot \sin(\theta_{C2} + \theta_{C3})) \\ z_{C34} \cdot \cos(\theta_{C2} + \theta_{C3}) + c_2 \cdot \sin(\theta_{C2}) + y_{C34} \cdot \sin(\theta_{C2} + \theta_{C3}) \\ \theta_{C2} + \theta_{C3} \\ 0 \\ \theta_{C1} + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} x_{D01} + \cos(\theta_{D1}) \cdot (d_1 + d_2 \cdot \cos(\theta_{D2}) + y_{D34} \cdot \cos(\theta_{D2} + \theta_{D3}) - z_{D34} \cdot \sin(\theta_{D2} + \theta_{D3})) \\ y_{D01} + \sin(\theta_{D1}) \cdot (d_1 + d_2 \cdot \cos(\theta_{D2}) + y_{D34} \cdot \cos(\theta_{D2} + \theta_{D3}) - z_{D34} \cdot \sin(\theta_{D2} + \theta_{D3})) \\ z_{D34} \cdot \cos(\theta_{D2} + \theta_{D3}) + d_2 \cdot \sin(\theta_{D2}) + y_{D34} \cdot \sin(\theta_{D2} + \theta_{D3}) \\ \theta_{D2} + \theta_{D3} \\ 0 \\ \theta_{D1} + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Los valores correspondientes a las constantes son,

$$\alpha_{A2} = \alpha_{B2} = 270^\circ, \quad (3.20) \quad \alpha_{C2} = \alpha_{D2} = 90^\circ, \quad (3.21)$$

$$\alpha_{A3} = \alpha_{B3} = 90^\circ, \quad (3.22) \quad \alpha_{C3} = \alpha_{D3} = 270^\circ, \quad (3.23)$$

$$\beta_{A4} = \beta_{B4} = 90^\circ, \quad (3.24) \quad \beta_{C4} = \beta_{D4} = 270^\circ, \quad (3.25)$$

$$a_1 = b_1 = c_1 = d_1 = 11.96cm, \quad (3.26) \quad a_2 = b_2 = c_2 = d_2 = 14cm, \quad (3.27)$$

$$x_{A01}, x_{D01} = 13.25cm, \quad (3.28) \quad x_{B01}, x_{C01} = -13.25cm, \quad (3.29)$$

$$y_{A01}, y_{B01} = -9.1cm, \quad (3.30) \quad y_{C01}, y_{D01} = 9.1cm, \quad (3.31)$$

$$z_{A01}, z_{B01}, z_{C01}, z_{D01} = 0, \quad (3.32) \quad x_{A34}, x_{B34}, x_{C34}, x_{D34} = 0, \quad (3.33)$$

$$y_{A34}, y_{B34} = 8.037cm, \quad (3.34) \quad y_{C34}, y_{D34} = -8.037cm, \quad (3.35)$$

$$z_{A34}, z_{B34}, z_{C34}, z_{D34} = -15.347cm, \quad (3.36)$$

dichos valores deben ser sustituidos en las Ec. 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19.

## CAPÍTULO 4

# DISEÑO DE TRAYECTORIAS

La dificultad que presentan los robots caminantes es la creación y optimización de su forma de andar. La gran cantidad de GDL hace difícil la creación de una forma de andar (gaits) estable y rápida.

La implementación de las formas de andar pueden ser hechas de diferentes formas:

1. Ajuste manual. Su desventaja es la gran cantidad de tiempo que requiere su implementación, a pesar de esto ofrece un resultado estable.
2. Implementación de patrones de movimiento a través de algoritmos con la ventaja de poderse optimizar para ser adaptables, estables y rápidos.

Con el fin de probar y desarrollar este tipo de algoritmos, es posible implementarlos directamente sobre el modelo físico o mediante una simulación. Una simulación nos permite visualizar una aproximación a la realidad para así poder ahorrar tiempo y recursos en el diseño e implementación de un modelo físico.

Se decidió tomar el camino de la simulación como primer paso, de ahí que se empezará desde lo general hasta llegar a lo particular con el fin de explicar paso a paso el proceso del desarrollo de las trayectorias.

El diseño de trayectorias es un proceso secuencial e iterativo. A continuación se desarrolla el proceso seguido para el diseño de la trayectoria seguido por cada uno de los miembros de forma individual.

### 4.1. Diseño de trayectorias del robot

Para la generación de las trayectorias del robot, se utilizarán puntos de control  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$  interpolados mediante splines cúbicos tridimensionales. Se utilizarán splines en vez de líneas rectas

ya que de este modo las trayectorias son suaves, permitiendo movimientos más intuitivos y evitando así giros repentinos del robot.

Los splines son curvas que unen puntos, dichas curvas pueden ser definidas en porciones, mediante el uso de polinomios. Los polinomios utilizados en los splines cúbicos son de bajo grado, lo que permite encontrar soluciones que eviten oscilaciones indeseables fuera de los puntos de control. En este caso, cada polinomio  $S_i(\mu)$  a través del que se construye el spline completo es de grado tres, esto quiere decir que es de la forma:

$$S_i(\mu) = a_i\mu^3 + b_i\mu^2 + c_i\mu + d_i, \quad (4.1)$$

De este modo,  $S_i(\mu)$ , denota un spline cúbico que va desde el punto de control  $P_i$  hasta el punto de control  $P_{i+1}$ , cuyo avance depende del parámetro  $\sigma$ , que debe moverse entre los valores  $\sigma_i$  y  $\sigma_{i+1}$  para recorrer por completo el trayecto entre los puntos mencionados. Se define entonces:

$$\mu \equiv \sigma - \sigma_i, \quad (4.2)$$

donde  $\sigma_i$  está definido como:

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \|P_{i+1} - P_i\|, \quad \sigma_0 = 0, \quad (4.3)$$

así, al sustituir se tiene,

$$S_i(\sigma) = a_i(\sigma - \sigma_i)^3 + b_i(\sigma - \sigma_i)^2 + c_i(\sigma - \sigma_i) + d_i \quad (4.4)$$

donde  $a_i, b_i, c_i, d_i \in \mathbb{R}^3$ , lo que significa que son vectores de la forma,

$$a_i = \begin{bmatrix} a_{xi} \\ a_{yi} \\ a_{zi} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_{xi} \\ b_{yi} \\ b_{zi} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

$$c_i = \begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Para obtener los valores de  $a_i, b_i, c_i, d_i$ , es necesario solucionar un sistema de ecuaciones. Dicho sistema debe constar de cuatro ecuaciones, pues son cuatro incógnitas las que se tienen. Las ecuaciones utilizadas se obtienen tal como se muestra a continuación, haciendo uso de valores conocidos:

$$S_i(\sigma_i) = P_i, \quad (4.8)$$

$$S_i(\sigma_{i+1}) = P_{i+1}, \quad (4.9)$$

$$S'_i(\sigma_i) = \mathbf{V}_i, \quad (4.10)$$

$$S'_i(\sigma_{i+1}) = \mathbf{V}_{i+1}, \quad (4.11)$$

donde  $\mathbf{V}_i$  y  $\mathbf{V}_{i+1}$  son vectores normalizados en  $\mathbb{R}^3$ , que indican la dirección correspondiente a la pendiente de  $S_i(\sigma_i)$  y  $S_i(\sigma_{i+1})$  respectivamente, al salir del punto  $P_i$  y al llegar a  $P_{i+1}$ .

La Fig. 4.1 muestra un spline cúbico, construido a partir de los puntos de control  $P_0 = \{-10, 25, 0\}$ ,  $P_1 = \{24, -60, 0\}$ ,  $P_2 = \{150, 80, 0\}$ ,  $P_3 = \{310, -350, 0\}$ ,  $P_4 = \{390, -35, 0\}$ , y con las direcciones de salida  $\mathbf{V}_0 = \frac{P_1 - P_0}{\|P_1 - P_0\|}$ ,  $\mathbf{V}_1 = \frac{P_2 - P_1}{\|P_2 - P_1\|}$ ,  $\mathbf{V}_2 = \frac{P_3 - P_2}{\|P_3 - P_2\|}$ ,  $\mathbf{V}_3 = \frac{P_4 - P_3}{\|P_4 - P_3\|}$ ,  $\mathbf{V}_4 = \{0, 0, 0\}$ , donde  $\mathbf{V}_4$  es tomada como dirección final.

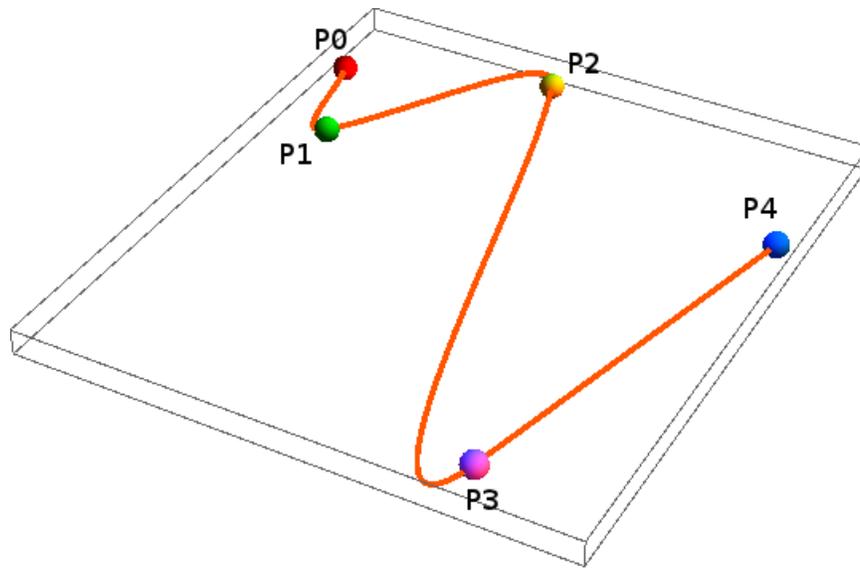


Fig. 4.1: Spline cúbico

#### 4.1.1. Base canónica de la curva

Una vez definida la trayectoria, es necesario lograr que la base local principal del robot la siga, para ello es necesario definir una base tridimensional sobre la curva. Los vectores que componen la base deben ser ortogonales. La base canónica de la curva se conforma en cada punto por el vector tangente, el normal y el binormal. Bajo este enfoque, se toma como primer vector la derivada de  $S_i(\sigma)$ , que se denomina vector tangente,

$$\mathbf{T}(\sigma) = S'_i(\sigma), \quad (4.12)$$

para cada uno de los valores de  $i$  que forman la trayectoria completa. El siguiente vector que debe ser definido es el vector binormal, que en este caso, por tratarse de tareas que se desarrollan sobre

superficies planas puede elegirse como,

$$\mathbf{B}(\sigma) = [0, 0, 1]^T. \quad (4.13)$$

El vector normal, estás definido a partir de

$$\mathbf{N}(\sigma) = \frac{\mathbf{B}(\sigma) \times \mathbf{T}(\sigma)}{\|\mathbf{B}(\sigma) \times \mathbf{T}(\sigma)\|}. \quad (4.14)$$

Con base en  $\mathbf{T}(\sigma)$ ,  $\mathbf{B}(\sigma)$  y  $\mathbf{N}(\sigma)$ , la Fig.4.2 muestra la base definida en un punto intermedio del spline que se presentó en la Fig. 4.1. El vector rojo representa  $\mathbf{T}(\sigma)$ , el vector azul a  $\mathbf{B}(\sigma)$ , mientras que el vector verde se refiere a  $\mathbf{N}(\sigma)$ .

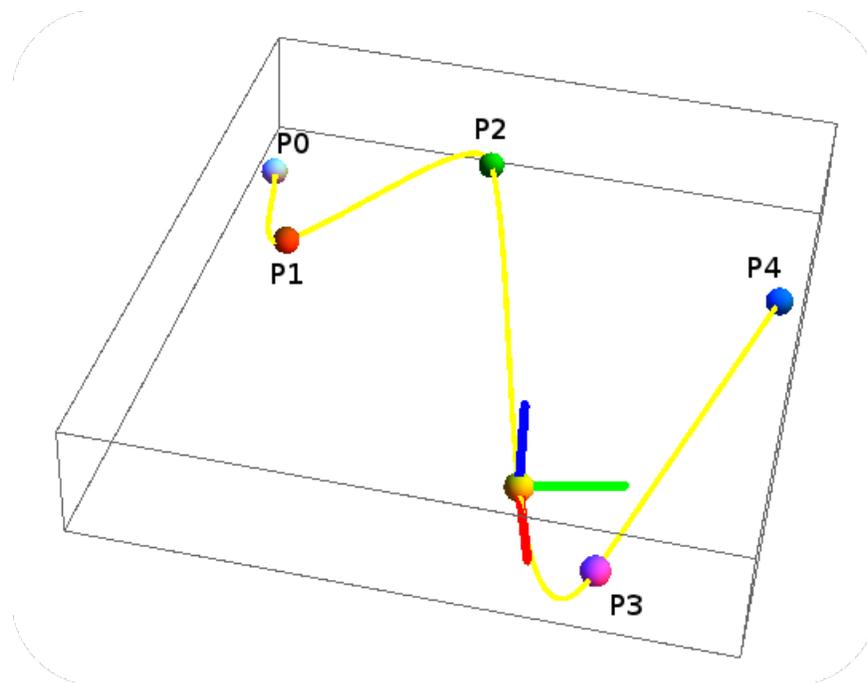


Fig. 4.2: Spline cúbico con base

Una vez se dispone de la base canónica de la curva  $\mathbf{T}(\sigma)$ ,  $\mathbf{B}(\sigma)$  y  $\mathbf{N}(\sigma)$  es posible alimentar el algoritmo de cinemática inversa (Capítulo 5) para, con la base local principal del cuerpo, seguir su desarrollo espacial.

## 4.2. Ecuaciones de la trayectoria para movimiento de miembros

Las trayectorias diseñadas deben ser suaves para evitar cambios bruscos en la posición de los actuadores. Para cumplir con dicho requerimiento se ha optado por utilizar una parábola. Una trayectoria

parabólica ofrece una manera suave de tocar los puntos que debe seguir el extremo del miembro al dar un paso. Con base en la orientación de la base local principal del cuerpo del robot, se determina que la parábola resultante queda contenida dentro del plano  $X - Z$ , como se aprecia en la Fig.4.3 ,

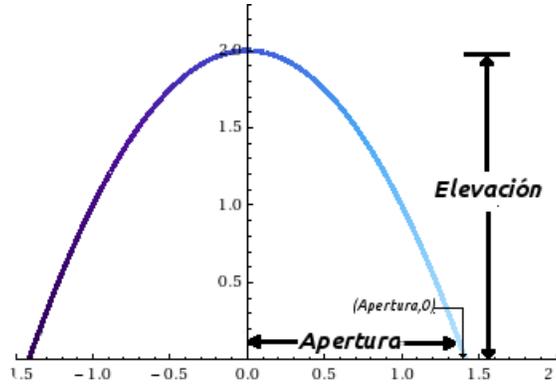


Fig. 4.3: Parábola en el plano X-Z

La ecuación general de la parábola es,

$$x^2 = -4pz, \quad (4.15)$$

sin embargo, es conveniente generar una representación de la parábola en términos de los parámetros de interés, los cuales son, la altura del paso (*Elevación*) y la longitud del mismo ( $2 \cdot \textit{Apertura}$ ). La apertura representa la mitad de la longitud. Introduciendo dichos parámetros en la ecuación, se tiene,

$$x^2 = -4p \cdot (z - \textit{Elevación}) \quad (4.16)$$

Evaluando la Ec. 4.16 en el punto (*Apertura*, 0),

$$\textit{Apertura}^2 = -4p \cdot (0 - \textit{Elevación}) \quad (4.17)$$

$$p = \frac{\textit{Apertura}^2}{4 \cdot \textit{Elevación}} \quad (4.18)$$

sustituyendo la Ec. 4.18 en la Ec. 4.16 se tiene,

$$x^2 = -4 \cdot \left( \frac{\textit{Apertura}^2}{4 \cdot \textit{Elevación}} \right) \cdot (z - \textit{Elevación}) \quad (4.19)$$

Tomando en cuenta que los algoritmos de cinemática inversa que se utilizarán para ordenar el movimiento de los actuadores requieren de una representación paramétrica de las trayectorias que se quiere seguir, es necesario generar la ecuación paramétrica de la parábola. Así, tomando como parámetro a  $t$ , podemos escribir:

$$x = \frac{t \cdot \textit{Apertura}}{\sqrt{\textit{Elevación}}} \quad (4.20)$$

$$z = -t^2 + Elevación \quad (4.21)$$

Como se observa, la parábola queda en términos de un parámetro  $t$ , dicho parámetro controlará el avance sobre ésta.

Debido a que la configuración de los miembros permite movimientos espaciales, es necesario considerar la posibilidad de que la parábola salga del plano, se ha decidido aprovechar esta característica haciendo que la trayectoria parabólica salga del plano  $X - Z$  al rotarla, un ángulo  $\rho$  alrededor del eje  $X$ . Para lograr esto, es necesario multiplicar el vector que define la parábola (Ec. 4.22) por la matriz de rotación sobre el eje  $X$  (Ec. 4.23), de esta forma:

$$\mathbf{Parábola}(t) = \begin{bmatrix} \frac{t \cdot Apertura}{\sqrt{Elevación}} \\ 0 \\ -t^2 + Elevación \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{R}_x(\rho) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\rho) & -\sin(\rho) \\ 0 & \sin(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix}, \quad (4.23)$$

dando como resultado, un vector rotado al que llamaremos  $Pblt(t)$ , que se muestra a continuación,

$$\mathbf{Pblt}(t) = \begin{bmatrix} \frac{t \cdot Apertura}{\sqrt{Elevación}} \\ (t^2 - Elevación) \cdot \sin(\rho) \\ (-t^2 + Elevación) \cdot \cos(\rho) \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

obteniendo así, las coordenadas de la parábola tridimensional fuera del plano.

El parámetro  $t$  es el que determina la evolución de la parábola de interés, sus valores se encuentran en el intervalo  $[-\sqrt{Elevación}, \sqrt{Elevación}]$ . Para controlar la evolución de la parábola en términos de un nuevo parámetro que se mueva en el intervalo  $[0, 1]$  con fines de simplificar la operación, es necesario introducirlo (Ec. 4.25), así cuando la parábola se encuentre en su punto inicial,  $t$  tendrá un valor de  $-\sqrt{Elevación}$  y  $\lambda$ , un valor de 0.

$$\mathbf{Parábola}[\lambda] = \begin{bmatrix} (\lambda \cdot Apertura) - ((1 - \lambda) \cdot Apertura) \\ \left( \left( (\sqrt{Elevación} \cdot \lambda) - (\sqrt{Elevación} \cdot (1 - \lambda)) \right)^2 - Elevación \right) \cdot \sin(\rho) \\ \left( Elevación - \left( (\sqrt{Elevación} \cdot \lambda) - (\sqrt{Elevación} \cdot (1 - \lambda)) \right)^2 \right) \cdot \cos(\rho) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Debido a que la base local principal del robot se mueve sobre un spline, y a ésta se encuentran referenciados todos los componentes del robot, es necesario relacionar el seguimiento de la trayectoria parabólica de cada uno de los miembros con el spline. Para ello, se debe poner al parámetro  $\lambda$  en

función de  $\sigma$ , parámetro que controla el avance del robot a través del spline, de este modo se obtiene:

$$\lambda = \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}}, \quad (4.26)$$

$$\text{Parábola}[\sigma] = \begin{bmatrix} \left( \left( \left( \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} \right) \cdot Apertura \right) - \left( \left( 1 - \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} \right) \cdot Apertura \right) \right) \cdot \sin(\rho) \\ \left( \left( \left( \sqrt{Elevación} \cdot \left( \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} \right) \right) - \left( \sqrt{Elevación} \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} \right) \right) \right)^2 - Elevación \right) \cdot \cos(\rho) \\ \left( Elevación - \left( \left( \sqrt{Elevación} \cdot \left( \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} \right) \right) - \left( \sqrt{Elevación} \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{real} - \sigma_{inicial}}{\sigma_{final} - \sigma_{inicial}} \right) \right) \right)^2 \right) \cdot \cos(\rho) \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

donde  $\sigma_{real}$  es el valor del parámetro para el momento presente,  $\sigma_{inicial}$  es el valor a partir del cual inicia la trayectoria parabólica para el movimiento del efector final de cada miembro y,  $\sigma_{final}$  corresponde al valor del parámetro alcanzado al momento de llegar al punto final de la trayectoria.

## 5.1. Hardware de control

El objetivo del sistema de control es determinar la posición que cada uno de los GDL del sistema requiere adoptar en cada instante del tiempo para poder llevar a cabo el seguimiento de una determinada trayectoria, además de asegurarse que dicha posición es alcanzada por cada uno de los actuadores. Por lo tanto las tareas del sistema de control podrían especificarse como:

1. Calcular la posición de cada uno de los GDL en el espacio de juntas para seguir una determinada trayectoria en el espacio operacional del robot.
2. Convertir los valores de los GDL en el espacio de juntas a los valores equivalentes alcanzables por los actuadores del sistema, es decir, valores que se encuentran en el intervalo angular de posiciones alcanzables.
3. Comunicar los valores de posición angular calculados a cada uno de los doce actuadores.
4. Garantizar el posicionamiento de los actuadores en el valor deseado mediante la implementación de un compensador.

La descripción detallada de los primeros dos incisos se presenta en las secciones 5.2 y 5.3 respectivamente. Ambos procesos se llevan a cabo en una computadora sin conexión física con el robot, de esta manera se logra aumentar la potencia de cálculo sin aumentar el peso de éste. La comunicación de los valores calculados se lleva a cabo vía inalámbrica entre la computadora y el microcontrolador abordo del robot, haciendo uso de un par de módulos inalámbricos Xbee, que funcionan con varios protocolos de comunicación entre ellos el ZigBee y el 802.15.4, ofreciendo así una solución que satisface las necesidades de bajo costo y bajo consumo de potencia para redes inalámbricas, además es fácil de usar,

requiere poca energía, ofrece la entrega confiable de datos entre los dispositivos y su pequeño tamaño ahorra espacio valioso[2].

Una vez que los datos han sido recibidos por el microcontrolador, éste se encarga de enviarlos a los actuadores correspondientes, los cuales adoptarán la posición ordenada haciendo uso del controlador PID que tienen integrado.

Un paso importante en el proceso de diseño fue la elección del microcontrolador, colocado abordo del robot, para lo cual los siguientes factores debieron ser considerados:

1. Número de puertos de entrada /salida  
¿Cuántos puertos de entrada/salida son necesarios para realizar la tarea respectiva?
2. Interfaces necesarias  
¿Qué interfaces se necesitan? Por ejemplo, ¿se requiere una modulación de ancho de pulso?
3. Necesidades de memoria  
¿Qué capacidad de memoria se necesita para realizar la tarea?
4. Cantidad de interrupciones necesarias  
¿Cuántos eventos de interrupción se requieren?

Actualmente es posible encontrar en el mercado una tarjeta de desarrollo de altas prestaciones y fácil implementación (Arduino Mega2560)[12] que trabaja con el microcontrolador ATmega 2560, el cuál cuenta con las características requeridas por el proyecto, superando incluso los requerimientos establecidos. Las características principales de dicho microcontrolador se presentan en la Tabla 5.1.

| Características                     | Valores |
|-------------------------------------|---------|
| Voltaje de funcionamiento           | 5V      |
| Voltaje de entrada (recomendado)    | 7-12V   |
| Voltaje de entrada (límite)         | 6-20V   |
| Entradas/Salidas Digitales          | 54      |
| Salidas PWM                         | 14      |
| Entradas Analógicas                 | 16      |
| Corriente CD por pin entrada/salida | 40mA    |
| Corriente CD para pin de 3.3V       | 50mA    |
| Memoria Flash                       | 256 Kb  |
| SRAM                                | 8Kb     |
| EEPROM                              | 4Kb     |
| Frecuencia de Reloj                 | 16MHz   |
| UARTs                               | 4       |
| Conexión USB                        | 1       |
| Cabezal ICSP                        | 1       |
| Botón RESET                         | 1       |
| Power Jack                          | 1       |

Tabla 5.1: Características del ATmega 2560

## 5.2. Algoritmo de cinemática inversa

El algoritmo de cinemática inversa utilizado se encarga de determinar la posición de los actuadores del sistema al seguir una determinada trayectoria. Se basa en la velocidad generada al derivar la ecuación que define la trayectoria que se desea seguir. Se trata de un proceso iterativo en el que la posición  $t + 1$  se calcula en base a la posición anterior  $t$ , así cada uno de sus pasos está definido como:

$$\mathbf{q}(t_{k+1}) = \mathbf{q}(t_k) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t_k)) v_e(t_k) \Delta t, \quad (5.1)$$

donde,

$\mathbf{q}(t_{k+1})$  es la posición de las juntas en términos de las bases locales en el tiempo  $t_{k+1}$ .

$\mathbf{q}(t_k)$  es la posición de las juntas en términos de las bases locales en el tiempo  $t_k$ .

$\Delta t$  es un diferencial de tiempo.

$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t_k))$  es el jacobiano inverso evaluado en el tiempo  $t_k$ .

$v_e(t_k)$  es la velocidad del extremo actuante en el tiempo  $t_k$ .

En la Ec. 5.1, el término  $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t_k)) v_e(t_k)$  representa la velocidad de las juntas del robot al tiempo  $t_k$ , pues debe recordarse que el jacobiano es el elemento que relaciona la velocidad de las juntas con la velocidad del extremo actuante.

A su vez,

$$v_e(t_k) = \dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}\mathbf{e}, \quad (5.2)$$

donde,

$\dot{\mathbf{x}}_d$  es la derivada de la trayectoria que se desea recorrer.

$\mathbf{K}$  es una matriz diagonal positiva que sirve como factor para acelerar la convergencia del error a cero; entre más grande sea su valor, menor es el tiempo en que el error converge.

$\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e$  es el error, calculado como la diferencia entre la posición deseada y la alcanzada por el extremo actuante.

De tal modo que con la Ec. 5.2 se logra que el extremo actuante recorra la trayectoria dada, eliminando el error en el espacio operacional.

Como se sabe, *velocidad · tiempo = distancia*, por lo que de manera análoga,  $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t_k)) v_e(t_k) \cdot \Delta t$  expresa la distancia angular recorrida por las juntas del instante  $t_k$  al instante  $t_{k+1}$ , lo que lleva a concluir que para conocer la posición de las juntas en el tiempo  $t_{k+1}$  es necesario adicionar a la posición de las juntas en el tiempo  $t_k$ , la distancia recorrida por las juntas entre el punto en el momento  $t_k$  y el punto en el momento  $t_{k+1}$ .

Sustituyendo la Ec. 5.2 en la Ec. 5.1, finalmente se obtiene:

$$\mathbf{q}(t_{k+1}) = \mathbf{q}(t_k) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t_k)) (\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}\mathbf{e}) \Delta t, \quad (5.3)$$

Debe tenerse claro que el jacobiano y la trayectoria a seguir cambiarán constantemente en función del trabajo que deben realizar las extremidades, es decir, se alternarán entre el seguimiento del spline y la descripción de un paso parabólico para posicionarse en una nueva posición de apoyo que facilite la progresión de los pasos.

### 5.3. Conversión de valores de los GDL a los rangos de movimiento de los actuadores

Los valores de los ángulos de los marcos de referencia utilizados para llevar a cabo el modelo cinemático fueron tomados en un rango completo de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , sin embargo, los servomotores con los que se está trabajando tienen la limitante física de girar solamente en un rango de  $0^\circ$  a  $170^\circ$ . Para poder hacer equivalentes dichos valores, es necesario realizar una conversión de los valores de los GDL a los

rangos de movimiento de los actuadores. Las conversiones consisten en sencillas sumas algebraicas, mostradas en las fórmulas a continuación, donde los valores asignados a  $\theta_{xi}$  representan los ángulos utilizados en el modelo cinemático y los valores asignados a  $q_{xi}$ , representan la posición adoptada por los servomotores de a cuerdo a su rango de movimiento, donde  $x = A, B, C, D \in \text{extremidades}$  e  $i = 1, 2, 3 \in \text{número de motor de cada extremidad}$ .

Para las extremidades A y B, se sigue el mismo procedimiento para el primer motor, correspondiente al hombro de la extremidad, detallado a continuación

$$\begin{aligned}\theta_{A,B1} &= 270^\circ, q_{A,B1} = 85^\circ \\ q_{A,B1} &= \theta_{A,B1} + \alpha \\ 85^\circ &= 270^\circ + (-185^\circ) \\ \therefore q_{A,B1} &= \theta_{A,B1} - 185^\circ\end{aligned}\tag{5.4}$$

para la sección del codo,

$$\begin{aligned}\theta_{A,B2} &= 0^\circ, q_{A,B2} = 85^\circ \\ q_{A,B2} &= \theta_{A,B2} + \beta \\ 85^\circ &= 0^\circ + \beta \\ \therefore q_{A,B2} &= \theta_{A,B2} + 85^\circ\end{aligned}\tag{5.5}$$

para el tercer motor del miembro,

$$\begin{aligned}\theta_{A,B3} &= 0^\circ, q_{A,B3} = 40^\circ \\ q_{A,B3} &= \theta_{A,B3} + \gamma \\ 40^\circ &= 0^\circ + \gamma \\ \therefore q_{A,B3} &= \theta_{A,B3} + 40^\circ\end{aligned}\tag{5.6}$$

Para las extremidades del lado izquierdo del robot, que son las extremidades C y D, se tiene en la parte del hombro,

$$\begin{aligned}\theta_{C,D1} &= 90^\circ, q_{C,D1} = 85^\circ \\ q_{C,D1} &= \theta_{C,D1} + \zeta \\ 85^\circ &= 90^\circ + \zeta \\ \therefore q_{C,D1} &= \theta_{C,D1} - 5^\circ\end{aligned}\tag{5.7}$$

para la sección del codo,

$$\begin{aligned}
 \theta_{C,D2} &= 0^\circ, q_{C,D2} = 85^\circ \\
 q_{C,D2} &= \theta_{C,D2} + \vartheta \\
 85^\circ &= 0^\circ + \vartheta \\
 \therefore q_{C,D2} &= \theta_{C,D2} + 85^\circ
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

para el motor correspondiente al efector final izquierdo,

$$\begin{aligned}
 \theta_{C,D3} &= 0^\circ, q_{C,D3} = 130^\circ \\
 q_{C,D3} &= \theta_{C,D3} + \varrho \\
 130^\circ &= 0^\circ + \varrho \\
 \therefore q_{C,D3} &= \theta_{C,D3} + 130^\circ,
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

esto debido a que el sentido de giro del tercer actuador de los miembros C y D por estar del lado izquierdo se hace de  $170^\circ$  a  $0^\circ$ , es decir, en sentido contrario al del lado derecho.

#### 5.4. Descripción de la secuencia de tareas para el seguimiento de trayectorias

A manera de determinar la secuencia de movimientos de cada uno de los miembros y su respectiva coordinación al momento de recorrer el spline cúbico  $S_i(\sigma)$  que denota la trayectoria a seguir por el cuerpo del robot, es necesario entonces recordar que el parámetro  $\sigma$  es el que controla el avance sobre el spline y que también en función de este, está el seguimiento de la trayectoria parabólica de los miembros.

El spline de interés tiene una longitud definida por los puntos de control  $P_i \dots P_n$ . Para poderlo recorrer es necesario dividirlo en segmentos de acuerdo a la longitud máxima que el robot puede alcanzar al dar un paso, ésta se puede obtener aplicando la ley de senos,

$$\frac{A}{\sin a} = \frac{B}{\sin b} \tag{5.10}$$

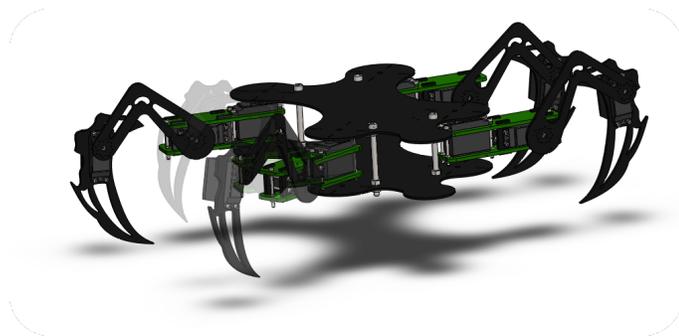
$$\frac{A}{\sin 170^\circ} = \frac{11.96cm}{\sin 5^\circ} = 23.9cm. \tag{5.11}$$

Debido a que la sección hombro-codo del robot no siempre va a estar posicionada en  $q_{x1} = 0^\circ$ , se ha tomado como alternativa considerar sólo la longitud media del paso (Ec.5.12) a fin de asegurar que los miembros completen la trayectoria parabólica asignada y lograr así que el robot pueda dar un paso.

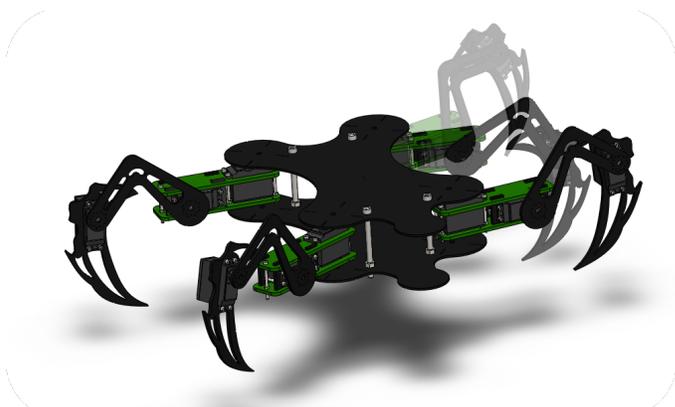
$$\text{longitud de paso medio} = \frac{\text{longitud máxima de paso}}{2} = \frac{23.9cm}{2} = 12cm \tag{5.12}$$

Obviamente, la longitud del spline no siempre va a ser exactamente divisible entre la longitud de paso medio, es por ello, que a fin de recorrer completamente la trayectoria, será necesario dar un paso final de menor longitud que la longitud de paso medio.

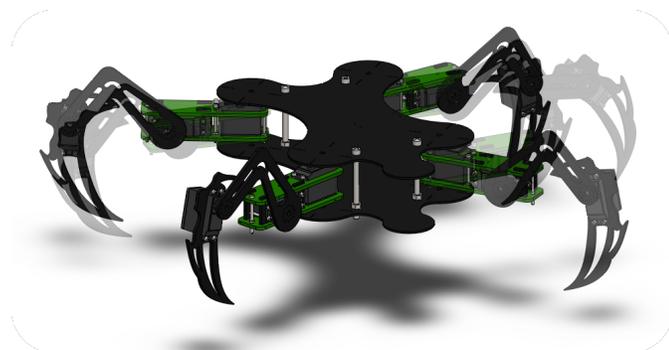
Así como ocurre con el andar de los animales cuadrúpedos para dar un paso, es necesario el movimiento de la extremidad delantera derecha (Fig. 5.1a) seguido del movimiento de la extremidad trasera izquierda (Fig. 5.1b), lo que dará impulso al cuerpo para continuar con el siguiente paso, que implica el movimiento de la extremidad delantera izquierda (Fig. 5.1c) seguido de la extremidad trasera derecha (Fig. 5.1b). El continuar del andar del animal se da gracias a la repetición sucesiva de los movimientos previamente descritos (Fig. 5.1), de manera análoga sucede con el andar del robot.



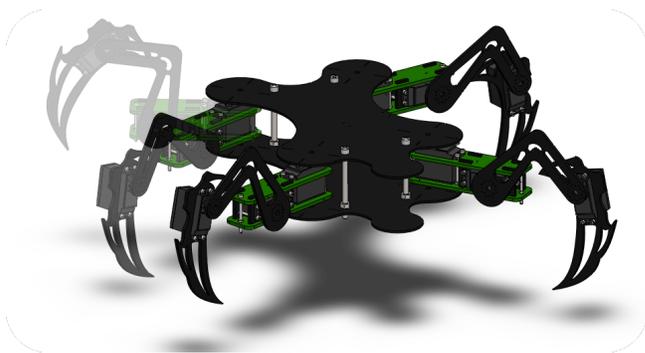
(a) Movimiento extremidad delantera derecha



(b) Movimiento extremidad trasera izquierda



(c) Movimiento extremidad delantera izquierda



(d) Movimiento extremidad trasera derecha

Fig. 5.1: Sucesión de pasos del robot

Para la ejecución de las tareas del robot, la altura existente entre el cuerpo y el suelo será constante durante todo el recorrido de cada trayectoria asignada y podrá variarse al comenzar una nueva trayectoria variando la configuración de los miembros.

## 5.5. Prueba

Se establecen puntos de control que describen el spline cúbico diseñado para ser recorrido por el robot, en este caso serán,

$$P_0 = \{-10, 25, 0\}, \quad (5.13)$$

$$P_1 = \{50, -60, 0\}, \quad (5.14)$$

$$P_2 = \{75, 60, 0\}, \quad (5.15)$$

$$P_3 = \{150, -35, 0\}, \quad (5.16)$$

$$P_4 = \{180, 90, 0\}, \quad (5.17)$$

Dichos puntos son los datos que el software de control diseñado toma como entrada y procesa haciendo uso de los algoritmos matemáticos. Una vez procesados, fueron transmitidos a través del puerto serial con la ayuda de un Xbee Explorer hacia el Xbee montado sobre el cuerpo del robot. Una vez que el microcontrolador recibe la cadena de datos, se encarga de procesarlos y enviarlos a cada uno de los actuadores para que así el robot pueda realizar la secuencia de movimientos.

Se comienza por fijar la posición canónica (Fig. 5.2) del robot, ésta es la posición que será tomada por defecto al inicio de cada trayectoria, los valores para los actuadores son,

$$A_1 = B_1 = C_1 = D_1 = 85^\circ,$$

$$A_2 = B_2 = C_2 = D_2 = 85^\circ,$$

$$A_3 = B_3 = 40^\circ,$$

$$C_3 = D_3 = 130^\circ$$

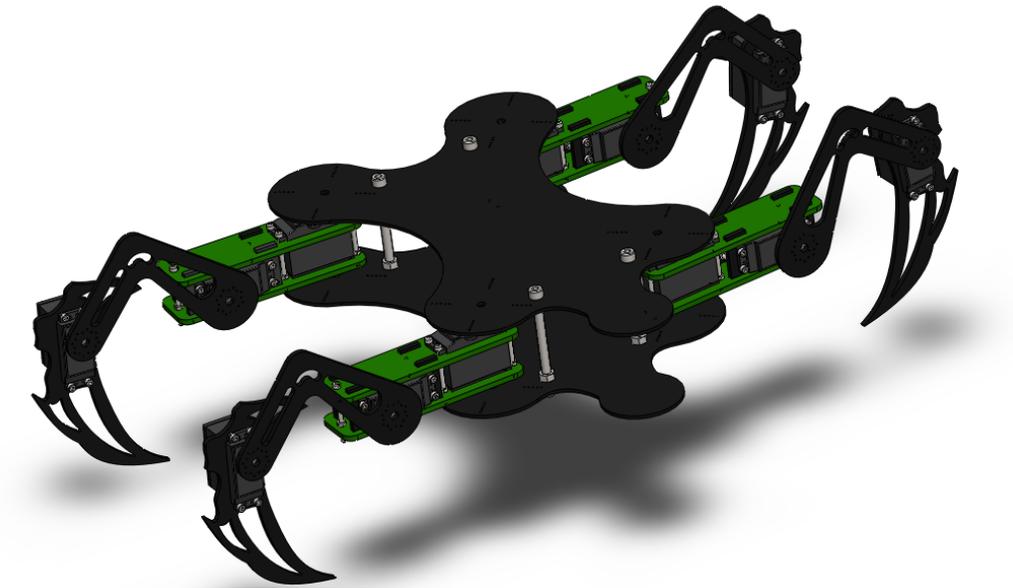


Fig. 5.2: Posición canónica

## 5.6. Resultados

Con el fin de corroborar que la cadena cinemática enviada fuera la misma que la recibida y ejecutada por el robot, se decidió hacer uso de un segundo Arduino Mega 2560 para capturar los datos que llegaban a los actuadores. Se hicieron varias pruebas en las que se comprobó que el PWM fuera correspondiente al valor de los grados de los servomotores enviados por la computadora, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.2, la Fig. 5.3 facilita su apreciación.

| Grados | Valor esperado ( $\mu s$ ) | Valor obtenido ( $\mu s$ ) |
|--------|----------------------------|----------------------------|
| 0      | 800                        | 796                        |
| 20     | 965                        | 960                        |
| 40     | 1129                       | 1124                       |
| 60     | 1294                       | 1289                       |
| 80     | 1500                       | 1453                       |
| 100    | 1623                       | 1619                       |
| 120    | 1788                       | 1778                       |
| 140    | 1953                       | 1943                       |
| 160    | 2118                       | 2107                       |
| 170    | 2200                       | 2190                       |

Tabla 5.2: Grados servo vs PWM

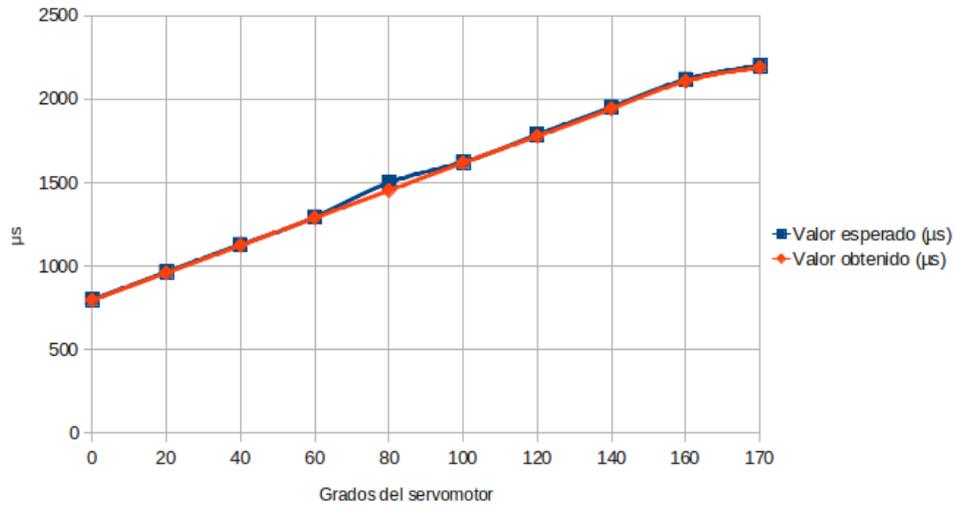


Fig. 5.3: Grados servo vs PWM

La información presentada en la Fig. 5.4 muestra el comportamiento del robot sobre el spline descrito por los puntos de control 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17. En la Fig. 5.4, la visualización del robot corresponde a los vectores amarillos que parten del origen de la base local principal, que ejemplifican el cuerpo principal del robot y a los vectores azul claro, rosa y azul fuerte que ejemplifican las tres juntas que componen cada extremidad del robot, respectivamente. Con la sucesión de las Fig. 5.4a, Fig. 5.4b, Fig. 5.4c, Fig. 5.4d, Fig. 5.4e, Fig. 5.4f, Fig. 5.4g, Fig. 5.4h, se muestra el avance del robot con respecto a la base inercial sobre la trayectoria definida.

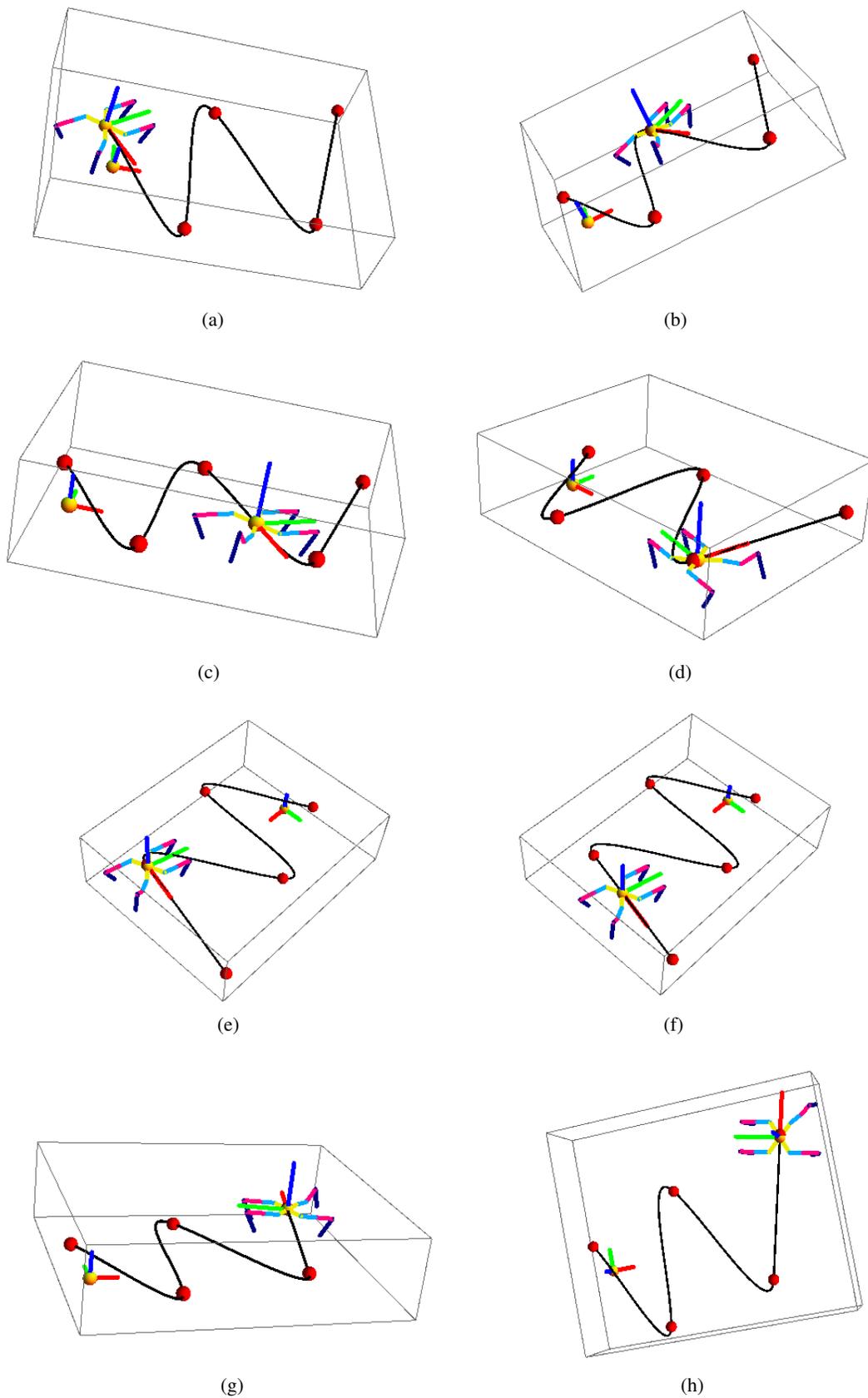


Fig. 5.4: Comportamiento del robot sobre el spline.

Las gráficas facilitan la apreciación del progreso en la generación de las formas de andar del robot y son útiles para la evaluación y el monitoreo de los algoritmos de control. Con base en la información obtenida se pueden corregir los parámetros de las gaits para optimizar la velocidad y la seguridad en la locomoción.

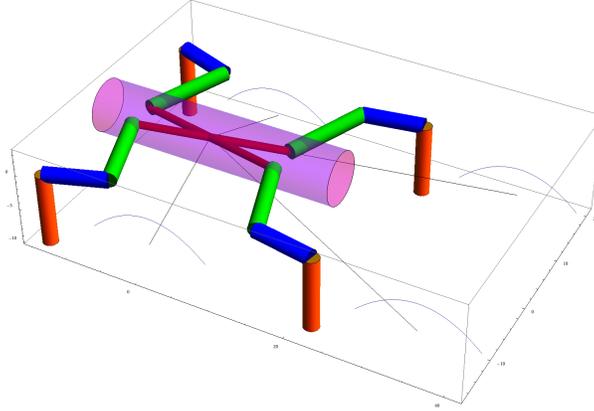


Fig. 5.5: Trayectoria de los miembros

En la Fig. 5.5 se muestran los miembros al seguir la trayectoria parabólica. Se encontró una desviación mínima entre los resultados teóricos descritos y el ajuste de los motores al alcanzar las posiciones deseadas, los factores que justifican dicha desviación son la velocidad del procesador de la computadora utilizada al solucionar y procesar las ecuaciones y la resolución de los servomotores utilizados, pues al ser estos de la gama económica no presentan la precisión esperada. Aunque a pesar de estos inconvenientes se demostró la fuerza del algoritmo de control al ser mínima la diferencia entre las respuesta deseadas y la obtenidas.

### 6.1. Conclusiones

La mejor manera de ahorrar tiempo en un mundo que corre tan a prisa y donde este se ha hecho tan escaso y necesario es la automatización de los procesos industriales y tareas de la vida cotidiana. Los sistemas robotizados evitan la presencia de trabajadores en entornos peligrosos y realizan tareas de forma automática, además de reducir costos de operación y mejorar el nivel tecnológico y la productividad de la industria de servicios en el mantenimiento de industrias, edificios y hogares, lo que hace la robótica se vuelva cada vez más importante en nuestras economías y sociedades, pues está comenzando a influenciar la forma en como nuestra sociedad hace las cosas. Dada la amplia gama de aplicaciones potenciales, se espera que a su debido tiempo el mercado de robots de servicio llegue a ser mucho más grande que el mercado de robots industriales.

Cuando se requiere un desplazamiento autónomo del robot, la decisión de diseño se centra en elegir entre un robot móvil y un caminante y esa decisión depende en gran parte de las actividades a realizar, pero sobre todo, del terreno en que deba desenvolverse. En este caso se busca que el robot fuera capaz de desenvolverse en cualquier tipo de terreno, es por ello que se decidió el desarrollo de un robot caminante pues éstos presentan mayores ventajas en cuanto a movilidad, evasión de obstáculos, suspensión, menor daño ambiental y una mayor velocidad en terrenos accidentados, además de ser intrínsecamente sistemas omnidireccionales.

La complejidad del sistema mecánico fue la elaboración de un diseño estético pero a la vez funcional del prototipo. Conocer los requerimientos permitió enfocar la atención en buscar soluciones a los problemas existentes en vez de divagar en necesidades secundarias. Gracias a esto y a la utilización de matrices de decisión, que permiten la comparación de fortalezas y debilidades de las propuestas, fue posible la filtración de conceptos hasta encontrar un diseño que cumpliera con todas las características requeridas. La solución propuesta está compuesta por un subsistema mecánico, un subsistema electró-

nico, y un subsistema de control, lo que permitió enfocar los esfuerzos de diseño de forma individual a la especialización de las funciones respectivas y a la optimización de cada una de ellas. Lo anterior permitió cumplir con el objetivo de diseñar y desarrollar una estructura mecánica capaz de soportar y permitir el desplazamiento de los subsistemas que componen al robot. Se considera que la mayor ventaja de dicha plataforma es su posibilidad para cambiar la altura de su base lo que ofrece una mayor capacidad y desempeño en la adaptación para la realización de las diversas tareas.

Los actuadores utilizados para dicho robot son de la gama económica baja, por lo que a fin de incrementar la capacidad de carga al colocar los diferentes aditamentos y herramientas sobre el robot para el desarrollo de las diversas tareas es recomendable cambiarlos por actuadores de mayor calidad que ofrezcan mejores prestaciones, de este modo se podrán evitar vibraciones que dañen la estructura mecánica del robot y la disminución de la vida útil del sistema.

El análisis cinemático del sistema permitió la determinación de las posiciones y orientaciones de las juntas y el extremo actuante, reflejadas en las matrices cinemáticas, definiendo el espacio de trabajo de cada extremidad sirviendo como base para el diseño de las trayectorias. Las trayectorias diseñadas son suaves para evitar cambios bruscos en la posición de los actuadores.

El subsistema de control diseñado cumple con los objetivos de calcular la posición de cada uno de los GDL en el espacio de juntas para seguir una determinada trayectoria en el espacio operacional del robot. Además convierte los valores de los GDL en el espacio de juntas a los valores equivalentes alcanzables por los actuadores del sistema, es decir, valores que se encuentran en el intervalo angular de posiciones alcanzables. La comunicación de los valores de posición angular calculados a cada uno de los doce actuadores se realizó con éxito. El software diseñado se ejecuta sobre una plataforma GNU/Linux, su funcionamiento se basa en el desarrollo de código particular haciendo uso de bibliotecas de funciones matemáticas para la ejecución de tareas.

### **6.2. Trabajo Futuro**

Basado en el cumplimiento de los objetivos propuestos se planea como trabajo futuro,

- La adaptación de sensores que permitan la retroalimentación al sistema de control de proximidad que permitan respuestas rápidas del robot a fin de evitar impactos.
- Diseño, desarrollo y adaptación de aditamentos y herramientas a la base de carga del robot que permitan su función multitarea.
- La elaboración de manuales que permitan una adecuada comprensión al usuario del software generado a fin de permitir y fomentar que dicho software sirva como base de ampliaciones y modificaciones a la programación de las tareas del robot.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Bolton. *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. Alfaomega, 4th edition, 2010.
- [2] Robert Faludi. *Building Wireless Sensor Networks*. O'Reilly Media, 2011.
- [3] P. Gonzalez de Santos, E. Garcia, and J. Estremera. *Quadrupedal Locomotion. An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. Springer-Verlag, Germany, 2006.
- [4] J.M. Hughes. *Real World Instrumentation with Python*. O'Reilly Media, 2011.
- [5] IFR Statistical Department. Executive summary of world robotics 2010 service robots. Technical report, International Federation of Robotics, Germany, September 2010.
- [6] iRobot iRobot iRobot. irobot roomba. <http://store.irobot.com/home/index.jsp>, May 2011.
- [7] W. Khalil and E. Dombre. *Modelling, Identification and Control of Robots*. Kogan Page Science, UK, 2004.
- [8] KUKA Roboter GmbH. Official website. <http://www.kuka.com>, May 2011.
- [9] P. J. McKerrow. *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley, 1991.
- [10] Mint Cleaner. Mint. <http://mintcleaner.com/>, May 2011.
- [11] U. Nehmzow. *Robot Behaviour: Design, Description, Analysis and Modelling*. Springer-Verlag, UK, 2009.
- [12] Joshua Noble. *Programming Interactivity: A Designer's Guide to Processing, Arduino, and openFrameworks*. O'Reilly Media, 2009.
- [13] California Institute of Technology. Jet propulsion laboratory. <http://marsrover.nasa.gov/gallery/panoramas/spirit>, [18/05/11].

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [14] A. Ramírez. Robots para invernaderos. website, May 2011. <http://www.imagenagropecuaria.com/articulos>.
- [15] Robomow. R12000. <http://robomows.com>, 2011.
- [16] Subir Kumar Saha. *Introducción a la robótica*. McGraw Hill, 2010.
- [17] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. *Robotics. Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag, UK, 2009.
- [18] Staubli. Rxpaint60 painting robot. <http://www.staubli.com/en/robotics/products/6-axis-scara-industrial-robot/specialized-robot/painting-robot/painting-robot-rx60paint/>.
- [19] K. Ulrich and S. Eppinger. *Product Design and Development*. McGraw Hill, Singapore, 4th edition, 2008.
- [20] Japan Waseda University. Biped humanoid robot group. <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp>, May 2011.
- [21] R. Vepa. *Biomimetic Robotics. Mechanisms and Control*. Cambridge University Press, UK, 2009.