

# Estrategias Bio-Inspiradas para Locomoción de Robots Ápodos



Mario Andrei Garzón Oviedo  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales  
Universidad Politécnica de Madrid

Tutor: Dr. Antonio Barrientos Cruz

Trabajo realizado para la obtención del título de  
*Máster en Automática y Robótica*

Septiembre de 2011

---

**A mi familia** A mi madre, mi padre, mis abuelos, mis tios y primos que  
me han enseñado el valor de la unidad

## Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mi madre *Leonor*, que me ha enseñado, apoyado y soportado en todos los momentos, nada de esto sería posible sin tu esfuerzo y ejemplo.

A mi tutor *Antonio*, gracias por brindarme la oportunidad, el apoyo y sobre todo la guía durante el desarrollo de este trabajo.

Al *negrito*, gracias por ser mi compañero en esta aventura que aún continúa. A *Jenny* y *Libia* que junto con *David* han sido mi familia en los últimos tres años. A mis amigos y compañeros que en el laboratorio han sabido tolerarme y hacerme sentir como en casa.

## Resumen

El principal objetivo de este trabajo es el estudio de los métodos de locomoción utilizados por diversas familias de animales ápodos, haciendo énfasis en el aspecto biomecánico y en la posibilidad de implementar dichos métodos en sistemas robóticos. Del estudio la locomoción ápoda resultan tres modos de marcha, el primero es el “Arrastre con dos puntos de Apoyo” que consiste en fijar un punto de apoyo en la parte posterior del cuerpo del animal, luego se extiende el resto del cuerpo generando un avance, para posteriormente cambiar el punto de apoyo a la parte delantera, contraer el cuerpo y completar de esta manera un ciclo de movimiento. El segundo método es el “Movimiento peristáltico”, consiste en la deformación coordinada de un cuerpo segmentado, tal que se generen ondas de compresión que van desde la parte delantera hacia la parte posterior del cuerpo y produzcan la propulsión necesaria para mover al animal. Por último la “Ondulación Lateral”, en la que cuerpo del animal toma la forma de una o varias “S” continuas y luego se inicia un movimiento en el que se dobla el cuerpo generando ondas que viajan hacia la parte trasera y hacen que este se desplace sobre la superficie. Para cada modo de marcha es posible calcular una serie de variables cinemáticas como la velocidad de avance, el ciclo útil o la eficiencia del movimiento, las cuales permiten comparar el comportamiento de los métodos de locomoción en entornos simulados o reales. El desarrollo de este trabajo permitió aplicar estos métodos de locomoción en sistemas robóticos, para lo cual se diseñaron algoritmos que generan las posiciones lineales o angulares de cada articulación durante la ejecución del movimiento, estos algoritmos se implementaron en primera instancia en un entorno de simulación, donde se comprobó que los métodos basados en el desplazamiento de señales sinusoidales brindan mejores prestaciones. Adicionalmente se diseñó e implementó una arquitectura de control jerárquica de tres niveles, que permite la implementación de estos modos de locomoción en un robot ápodo modular. Finalmente se realizó el diseño y construcción de un robot serpiente modular reconfigurable que permitió la implementación en un entorno real del modo de marcha de ondulación lateral, el cual alcanzó una velocidad de  $55\text{mm/s}$  moviéndose por un pasillo que le brinda los puntos laterales de apoyo requeridos para este modo de marcha.

---

# Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de cuadros	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Marco y objetivos del trabajo . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	1
1.3. Logros y aportaciones . . . . .	3
1.4. Estructura de la memoria . . . . .	4
<b>2. Bases Fisiológicas de la Locomoción Ápoda</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción . . . . .	5
2.2. Descripción de los métodos de locomoción ápoda . . . . .	6
2.2.1. Ofidios . . . . .	7
2.2.2. Cecílicos . . . . .	12
2.2.3. Oligoquetos . . . . .	13
2.2.4. Nematodos . . . . .	16
2.2.5. Gasterópodos . . . . .	17
2.2.6. Hirudíneos . . . . .	18
2.3. Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica . . . . .	19
2.3.1. Clasificación de los métodos de locomoción ápoda . . . . .	20
2.3.1.1. Arrastre con dos puntos de Apoyo . . . . .	21
2.3.1.2. Movimiento Peristáltico . . . . .	22
2.3.1.3. Ondulación Lateral . . . . .	24
2.3.2. Comparación de los tres métodos de locomoción Ápoda . . . . .	26

## ÍNDICE GENERAL

---

2.3.3. Posibilidades de aplicación en robótica . . . . .	27
<b>3. Locomoción Ápoda Artificial</b>	<b>29</b>
3.1. Introducción . . . . .	29
3.2. Tipos de Robots ápodos . . . . .	30
3.2.1. Robots Oruga . . . . .	30
3.2.1.1. Características . . . . .	31
3.2.1.2. Desarrollos más significativos . . . . .	31
3.2.2. Robots Gusano . . . . .	35
3.2.2.1. Características . . . . .	35
3.2.2.2. Desarrollos más significativos . . . . .	36
3.2.3. Robots Serpiente . . . . .	39
3.2.3.1. Características . . . . .	40
3.2.3.2. Desarrollos más significativos . . . . .	41
3.2.4. Robots Serpentinios . . . . .	47
3.2.4.1. Características . . . . .	49
3.2.4.2. Desarrollos más significativos . . . . .	49
3.2.5. Consideraciones Finales . . . . .	51
<b>4. Actuadores Para la Locomoción Ápoda</b>	<b>55</b>
4.1. Actuadores o Músculos Artificiales . . . . .	55
4.1.1. Clasificación de los Actuadores . . . . .	56
4.2. Actuadores tradicionales . . . . .	58
4.2.1. Motores Electromagnéticos . . . . .	58
4.2.2. Hidráulicos . . . . .	60
4.2.3. Neumáticos . . . . .	61
4.3. Actuadores Emergentes . . . . .	61
4.3.1. Músculos Neumáticos de McKibben . . . . .	61
4.3.2. Actuadores Piezoeléctricos . . . . .	62
4.3.3. Polímeros Electro-Activos . . . . .	63
4.3.3.1. Polímeros Electro-Activos Iónicos . . . . .	63
4.3.3.2. Polímeros Electro-Activos Eléctricos . . . . .	65
4.3.4. Aleaciones con memoria de forma SMA . . . . .	66
4.4. Análisis Comparativo de los distintos tipos de actuadores . . . . .	67



<b>5. Diseño de Una Arquitectura de Control Para Robots Ápodos</b>	<b>73</b>
5.1. Esquema de la arquitectura . . . . .	73
5.1.1. Control en PC . . . . .	75
5.1.2. Módulo maestro . . . . .	78
5.1.3. Módulos esclavos . . . . .	80
5.2. Aplicaciones . . . . .	81
<b>6. Generación y Evaluación de Trayectorias Para Robots Ápodos</b>	<b>83</b>
6.1. Introducción . . . . .	83
6.2. Arrastre con dos puntos de Apoyo . . . . .	84
6.2.1. Modelo Del Robot . . . . .	84
6.2.2. Generación de la Trayectoria . . . . .	85
6.2.3. Evaluación de la Trayectoria . . . . .	86
6.3. Movimiento Peristáltico . . . . .	88
6.3.1. Modelo Del Robot . . . . .	88
6.3.2. Generación de la Trayectoria . . . . .	89
6.3.3. Evaluación de la Trayectoria . . . . .	91
6.4. Movimiento Serpentino . . . . .	98
6.4.1. Modelo Del Robot . . . . .	98
6.4.2. Generación de la Trayectoria . . . . .	100
6.4.3. Evaluación de la Trayectoria . . . . .	107
6.5. Análisis y Comparación . . . . .	113
<b>7. Desarrollo de un Robot Serpiente</b>	<b>115</b>
7.1. Diseño mecánico y electrónico . . . . .	115
7.1.1. Criterios de Diseño . . . . .	115
7.1.2. Diseño del Módulo Base . . . . .	116
7.1.3. Diseño del Robot Serpiente . . . . .	118
7.2. Modelado Cinemático del Robot . . . . .	120
7.3. Modelado Dinámico del Robot . . . . .	123
7.4. Pruebas Iniciales . . . . .	126
7.5. Implementación de Trayectorias Serpentinadas en el Robot Serpiente . . . . .	127
7.6. Análisis de resultados . . . . .	131

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>8. Conclusiones</b>	<b>133</b>
<b>Referencias</b>	<b>135</b>

# Índice de figuras

2.1. Movimiento Serpentino . . . . .	8
2.2. Movimiento Concertina . . . . .	9
2.3. Movimiento de Serpenteo Lateral . . . . .	11
2.4. Movimiento Rectilíneo . . . . .	12
2.5. Gymnopsis multiplicata . . . . .	13
2.6. Comparación de movimiento Concertina . . . . .	14
2.7. Lombriz de Tierra . . . . .	15
2.8. Nematodo del Grano de Soja . . . . .	16
2.9. Locomoción de un caracol . . . . .	18
2.10. Sanguijuela . . . . .	19
2.11. Arrastre Con Dos Puntos de Apoyo . . . . .	22
2.12. Movimiento Peristáltico . . . . .	23
2.13. Movimiento de Ondulación Lateral . . . . .	25
3.1. The Inchworm Robot . . . . .	32
3.2. InchWorm Prototype . . . . .	33
3.3. Microbot . . . . .	33
3.4. Omegabot . . . . .	34
3.5. Pneumatic Inchworm-like MicroRobot . . . . .	35
3.6. Earthworm-type Walking Mechanism . . . . .	37
3.7. Peristaltic Micro In-Pipe Robot . . . . .	38
3.8. Underground Explorer Robot . . . . .	39
3.9. Artificial Earthworm . . . . .	40
3.10. Active Cord Mechanism III . . . . .	42
3.11. GMD Snake . . . . .	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.12. Robot Serpiente S5 . . . . .	44
3.13. Active Cord Mechanism R3 . . . . .	45
3.14. AMPHIBOT II . . . . .	46
3.15. CMU ModSnakes . . . . .	48
3.16. GMD Snake 2 . . . . .	50
3.17. OmniTread OT-4 . . . . .	51
4.1. Motor Electromagnético . . . . .	59
4.2. Esquema de un Actuador Hidráulico . . . . .	60
4.3. Músculo Artificial Neumático . . . . .	62
4.4. Polímero Electro-Activo Iónico . . . . .	64
4.5. Robot MERBot . . . . .	65
4.6. Actuador Lineal SMA . . . . .	67
5.1. Arquitectura de Control . . . . .	74
5.2. Mensajes Enviados por Cada Nivel . . . . .	75
5.3. Interfaz Gráfica de Usuario . . . . .	76
5.4. Tarjeta Electrónica del Módulo Maestro . . . . .	79
5.5. Tarjeta Electrónica de los Módulos Esclavos . . . . .	82
6.1. Diagrama del Robot Oruga . . . . .	85
6.2. Simulación en Webots <sup>TM</sup> del Robot Oruga . . . . .	85
6.3. Diagrama de Flujo del Algoritmo para el Arrastre con dos puntos de Apoyo . . . . .	86
6.4. Resultado Modo de Marcha: Arrastre con dos puntos de Apoyo . . . . .	87
6.5. Diagrama del Robot Gusano . . . . .	89
6.6. Posibles Estados Finales del Robot Gusano . . . . .	89
6.7. Simulación en Webots <sup>TM</sup> del Robot Gusano . . . . .	90
6.8. Modo de Marcha “Expansión Completa” del Robot Gusano . . . . .	90
6.9. Modo de Marcha “Peristáltico” del Robot Gusano . . . . .	91
6.10. Modo de Marcha “Peristáltico Simple” del Robot Gusano . . . . .	92
6.11. Resultado Modo de Marcha: “Expansión Completa” . . . . .	93
6.12. Resultado Modo de Marcha: “Peristáltico” . . . . .	94
6.13. Resultado Modo de Marcha: “Peristáltico Simple” . . . . .	95
6.14. Resultado Modo de Marcha: “Sinusoides Desplazadas” . . . . .	97

6.15. Diagrama del Robot Serpiente Planar . . . . .	98
6.16. Simulación del Robot Serpiente Planar en un Pasillo . . . . .	99
6.17. Diagrama del Robot Serpiente 3D . . . . .	99
6.18. Simulación del Robot Serpiente 3D . . . . .	100
6.19. Curvas Serpentina . . . . .	101
6.20. Trayectoria Serpentina Planar . . . . .	104
6.21. Puntos de apoyo de la curva serpentina 3D . . . . .	105
6.22. Curva Serpentina en tres dimensiones . . . . .	106
6.23. Resultado Modo de Marcha: “Serpentino Planar” en un pasillo . . . . .	108
6.24. Resultado Modo de Marcha: “Serpentino Planar” sin apoyos laterales . . . . .	110
6.25. Resultado Modo de Marcha: “Serpentino 3D” en superficie plana . . . . .	110
6.26. Comparación de Tiempo de estancia y Tiempo de Progresión de los distintos modos de marcha . . . . .	112
6.27. Comparación de Velocidad de Avance y de Progresión de los distintos modos de marcha . . . . .	113
7.1. Componentes de un Módulo del robot serpiente . . . . .	117
7.2. Modelo CAD del módulo diseñado . . . . .	117
7.3. Robot Serpiente en Configuración Planar . . . . .	118
7.4. Robot Serpiente Planar con articulaciones libres en el eje longitudinal . . . . .	119
7.5. Robot Serpiente en configuración 3D . . . . .	120
7.6. Estructura Virtual para el la Orientación y Posición del robot . . . . .	121
7.7. Esquema del robot serpiente planar y 3D . . . . .	122
7.8. Definiciones para la dinámica del robot serpiente . . . . .	125
7.9. Prueba del robot serpiente en configuración planar . . . . .	126
7.10. Soportes diseñados para mejorar el rozamiento del robot serpiente . . . . .	127
7.11. Pruebas del robot serpiente sobre diferentes superficies. . . . .	128
7.12. Trayectoria Teórica para el robot serpiente en un pasillo . . . . .	129
7.13. Posición Angular de las Articulaciones durante la trayectoria . . . . .	130
7.14. Pruebas del robot serpiente en un pasillo. . . . .	130

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

# Índice de cuadros

2.1. Costo Mecánico del Movimiento Ápodo . . . . .	26
2.2. Comparación de los Métodos de Locomoción Ápoda . . . . .	27
3.1. Resumen de Desarrollos . . . . .	52
4.1. Resumen de Actuadores . . . . .	68
4.2. Comparación de Actuadores . . . . .	71
5.1. Ejemplo de Trayectoria . . . . .	77
6.1. Resumen de Variables cinemáticas de los modos de marcha . . . . .	112

## ÍNDICE DE CUADROS

---



# 1

## Introducción

En este capítulo se realiza una introducción al trabajo realizado, se inicia demarcando el proyecto y sus objetivos, luego se menciona la motivación para la realización del mismo y finalmente se describen los logros y aportaciones del mismo.

### 1.1. Marco y objetivos del trabajo

Este trabajo ha sido desarrollado como parte de las actividades de investigación desarrolladas por el grupo “Robótica y Cibernética” del Departamento de Electrónica, Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid. En concreto dentro de la línea de investigación de Robótica Bio-Inspirada.

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de los métodos de locomoción utilizados por diversos animales ápodos, haciendo énfasis en el aspecto biomecánico y la implementación de dichos métodos en sistemas robóticos. Se pretende por tanto analizar las características intrínsecas de cada método de locomoción, así como los requisitos, ventajas e inconvenientes de su aplicación en robots bio-inspirados, adicionalmente se espera implementar dichas formas de locomoción en entornos virtuales así como en robots reales y de esta manera tener la capacidad de evaluar su desempeño y posibilidades como alternativa a otros métodos de locomoción para robots.

### 1.2. Motivación

Los robots móviles se pueden clasificar en tres grupos<sup>(1)</sup>:

## 1. INTRODUCCIÓN

---

1) Dispositivos artificiales de rotación; Son todos aquellos robots cuyo movimiento se basa en ruedas o cadenas activas, es el más comúnmente utilizado y por tanto mejor desarrollado, sin embargo, este método no puede ser abordado desde un punto de vista biomimético, ya que ningún animal multicelular es capaz de generar rotación continua en una parte de su cuerpo, puesto que sería necesario un desacople entre el eje y el elemento de rotación.

2) Robots con patas; Estos robots toman su inspiración en los animales con patas y por tanto son una amplia línea de investigación en robots bio-inspirados, su principal ventaja es que se adaptan mucho mejor a cambios en el terreno o a terrenos altamente irregulares que los robots con ruedas. La mayor desventaja es la alta complejidad de los mismos, tanto desde el aspecto constructivo como en los algoritmos de control por el alto número de actuadores involucrados y los requisitos de estabilidad que deben cumplir.

3) Robos ápodos; Son robots que no utilizan ruedas ni patas, en cambio utilizan movimientos de su propio cuerpo para generar movimiento, estos robots están inspirados en los animales ápodos y presentan varias ventajas: son mucho más estables debido a que no tienen puntos discretos de contacto con la superficie y su centro de masas está al nivel del suelo. Pueden adaptar su cuerpo a los cambios o irregularidades del terreno, además su construcción se puede realizar de manera modular sin dificultad lo cual los hace redundantes y robustos, adicionalmente tienen una sección transversal mucho menor lo cual les permite moverse por espacios reducidos.

En este trabajo se aborda este último grupo de robots, tomando adicionalmente un profundo énfasis en el aspecto biomimético de su construcción y control, esto permite tomar ventaja del conocimiento generado por miles de años de evolución natural y obtener herramientas prácticas y funcionales que pueden ser aprovechadas y trasladadas al campo de la robótica. La imitación de los mecanismos biológicos ofrece también un gran potencial para aplicaciones futuras, ya que los animales han sido capaces de adaptarse a entornos altamente complicados y diversos, se espera estudiando su comportamiento los sistemas robóticos sean igualmente capaces de aprovechar al máximos sus posibilidades y operar de manera más robusta y con alta capacidad de adaptación.

El proceso evolutivo de los animales ápodos se ha dado a través de dos vías, la primera de ellas se manifiesta en algunas familias de animales como los *Oligoquetos* que nunca han desarrollado patas ni extremidades y la segunda se observa en otros

como los *Ofidios* que han perdido sus extremidades como resultado de la adaptación a diferentes entornos; El hecho de que los animales ápodos se encuentren en toda la superficie del planeta, significa que los métodos de locomoción que estos utilizan son eficientes y pueden ser utilizados en casi cualquier entorno, desde espacios abiertos y extensos como desiertos o praderas, hasta entornos subterráneos o selvas con vegetación muy densa. Por tanto la adaptabilidad es uno de las mayores ventajas que este tipo de locomoción presenta.

Las aplicaciones para este tipo de robots son también prometedoras: La búsqueda y rescate es una de las principales tareas en las que pueden ser utilizados, ahí la capacidad de un robot ápodo, i.e. un robot serpiente, de moverse a través de pequeñas aberturas o grietas, evitar obstáculos y moverse en entornos no estructurados, brinda la posibilidad de utilizar estos robots para ayudar a encontrar supervivientes en catástrofes naturales o en edificios colapsados. Otra posibilidad de aplicación de robots ápodos se encuentra en la medicina, estos métodos de locomoción brindan la posibilidad de moverse en el interior del cuerpo humano, principalmente en el sistema digestivo, en procedimientos de endoscopia o colonoscopia.

### 1.3. Logros y aportaciones

Los logros de este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Estudio y síntesis de los métodos de locomoción utilizados por las diferentes familias de robots ápodos.
- Revisión y comparación de los actuadores que pueden ser utilizados en robots ápodos.
- Diseño e implementación de una arquitectura de control para robots ápodos.
- Diseño de algoritmos para generación de modos de marcha en diversos tipos de robots ápodos.
- Estudio comparativo de los parámetros cinemáticos de los diferentes modos de marcha de robots ápodos.
- Diseño y construcción de un robots serpiente modular reconfigurable.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

- Implementación del método de locomoción serpentino en el robot serpiente.

### 1.4. Estructura de la memoria

Este trabajo está dividido en 7 capítulos, luego de la introducción, en el capítulo 2 se inicia el trabajo con un estudio fisiológico de los métodos de locomoción utilizados por animales ápodos. En primera instancia se describen la forma de locomoción de las principales familias de animales sin patas y luego se agrupan en tres formas principales de locomoción ápoda, que forman el núcleo de este trabajo. En el capítulo 3 se discute la implementación de las tres técnicas de locomoción estudiadas en el capítulo 2 en robots móviles, se realiza una introducción al concepto de locomoción ápoda artificial, y seguidamente se describen las características de cada modo de marcha y los desarrollos más significativos de cada uno. En el capítulo 4 se describen los actuadores que pueden ser utilizados para implementar estos métodos de locomoción, divididos en actuadores tradicionales y emergentes. En cada caso se describen características, ventajas e inconvenientes de su uso en robots ápodos. En el capítulo 5 se describe una arquitectura de control diseñada como parte de este trabajo, se trata de un modelo jerárquico de tres niveles que puede ser utilizado en cualquier tipo de robots ápodos. En el capítulo 6 se trata la implementación de los modos de marcha estudiados en este trabajo sobre robots, se describe en cada caso el modelo de robot utilizado y el método para obtener las posiciones de los actuadores que generen la trayectoria deseada, al final de este capítulo se realiza una comparación de los resultados obtenidos. En el capítulo 7 se describe el diseño y construcción de un robot serpiente modular, sobre el que se implementan métodos de marcha ápodos basados en el estudio y pruebas realizadas en los capítulos anteriores. Finalmente se presentan las conclusiones y las futuras líneas de trabajo.

## 2

# Bases Fisiológicas de la Locomoción Ápoda

Este capítulo está dedicado al estudio de los mecanismos de locomoción utilizados por los animales ápodos. Se inicia con una breve introducción a la locomoción de dichos animales. Seguidamente se realiza una descripción de los métodos de locomoción utilizados por varias familias de animales ápodos en la que se pretende destacar las características de los movimientos y los entornos en los que estos se realizan. Finalmente se presenta un análisis de dichos métodos agrupándolos en tres tipos y explicando en cada caso las ventajas o dificultades que presenta la aplicación en robots móviles.

## 2.1. Introducción

Un animal ápodo es aquel que no posee extremidades de ningún tipo, bien sea porque nunca las han desarrollado, como en el caso de los invertebrados, o porque las han perdido como resultado del proceso evolutivo, como las serpientes u otros reptiles ápodos. Estos animales han desarrollado diferentes técnicas para desplazarse que varían de acuerdo a las características del entorno y del propio animal, estas técnicas de locomoción son agrupadas por el término de locomoción ápoda que puede ser definida de la siguiente manera:

Locomoción ápoda es cualquier técnica de desplazamiento, principalmente de deslizamiento o arrastre sobre la superficie, en la que las fuerzas de propulsión se logran gracias a movimientos o cambios de forma del cuerpo del animal sin la intervención de

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

ningún tipo de extremidades.

### 2.2. Descripción de los métodos de locomoción ápoda

Existen numerosos animales ápodos, vertebrados e invertebrados, algunos de ellos habitan en entornos líquidos y otros sobre tierra firme. Cada uno de ellos ha desarrollado diferentes formas de locomoción de acuerdo a sus características fisiológicas y al entorno en el que se mueven, a continuación se estudiarán algunos métodos de locomoción utilizados por animales sin patas para moverse sobre la tierra.

Para poder describir claramente y comparar los métodos de locomoción, es necesario establecer algunos conceptos comunes presentes en todos ellos. Un tipo de marcha<sup>1</sup> o “Gait” es un patrón de locomoción característico de un rango limitado de velocidades. En los seres humanos por ejemplo, los modos de andar más utilizados son caminar y correr, los cambios entre uno y otro se hacen de manera discreta al elevar o disminuir la velocidad del movimiento; Una zancada es un ciclo completo de movimiento, en el caso del ser humano desde que un pié se apoya hasta que el mismo pie se apoya nuevamente, es decir dos pasos; El largo de una zancada es la distancia efectiva del desplazamiento en una zancada; El periodo de la zancada está definido por el tiempo que se tarda en realizar una zancada y está dividido en dos partes: tiempo de progresión en el que el animal se está desplazando y tiempo de estancia en el que el animal se está apoyando en el terreno. La relación entre estos dos tiempos define el ciclo útil del modo de andar.

En el caso de los animales ápodos la carencia de apéndices o patas hace necesario que dichos utilicen su cuerpo para generar las fuerzas de propulsión necesarias para desplazarse. Debido a que las “patas” son reemplazadas por la base del cuerpo, estos animales han desarrollado diversas características en esta parte de su cuerpo que les permiten el desplazamiento sobre casi cualquier tipo de superficie. La interacción entre el cuerpo del animal y la superficie sobre la cual se mueve es de gran importancia, por tanto las partes del cuerpo que entran en contacto con el terreno deben tener características especiales que les faciliten el desplazamiento, estas características pueden ser presencia de escamas o de medios de lubricación que faciliten el deslizamiento en algunos casos, o la presencia de cilios o chupas de succión que permitan el agarre.

---

<sup>1</sup>En la bibliografía inglesa estas formas de andar son conocidas como *Gaits*

## 2.2 Descripción de los métodos de locomoción ápoda

---

### 2.2.1. Ofidios

Los ofidios o serpientes son reptiles carnívoros que se caracterizan por tener un cuerpo muy alargado y sin extremidades, este suborden de especies contiene aproximadamente 2900 especies(2), que pueden encontrarse en toda la superficie del planeta excepto por la antártica y algunas islas, su tamaño puede variar desde los 10 centímetros en la serpiente hilo de barbados(3) hasta los 8 metros en algunas anacondas (4)

El esqueleto de las serpientes está compuesto únicamente por el cráneo, la columna vertebral y las costillas, la columna vertebral está compuesta por entre 200 y 400 vertebras dependiendo de la especie, estas vertebras tienen proyecciones que permiten una sujeción fuerte de los músculos, una serpiente puede tener hasta 40 músculos por cada vertebra conectando vertebras y costillas entre sí y estas mismas con tendones y con la piel. El cuerpo de una serpiente puede ser visto como una serie de eslabones rígidos conectados entre sí formando una cadena, con elementos elásticos operando entre los eslabones adyacentes.

Las serpientes son cuerpos cilíndricos alargados con alta flexibilidad y son capaces de generar fuerza de propulsión mediante cambios coordinados en la forma de su cuerpo, a diferencia de los animales con patas que tienen formas de andar “continuas”, las serpientes presentan formas de andar “discretas”, es decir que presentan cambios abruptos al pasar de una forma a otra. El desarrollo de estos patrones diferentes permite a las serpientes adaptarse a casi cualquier tipo de entorno y además moverse por terrenos muy variados. Se han descrito cuatro formas principales de movimiento terrestre: Movimiento Serpentino, Movimiento Concertina, Serpenteo Lateral y Movimiento Rectilíneo (5), a continuación se describe cada uno de estos métodos

**Movimiento Serpentino**<sup>1</sup> Es la forma de locomoción más común en las serpientes, generalmente utilizado en terrenos irregulares o variables. En este movimiento el cuerpo del animal se dobla lateralmente tomando forma de curvas sinusoidales que se propagan desde la cabeza hacia la cola, todos los segmentos del cuerpo inician y detienen el movimiento al mismo tiempo y siguen la trayectoria marcada por la cabeza y el cuello generando una apariencia similar a una corriente de agua. El movimiento serpentino implica una progresión continua, es decir que

---

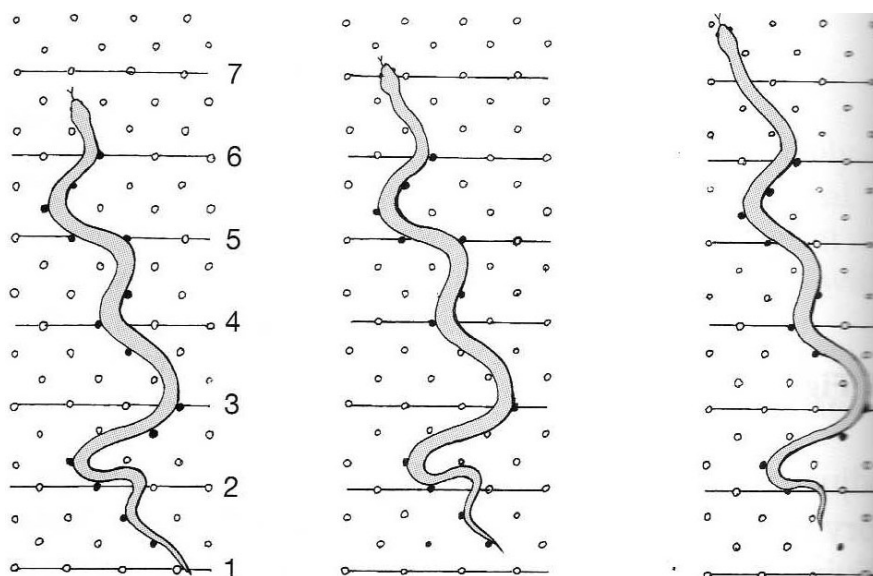
<sup>1</sup>Algunos biólogos se refieren a este movimiento como ondulación lateral o “*Lateral Ondulation*” ya que es la adaptación de las serpientes a la ondulación lateral realizada por otros vertebrados ápodos

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

ninguna parte del cuerpo está estacionaria mientras la serpiente se mueve, el peso del animal es transportado a través de la superficie ventral que está en contacto constante y deslizándose sobre la superficie(6).

Este tipo de movimiento es estrictamente dependiente de la presencia de protuberancias o irregularidades del suelo que sean suficientemente altas de manera que permitan al animal apoyarse lateralmente, estos puntos de apoyo deben encontrarse a ambos lados del eje de avance permitiendo que se generen fuerzas normales a este en ambos sentidos que se contrarresten entre sí y permitan el desplazamiento hacia adelante sobre el eje de simetría, La fig. 2.1 muestra una serie de fotografías de una serpiente realizando un movimiento serpentino sobre una superficie plana con varios puntos de apoyo cilíndricos.



**Figura 2.1: Movimiento Serpentino** - Caso típico de movimiento serpentino, los puntos sombreados representan los puntos de apoyo lateral utilizados en cada instante(7)

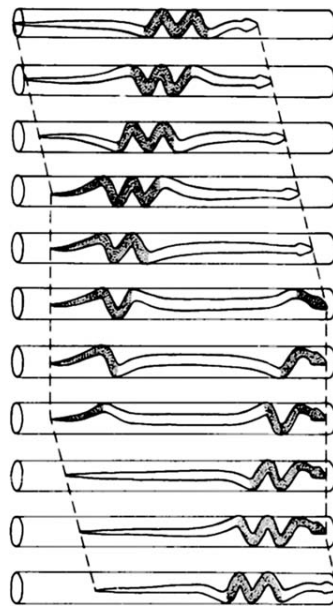
La velocidad de la progresión de una serpiente utilizando este método de movimiento depende de la velocidad a la que el animal se mueve sobre su propio eje de simetría, es decir depende de la longitud de onda más que en la velocidad de la misma, para una progresión más rápida el cuerpo de la serpiente debe tomar forma de onda con baja amplitud y alta longitud de onda, esto quiere decir que el ángulo entre los segmentos adyacentes del cuerpo deben ser pequeños. Esto generará



## 2.2 Descripción de los métodos de locomoción ápoda

sin embargo fuerzas de propulsión menores y por tanto requiere una densidad de puntos de apoyo más alta, así como un mayor esfuerzo muscular. Otro factor que puede reducir la velocidad es la fricción entre la superficie ventral de la serpiente y el terreno, al oponerse al sentido del movimiento las fuerzas de fricción ralentizan el movimiento y requieren mayor consumo energético, para reducir el coeficiente de fricción las serpientes tienen escamas sobrepuestas en la parte ventral de su cuerpo.

**Movimiento Concertina** Este movimiento es característico en serpientes u otros animales ápodos moviéndose en canales con forma recta o circular o en espacios muy estrechos dónde no es posible realizar ondulaciones laterales, una porción del cuerpo se dobla alternadamente entrando en contacto con las paredes del túnel o canal, de manera que se genera un punto de apoyo estático en el cual otras partes del cuerpo ejercen fuerzas de empuje o arrastre, en la fig. 2.2 se observa una secuencia de este movimiento.



**Figura 2.2: Movimiento Concertina** - Posiciones de la serpiente durante el movimiento concertina, las zonas sombreadas muestran los puntos de apoyo(6)

La mayor ventaja del movimiento concertina es que no implica pérdidas debido a deslizamientos y no requiere puntos de apoyo laterales ni otras configuraciones de la superficie, incluso es posible que un solo punto de apoyo soporte todo el peso

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

del animal. Una variación del movimiento concentrina es utilizada por algunas serpientes para escalar árboles, una porción del cuerpo se sujeta a una rama del árbol enrollándose en la misma, el resto realiza un movimiento serpentino hasta llegar a un nuevo punto de apoyo.

Debido a que una parte del cuerpo siempre está quieta, es necesario que constantemente se estén generando fuerzas de aceleración y desaceleración de la masa del animal, consecuentemente el momento de las partes en movimiento se pierde cada vez que se detienen, haciendo que esta secuencia de movimiento tenga una eficiencia pobre y requiera un mayor consumo energético(8).

**Serpenteo Lateral** <sup>1</sup> El serpenteo lateral es el tipo de movimiento menos dependiente del terreno sobre el cual se realiza, y por tanto es utilizado por algunas serpientes en el desierto, o en superficies fangosas o muy lisas. Un ciclo simple del movimiento se inicia levantando la cabeza del animal y realizando luego un movimiento en forma de arco que le permita desplazarse hasta un punto adelante en sentido del avance, una vez apoyada la cabeza y el cuello, el resto del cuerpo realiza un movimiento similar levantándose de su posición y desplazándose hacia adelante, al llegar al nuevo punto de apoyo la cabeza es lanzada nuevamente hacia adelante, de manera que hay una onda continua de contracción muscular que permite desplazarse a una velocidad elevada. La fig. 2.3 muestra un ciclo de este movimiento, las zonas sombreadas representan los puntos de apoyo en cada momento, se observa también que la serpiente toma varios puntos de apoyo en un solo ciclo lo que permite una aceleración sin necesidad de puntos de apoyo que sobresalgan de la superficie.

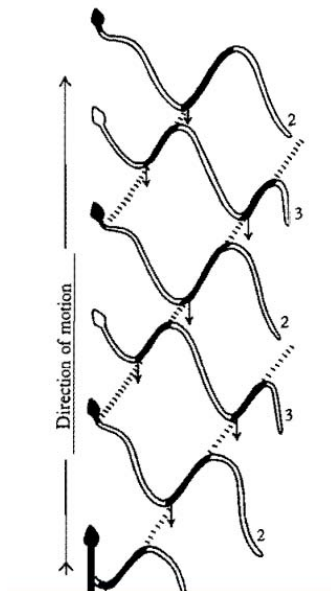
Una serpiente realizando serpenteo lateral dejará en la superficie una serie de marcas en forma de líneas rectas más o menos paralelas inclinadas en un ángulo establecido por el sentido de movimiento de la cabeza del animal. Estas marcas representan las partes de la superficie que han servido de apoyo al movimiento, la longitud, separación y forma exacta varía dependiendo de la especie que se estudie, de la superficie sobre la que se esté desplazando o otros factores como el tamaño del animal, o la temperatura externa.

---

<sup>1</sup>En la literatura inglesa se conoce como *Sidewinding*

## 2.2 Descripción de los métodos de locomoción ápoda

---



**Figura 2.3: Movimiento de Serpenteo Lateral** - Secuencia de un movimiento de Serpenteo Lateral, las zonas sombreadas muestran los puntos de apoyo(9)

El serpenteo lateral es un método eficiente de locomoción ya que permite un desplazamiento veloz e independiente de la superficie, al levantar parte del cuerpo durante el movimiento se reducen las pérdidas por fricción y permite además conservar una parte de momento por tratarse de un movimiento continuo, requiere sin embargo un control más elevado del cuerpo ya que el tronco de la serpiente es doblado en más de un plano y requiere una respuesta muscular a las variaciones en las coeficientes de fricción del terreno.

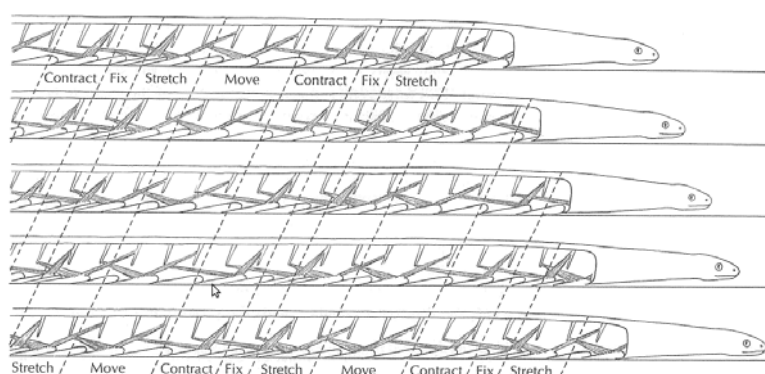
Este tipo de movimiento es considerado por algunos biólogos como una derivación del movimiento serpentino(9), ya que al igual que en este, el movimiento es continuo en todo el cuerpo del animal y está basado en la transmisión de ondas sinusoidales hacia la parte posterior del cuerpo. Otros en cambio lo consideran un caso especial de movimiento concentrina(6) ya que en todo momento al menos dos partes del cuerpo están en contacto estático con el terreno mientras el resto del cuerpo se desplaza, además no requiere puntos de apoyo externos.

**Movimiento Rectilíneo** El movimiento rectilíneo es un método de locomoción lento normalmente utilizado por grandes serpientes para aproximarse a su presa, o

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

cuando estas se encuentran en una superficie muy resbaladiza. Este movimiento es el único en el que el cuerpo de la serpiente no necesita doblarse lateralmente(10), durante este movimiento la cola de la serpiente se mueve a una velocidad prácticamente constante, en contraste, la parte central del cuerpo se mueve por tirones, es decir, una porción del tronco acelera hasta una velocidad mayor a la del movimiento de la serpiente y luego desacelera hasta detenerse completamente, cuando dicha parte acelera, también se eleva ligeramente de la superficie y al detenerse vuelve a ponerse en contacto con la tierra, la distancia entre dos puntos del cuerpo cercanos varía de manera rítmica generando de esta forma que ondas de contracción y elongación longitudinal se mueven hacia la parte posterior del cuerpo. La fig. 2.4 muestra un detalle de este patrón de movimiento.



**Figura 2.4: Movimiento Rectilíneo** - Secuencia de un movimiento de Rectilíneo, se muestra una de cada diez vertebras, detallando los cambios en los segmentos del cuerpo.(6)

### 2.2.2. Cecílicos

Además de los ofidios, existen otros animales vertebrados que carecen de patas o apéndices, entre ellos encontramos a los gimnofiones o cecílicos, que son anfibios alargados y cilíndricos similares a las lombrices de tierra, están adaptados para vivir bajo tierra, su tamaño puede variar desde los 8 centímetros hasta los 1.5 metros dependiendo de la especie, su piel es lisa y usualmente oscura. Los cecílicos habitan principalmente en regiones húmedas tropicales principalmente el sudeste de Asia, centro y sur América.

Los cecílicos utilizan tres métodos de locomoción para moverse bajo la tierra, ondulación lateral, y concertina y concertina interna(12). La ondulación lateral es un movimiento equivalente al movimiento serpentino descrito anteriormente, en el que una

## 2.2 Descripción de los métodos de locomoción ápoda

---



**Figura 2.5:** *Gymnopsis multiplicata* - Especie de cecílido que habita en costa rica(11)

onda de movimiento ondulatorio se mueve hacia la parte posterior del cuerpo utilizando puntos de apoyo externos para generar fuerzas en la dirección de progreso. El movimiento concertina es también equivalente al descrito para los ofidios, se utilizan puntos de contacto estático para apoyar una parte del cuerpo y poder impulsar o tirar del resto.

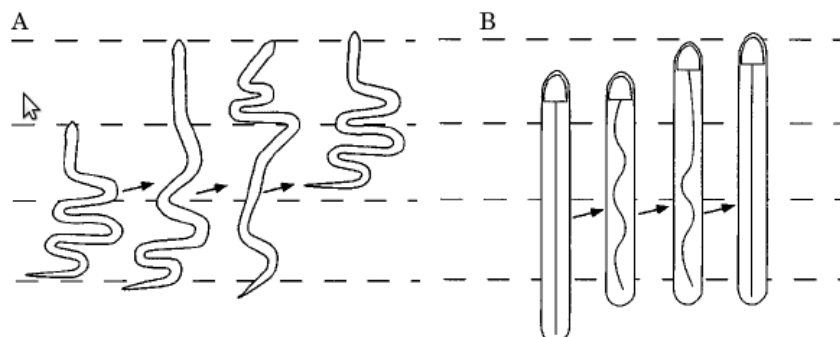
El movimiento de concertina interna también depende de la fricción estática, pero en este caso el cuerpo permanece completamente extendido y en contacto estático con el entorno, mientras la columna vertebral se dobla dentro del cuerpo generando fuerzas de tensión que hacen que el cuerpo se mueva hacia adelante, este tipo de movimiento requiere cierta independencia entre el movimiento de la piel y de la columna vertebral. La fig. 2.6 muestra una comparación entre el movimiento concertina interno y utilizando todo el cuerpo. Estudios muestran que los cecílidos utilizan esta técnica de movimiento para moverse por túneles muy estrechos, o para enterrarse en el suelo.(12)

### 2.2.3. Oligoquetos

Los oligoquetos son una subclase del filo de los anélidos compuesto por más de 3000 especies, que pueden ser encontrados en diversos hábitats terrestres y acuáticos,

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---



**Figura 2.6: Comparación de movimiento Concertina - Concertina Normal (A) Concertina Interna (B),** Se muestran los movimientos de una serpiente en una superficie plana y un cecílido en un túnel, la forma de la columna se superpone en la imagen del cecílido (13)

su tamaño puede variar, dependiendo de la especie, desde menos de un centímetro hasta más de un metro. Son gusanos completamente segmentados, con varias cavidades rellenas de fluido llamadas *celomas* que son utilizadas para formar un hidro esqueleto. Uno de los principales miembros de esta subclase es la lombriz de tierra común, debido a que sus características y métodos de locomoción han sido objeto de múltiples estudios, este apartado se centrará en los métodos de locomoción de dicho animal.

Cada segmento del cuerpo de la lombriz esta rodeado por dos grupos de músculos: circulares y longitudinales. Las dos capas de músculos son antagónicos entre sí, esto es, cuando los músculos longitudinales se contraen los circulares se relajan por tanto el segmento aumenta su diámetro y disminuye su longitud, de la misma manera cuando los músculos circulares se contraen los longitudinales se relajan haciendo que el segmento incremente su longitud pero disminuya su diámetro. Esta compensación es una consecuencia de que el volumen de cada segmento se mantiene constante en todo momento. La lombriz de tierra puede estirar longitudinalmente cada uno de sus segmentos aproximadamente 60 %, y su contracción circular puede alcanzar el 25 %, estas proporciones se mantienen con pocas variaciones independientemente del tamaño de la lombriz.(14)

**Movimiento Peristáltico** La lombrices se mueven mediante cambios coordinados en la forma de sus segmentos, estirándolos y comprimiéndolos uno tras de otro de manera que ondas de compresión y extensión viajan hacia la parte posterior del cuerpo. Cada segmento permanece quieto mientras está comprimido y se mue-

## 2.2 Descripción de los métodos de locomoción ápoda

---



**Figura 2.7: Lombriz de Tierra - Lumbricus terrestris**, La lombriz de tierra común

ve hacia adelante cuando se extiende(15). Mientras la lombriz está en posición de descanso, sus músculos longitudinales y circulares están parcialmente relajados, a partir de esta posición el movimiento peristáltico se genera siguiendo esta secuencia:

1. Contracción de los músculos circulares de los segmentos anteriores.
2. La contracción de músculos circulares se propaga hacia los segmentos posteriores.
3. Cuando la onda de contracciones de músculos circulares pasa la mitad del cuerpo, los músculos circulares de la parte anterior se relajan.
4. Contracción de los músculos longitudinales de los segmentos anteriores.
5. La contracción de los músculos longitudinales se propaga hacia las secciones posteriores.
6. Cuando se contraen los músculos longitudinales de los segmentos posteriores, los músculos circulares de las secciones anteriores se contraen nuevamente haciendo que estas secciones se muevan hacia adelante.

Debido a que el movimiento se realiza a una velocidad baja, aproximadamente 0.04 veces su tamaño por segundo(14), las fuerzas inerciales no son relevantes.

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

Las fuerzas de fricción en cambio juegan un papel muy importante, ya que los segmentos contraídos del cuerpo deben generar la fricción estática suficiente para evitar que los mismos se deslicen hacia atrás, esta sujeción se logra gracias a la presencia de pequeñas cerdas que salen de cada segmento cuando este se comprime longitudinalmente, cuando se mueven sobre superficies duras, las lombrices utilizan mucosa para adherirse en lugar de los cilios.

### 2.2.4. Nematodos

Los nematodos, también conocidos como gusanos redondos, son gusanos cilíndricos, alargados, no segmentados. Algunas especies son parásitas mientras que otras son de vida libre. Su cuerpo está caracterizado por poseer dos tubos cilíndricos concéntricos separados por un espacio relleno de fluido llamado el pseudoceloma, que actúa como hidro esqueleto y les permite mantener la forma cilíndrica. Su tamaño puede variar desde 0.3 milímetros hasta 8 metros de acuerdo a la especie.



**Figura 2.8: Nematodo del Grano de Soja** - Especie de nematodo (*Heterodera glycines*) parásito de plantas, ampliación de 1000X (16)

Los gusanos nematodos se mueven de manera similar a las serpientes, doblándose para crear ondas de movimiento que se pasan hacia la parte posterior de su cuerpo, pero a diferencia de estas, el cuerpo se dobla de manera dorso-ventral y no transversal es decir, el animal se pone de lado y dobla su vientre para realizar el movimiento ondulatorio. Al igual que en el movimiento serpentino, la cabeza se mueve formando



## 2.2 Descripción de los métodos de locomoción ápoda

---

una onda sinusoidal y el resto del cuerpo sigue la trayectoria marcada. La superficie sobre la que se realiza el desplazamiento es de gran relevancia, cuando se mueven por una superficie sólida, las partículas del suelo sirven como apoyos laterales para lograr la progresión, al moverse sobre superficies gelatinosas, la viscosidad de las mismas les permite moverse sin mayores variaciones en el patrón de movimiento. Si se encuentran en líquidos deben utilizar otros métodos para poder moverse.

### 2.2.5. Gasterópodos

Los gasterópodos son la clase más extensa y mejor conocida de los moluscos con más de 75000 especies entre los que se destacan los caracoles y las babosas, habitan en casi todos los medios acuáticos y terrestres, la mayoría de los gasterópodos tienen una concha en forma de espiral donde el cuerpo puede introducirse, aunque algunos grupos la han perdido o reducido su tamaño.

Los moluscos gasterópodos se arrastran en un pie muscular a velocidades muy bajas, los caracoles se mueven a aproximadamente 205mm/s.(15). Si se observa a un gasterópodo desde abajo mientras se mueve por una superficie transparente, se pueden ver como partes del pie se contraen y relajan variando su posición respecto al cuerpo del animal y generando ondas de contracción y relajación muscular que se desplazan a lo largo del pie. Este movimiento tiene el mismo principio que el del movimiento peristáltico descrito en la sección 2.2.3, aunque la dirección de movimiento de estas ondas puede variar dependiendo de la especie, si las ondas se mueven hacia atrás las partes contraídas permanecen estáticas y las que se relajan se mueven hacia adelante, por el contrario si las ondas se mueven hacia adelante, las partes relajadas permanecen estáticas mientras que las que se contraen avanzan(17). La velocidad del desplazamiento depende tanto de la longitud del paso como de la frecuencia a la que son generadas las ondas de movimiento. La fig. 2.9 muestra las ondas de contracción en el pie de un caracol mientras se mueve por una superficie de vidrio.

La locomoción de los gasterópodos en superficies duras es posible gracias a una capa de mucosa muy fina, generalmente del orden de décimas de micrómetros, que es generada por los mismos. Las características dinámicas y reológicas de este fluido junto con los movimientos de los diferentes músculos del pie del animal, hacen posible el desplazamiento sin que el pie se despegue de la superficie(19).

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---



**Figura 2.9: Locomoción de un caracol** - Movimiento de un caracol sobre una superficie transparente, se observan las contracciones generadas por las ondas en el pie del animal(18)

La locomoción de los gasterópodos es lenta y muy costosa en términos de energía, sin embargo tiene la ventaja de que el animal está adherido al sustrato lo que le permite mantenerse fuertemente sujeto a una superficie o escalar por superficies sin importar su inclinación, logrando incluso escalar por superficies completamente verticales o incluso en posición horizontal invertida.

### 2.2.6. Hirudíneos

Los hirudíneos son una subclase de los anélidos conocidos comúnmente como sanguijuelas, se caracterizan por tener una copa de succión en cada extremo de su cuerpo, que está compuesto por 34 segmentos similares a los de la lombriz de tierra. Pueden encontrarse tanto en tierra como en agua en ambientes cálidos y húmedos. Se alimentan por lo general de sangre o de carne en descomposición, de igual manera que con los oligoquetos esta descripción se basará en la sanguijuela común ya que ha sido la más ampliamente estudiada por biólogos(20).

La locomoción terrestre de las sanguijuelas consiste en alternar cambios en la longitud del cuerpo del animal, para lograrlo utiliza la misma técnica que la lombriz de tierra, es decir el movimiento se inicia comprimiendo los músculos circulares, para estirar longitudinalmente los segmentos del cuerpo, y avanzar apoyándose en la parte posterior del cuerpo, luego contrae los músculos longitudinales de sus segmentos lo que permite a la parte trasera del cuerpo avanzar tomando un punto de apoyo en la parte anterior

### 2.3 Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica

---

del cuerpo. La diferencia con la lombriz de tierra consiste en que los puntos de apoyo se logran gracias a la fijación de sus copas de succión no a los cilios de otros segmentos comprimidos, adicionalmente cuando está realizando la progresión la sanguijuela eleva ligeramente las partes de su cuerpo evitando de esta manera el rozamiento.



**Figura 2.10: Sanguijuela** - Se muestra una sanguijuela moviéndose en un recipiente de vidrio

Este tipo de movimiento exige que la sanguijuela se esté adaptando constantemente a posibles cambios en el terreno sobre el que se está moviendo, ya que en cada paso debe buscar un nuevo punto para sujetarse a él, además de evitar los obstáculos que encuentre, cuando se mueven por terrenos que no son uniformes, deben palpar en busca de un sitio apropiado para poner su copa de succión lo cual interrumpe en ritmo del movimiento. Cuando el terreno es uniforme las sanguijuelas pueden moverse de manera más uniforme con pasos que pueden durar entre 2 y 10 segundos(21).

### 2.3. Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica

Tras examinar las diferentes familias de animales ápodos y sus modos de marcha, en esta sección se agrupan dichos métodos en tres categorías y se realiza un análisis cinemático y de la posible aplicación a robots móviles de cada modo de marcha. Para facilitar dicho análisis es útil establecer algunas características generales. En primer lugar merece la pena recalcar las tres variables independientes para el análisis cinemático de cada forma de movimiento: el largo de la zancada, el tiempo de estancia y el tiempo de progresión. A partir de estos parámetros es posible encontrar las demás variables cinemáticas como la velocidad o el ciclo útil.

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

También es útil recordar que el trabajo que un animal ápodo tiene que hacer para moverse tiene dos componentes importantes, uno de ellos es el necesario para superar la fricción con el terreno y el otro es el trabajo inercial que deben hacer para iniciar y detener el movimiento de todo el cuerpo o una parte del mismo, en términos generales, a mayor velocidad del movimiento menor será el efecto de la fricción pero mayor el necesario para romper la inercia, y de manera análoga al tener un movimiento lento la fricción cobra un papel mucho más relevante que el de la inercia.

Con el objetivo de aprovechar al máximo la energía consumida durante la locomoción, los animales ápodos han desarrollado diversas técnicas para aumentar la eficiencia del movimiento, entendida como el porcentaje de progreso real medido contra el esfuerzo total realizado. Para lograr esto pueden evitar retrocesos innecesarios, aumentar el ciclo útil de movimiento, alargar la zancada o aumentar la frecuencia de la misma. Esto ha resultado en la generación de varias formas de locomoción que a continuación serán clasificadas.

Un elemento que presenta una alta complejidad y por tanto un importante reto a la hora de implementar locomoción bio-inspirada en mecanismos artificiales es el componente elástico presente en los músculos y tendones de los elementos, estos elementos permiten almacenar energía durante una fase del movimiento y liberarla luego para generar un movimiento más eficiente en términos de consumo energía. Los robots ápodos deben buscar un punto de equilibrio en el que se incluyan elementos elásticos en los diseños sin elevar demasiado la complejidad de los sistemas de control.

Es importante tener en cuenta que en todos los tipos de locomoción animal existe una relación entre el tamaño de los animales y la velocidad que pueden alcanzar, diversos estudios(15) muestran que a mayor tamaño la velocidad de movimiento será también mayor aunque la proporción depende del tipo de locomoción, este parámetro es un condicionante muy importante a la hora de realizar el diseño de un robots que utilicen dichos métodos de locomoción.

### 2.3.1. Clasificación de los métodos de locomoción ápoda

De entre las especies descritas en la sección 2.2 solo los vertebrados han sido capaces de desarrollar más de un modo de andar, las otras especies descritas utilizan solo una forma de andar. Adicionalmente, se encuentran similitudes entre los métodos utilizados

## 2.3 Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica

---

por diferentes especies ápodas para moverse, lo cual permite agrupar los métodos de locomoción ápoda para facilitar el análisis.

### 2.3.1.1. Arrastre con dos puntos de Apoyo

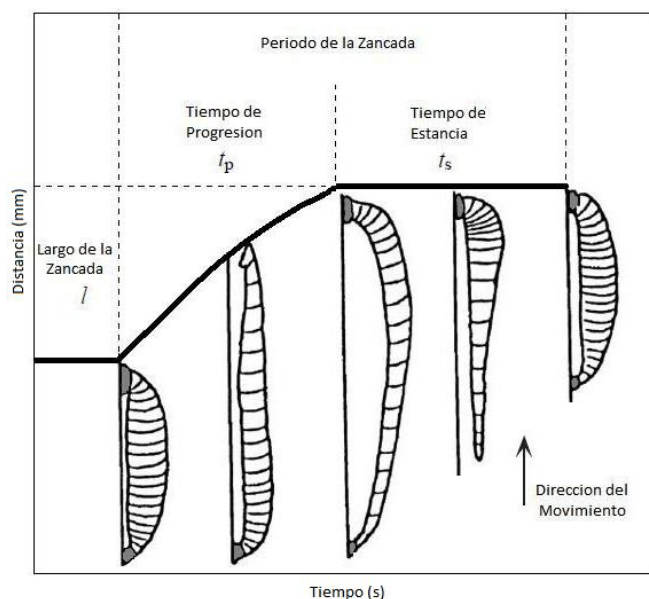
Es el método de locomoción más sencillo, en el que el animal genera un punto de apoyo en la parte delantera de su cuerpo y luego contrae su cuerpo para avanzar, una vez contraído, cambia el punto de apoyo a la parte trasera y estira nuevamente el cuerpo logrando de esta manera una progresión y reiniciando el ciclo de movimiento. Esta forma de desplazamiento fue descrita con más detalle en la sección 2.2.6.

El largo de la zancada está definido por la capacidad del animal de estirar su cuerpo, en caso de que no se presenten retrocesos, si el animal se encoge y estira una distancia  $l$ , avanzará en cada ciclo la misma distancia  $l$ . El tiempo de progresión  $t_p$  es generalmente menor que el de establecimiento  $t_s$  lo que hace que el ciclo útil del movimiento sea bajo, es decir que el animal permanece estático durante una buena parte del movimiento. Adicionalmente esta forma de movimiento requiere por parte del animal un método de sujeción o una forma de lograr que el coeficiente de fricción en el sentido de desplazamiento  $\mu_f$  sea muy bajo mientras que en el coeficiente de fricción en el sentido contrario  $\mu_b$  sea muy alta para de esta manera evitar retrocesos. La fig. 2.11 muestra los parámetros cinemáticos independientes de este tipo de movimientos.

El componente más importante en el consumo de energía depende de la velocidad a la que se realice el movimiento. Cuando el movimiento se realiza a velocidades bajas, la fuerza de rozamiento es el componente más importante. Por otro lado si la velocidad es alta, será mucho más grande el trabajo necesario para dar energía a las partes cuerpo cuando inician su movimiento y luego detenerlos cuando llegan al punto de apoyo. Esto se debe a que es necesario detener y reiniciar el movimiento en cada ciclo, perdiendo de esta forma toda la energía cinética.

Además de los hirudíneos mencionados antes, muchos otros animales se mueven de esta manera: varios moluscos marinos (conchas de mar), larvas de dípteros u otros insectos, entre otros. Algunos biólogos incluso consideran el movimiento concertina como una adaptación de esta forma de locomoción. Debido a la simplicidad del movimiento y a las diferentes técnicas desarrolladas por los animales para sujetarse al terreno, este tipo de movimiento puede ser ejecutado en entornos muy variados, las sanguijuelas demuestran esto ya que con sus copas de succión son capaces de moverse por casi

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA



**Figura 2.11: Arrastre Con Dos Puntos de Apoyo** - Se muestra un esquema sencillo del movimiento de una sanguijuela, indicando además las variables cinemáticas independientes. Las zonas sombreadas representan los segmentos en sujeción

cualquier superficie. Las larvas en cambio necesitan un terreno blando dónde las estrías de su cuerpo les ayuden a evitar el retroceso.

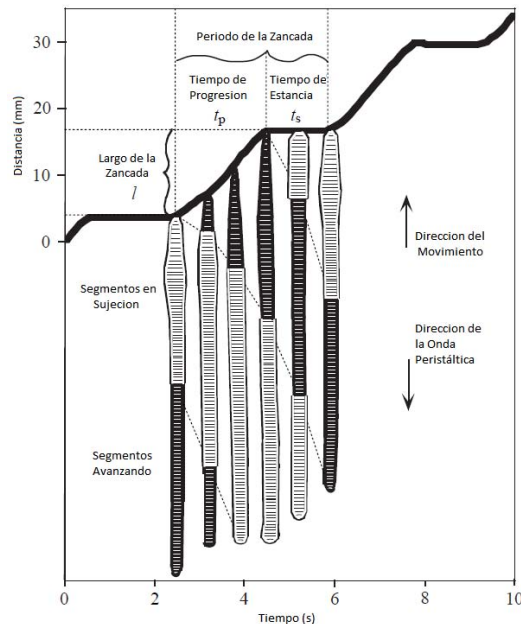
### 2.3.1.2. Movimiento Peristáltico

En este caso, en lugar de comprimir y extender todo el cuerpo, se comprime por segmentos de manera sucesiva pasando ondas de compresión hacia la parte trasera del cuerpo y generando de esta manera propulsión hacia adelante. Esta forma de andar es utilizada por las lombrices de tierra y se describió en la sección 2.2.3.

El largo de la zancada  $l$ , se define como la distancia avanzada durante un ciclo peristáltico y al igual que en el caso anterior depende de la capacidad del organismo para contraer y estirar su cuerpo además obviamente del tamaño del mismo. El periodo de la zancada es el tiempo que tarda el animal en completar un ciclo peristáltico, en este caso el tiempo de estancia  $t_s$  es menor al de progresión  $t_p$  por lo cual el movimiento se interrumpe durante un tiempo menor. La fig. 2.12 muestra las variables cinemáticas independientes en este tipo de movimiento.

Para que desplazamiento sea posible es necesario que el coeficiente de fricción en el

## 2.3 Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica



**Figura 2.12: Movimiento Peristáltico** - Se muestra un esquema sencillo del movimiento peristáltico realizado por una lombriz de tierra, indicando además las variables cinemáticas independientes y los segmentos en sujeción

sentido del avance  $\mu_f$  sea mayor que el de sentido contrario  $\mu_b$ . Esto hace que la cantidad de segmentos avanzando sea limitada ya que es necesario obtener la sujeción suficiente para vencer el rozamiento, la proporción entre los segmentos avanzando y los que se encuentran fijos depende de la capacidad de estos últimos de evitar el deslizamiento hacia atrás. Si adicionalmente el movimiento se hace a una velocidad en la que la inercia sea considerable los segmentos estáticos tendrán que compensar también estas fuerzas, para lo cual sería necesario utilizar una mayor parte del cuerpo como punto de apoyo.

El consumo de energía en esta forma de movimiento, al igual que en caso anterior, depende de la velocidad a la que se realice el movimiento. Si el movimiento es lento vencer la fricción será el mayor inconveniente, mientras que el coste de vencer la inercia cada vez que sea necesario iniciar o detener el movimiento será mayor cuanto mayor sea la velocidad a la que se mueva, por esta razón los animales que utilizan este tipo de movimientos lo hacen a velocidades muy bajas.

Este tipo de movimiento es utilizado por varios tipos de anélidos, además de algunas especies de poliquetos (gusanos con muchas cerdas). El movimiento de los gasterópodos

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

está basado en este mismo principio, aunque en su caso las ondas peristálticas pueden moverse hacia adelante o hacia atrás dependiendo de la especie. Aunque el entorno ideal para realizar este movimiento es bajo tierra suelta, dónde el sustrato permita una fácil sujeción, las lombrices de tierra son capaces de realizar este tipo de movimiento sobre casi cualquier superficie ya que cuando sus cilios no son efectivos generan mucus para facilitar el movimiento. Otros gusanos son capaces de moverse con ondas peristálticas incluso dentro de las paredes intestinales de animales más grandes.

### 2.3.1.3. Ondulación Lateral

En este tipo de movimiento, el cuerpo del animal toma forma de una o varias “s” continuas, y luego inicia un movimiento en el se que dobla el cuerpo generando ondas que viajan hacia la parte trasera del cuerpo y hacen que el mismo se desplace sobre la superficie. Esta forma de andar se describió en la sección 2.2.1

Este movimiento es diferente a los dos anteriores ya que el movimiento se realiza de manera continua, es decir, una vez iniciada la ondulación no hay interrupciones en el movimiento. El análisis de las variables cinemáticas se debe hacer similar al de una onda sinodal, dónde el largo de la zancada  $l$  sería el largo de la onda que viaja por el cuerpo y el periodo de la zancada  $t_p + t_s$  está marcado por la frecuencia de la misma. La fig. 2.13 muestra las variables cinemáticas independientes en este tipo de movimiento.

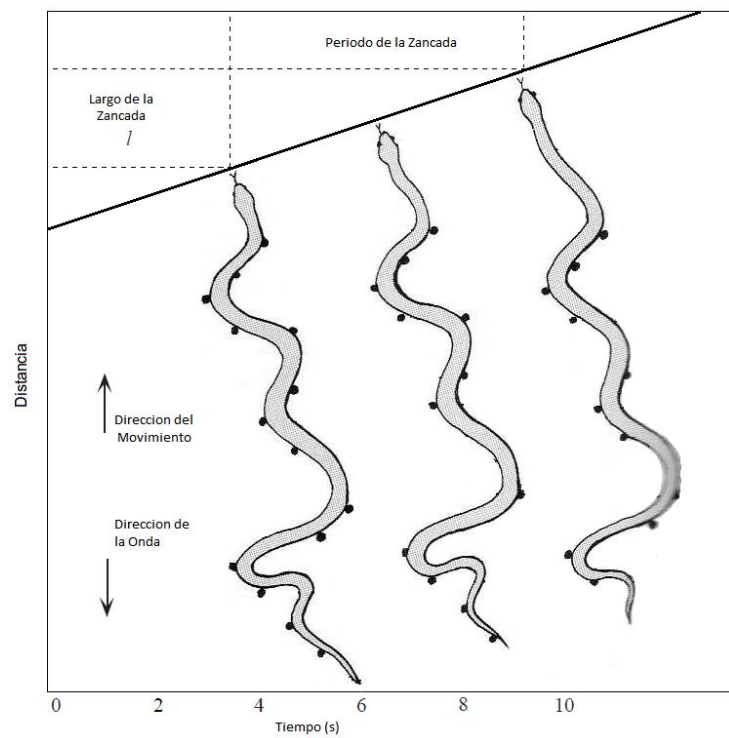
Debido a que el movimiento del cuerpo no se hace sobre el mismo eje de desplazamiento, si no de manera ondulatoria sobre este mismo, la fuerza de rozamiento vista sobre el eje de avance tendrá dos componentes, uno sobre el propio camino en el que se está realizando el movimiento, determinado por el coeficiente de fricción axial  $\mu_a$  y otro normal al eje sobre el que se está avanzando, que depende del coeficiente de fricción transversal  $\mu_t$ . Así pues el rozamiento que se opone al movimiento está dado por  $\mu_t \cos(\theta)$ , mientras que el rozamiento que se opone al retroceso está dado por  $\mu_a \sin(\theta)$ , dónde  $\theta$  es el ángulo formado entre el eje de avance y la línea de movimiento. En las serpientes este efecto se logra al apoyarse lateralmente en elementos que sobresalen del terreno.

El consumo de energía tiene también dos factores, uno debido al rozamiento y otro debido a la inercia. El trabajo necesario para vencer el rozamiento se ve aumentado de manera inversamente proporcional al  $\cos(\theta)$  ya que mientras más corto sea el largo de la onda será necesario hacer un recorrido mayor sobre la superficie para avanzar



## 2.3 Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica

---



**Figura 2.13: Movimiento de Ondulación Lateral** - Se muestra un esquema del movimiento de ondulación lateral realizado por una serpiente, se señalan los puntos de apoyo lateral además de las variables cinemáticas independientes

## 2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

una distancia determinada. La inercia en cambio no se pierde completamente, debido a que el movimiento es continuo el componente axial de la velocidad se mantiene y en los puntos cima de la onda se pierde el componente transversal de la misma ya que es necesario cambiar la dirección del movimiento. Por estas razones este movimiento permite alcanzar velocidades mucho mayores que los descritos antes.

Este tipo de movimiento es tal vez el más ampliamente utilizado por los animales ápodos, ya que se puede observar en los nematodos, en otros tipos de gusanos, en los cecílicos y en todas las serpientes. Algunos reptiles con patas, como las salamandras, utilizan variaciones de este movimiento. El entorno ideal para este tipo de movimiento es aquel en que la superficie tenga irregularidades que puedan ser utilizadas como puntos de apoyo por lo que es utilizado sobre césped, tierra, arena, etc. No es útil sin embargo en espacios reducidos como túneles o canales estrechos.

### 2.3.2. Comparación de los tres métodos de locomoción Ápoda

Para facilitar la comparación de los métodos descritos en esta sección se resumen a continuación las variables o expresiones utilizadas en los apartados anteriores:  $l$ : Largo de una Zancada.  $\mu_f$ : Coeficiente de fricción en el sentido de avance.  $\mu_b$ : Coeficiente de fricción en el sentido contrario al avance.  $\mu_a$ : Coeficiente de fricción en axial al sentido contrario al avance.  $g$ : Constante gravitacional.  $v$ : Velocidad de Avance.  $\theta$ : Ángulo formado entre el eje de avance y la línea de movimiento.  $q$ : Fracción de segmentos en movimiento.

Modelo	Costo por Fricción	Costo Inercial	Condiciones
Arrastre	$\mu_f g$	$4v^2/3l$	$\mu_b > \mu_f$
Peristáltico	$\mu_f g$	$v^2/2q^2l$	$q < \mu_b/(\mu_b + \mu_f)$
Serpentino	$\mu_f g / \cos(\theta)$	$v^2 \tan^2(\theta)/l$	$\tan(\theta) > \mu_a/\mu_t$

**Cuadro 2.1: Costo Mecánico del Movimiento** Comparación del costo energético del movimiento, se muestra el consumo por fricción, el consumo por inercia y las condiciones necesarias para el movimiento(15).

La tabla 2.1 muestra el componente de fricción, el de inercia y las condiciones necesaria para que se pueda realizar cada tipo de movimiento. Se observa que el trabajo de fricción es mayor en el movimiento serpentino que en los otros dos tipos de locomoción, esto se debe a que este movimiento realiza un recorrido mayor sobre el terreno al realizar

## 2.3 Análisis de los métodos de locomoción ápoda y su posible aplicación en robótica

---

la ondulación, el costo inercial es siempre proporcional al cuadrado de la velocidad por tanto incrementará rápidamente al incrementar también la velocidad de avance por lo que las técnicas de locomoción descritas funcionarán mejor a menores velocidades. Los coeficientes de fricción juegan un papel muy importante en el consumo de energía y además establecen las condiciones necesarias para que el movimiento sea posible, este es uno de los puntos más importantes que los tres métodos de locomoción tienen en común.

característica	Arrastre	Peristáltico	Serpentino
Dif. Entornos	+++	++	++
Eficiencia	+	++	+++
Velocidad	+	++	+++
Fricción	+	++	+++
Inercia	+++	++	+

**Cuadro 2.2: Comparación de los Métodos de Locomoción Ápoda** Se realiza una valoración de algunas características de cada modo de marcha, se utiliza la siguiente notación (+ Malo, ++ Regular, +++ Bueno)

En la tabla 2.2 se muestra una comparación de algunas de las características de cada modo de marcha, se puede ver que el arrastre con dos puntos de apoyo es el método que mejor se adapta a diferentes entornos. La velocidad del movimiento y la eficiencia del mismo son mejores para el movimiento serpentino en el que no hay tiempo de estancia, así mismo la fricción es mayor en este movimiento como se explicó anteriormente.

### 2.3.3. Posibilidades de aplicación en robótica

Los tres tipos de movimiento descritos en el apartado anterior pueden ser utilizados en aplicaciones robóticas ya que son formas de movimiento que no tienen un nivel muy elevado de complejidad, además la amplitud de estudios realizados tanto por biólogos como por ingenieros hace posible que los patrones de movimiento puedan ser modelados y reproducidos con las herramientas actuales. La posibilidad de utilizar este tipo de movimiento en diferentes superficies amplía las posibilidades de su aplicación en entornos reales, adicionalmente debido a que en todos los casos el centro de masa está a una altura muy baja hace que la estabilidad no sea un inconveniente.

## **2. BASES FISIOLÓGICAS DE LA LOCOMOCIÓN ÁPODA**

---

Las dificultades se presentan a la hora de imitar las herramientas utilizadas por los animales ápodos para facilitar el movimiento en la dirección deseada o generar rozamiento en la dirección contraria. Del mismo modo emular las herramientas utilizadas para generar puntos de sujeción, como las copas de succión utilizadas por las sanguijuelas, presenta también una dificultad considerable.

En los capítulos siguiente se detalla en los métodos utilizados para implementar la locomoción ápoda en robots terrestres, y se mencionan algunos de los desarrollos más significativos en esta área.

## 3

# Locomoción Ápoda Artificial

En este capítulo se trata la implementación de las técnicas de locomoción estudiadas en el capítulo anterior en robots móviles, se inicia con una introducción al concepto de locomoción ápoda artificial y luego se hace un estudio de los desarrollos más significativos de robots ápodos, divididos de acuerdo a los modos de marcha estudiados en la sección 2.3.1. Se termina con algunas consideraciones sobre la implementación de estos modos de marcha.

### 3.1. Introducción

La locomoción ápoda artificial puede definirse como la implementación de las técnicas de locomoción utilizadas por los animales ápodos en robots o maquinas móviles. De igual manera que los animales ápodos, estos robots se mueven por las diferentes superficies mediante cambios sincronizados de la forma o posición de los segmentos de su cuerpo, sacando provecho de la robustez, estabilidad, y capacidad de adaptación a diferentes terrenos que son inherentes a esta forma de locomoción.

Algunos desarrollos combinan características, brindando ruedas o patas a los robots ápodos para facilitar el desplazamiento, para este estudio se consideran robots ápodos siempre que las ruedas o patas no sean actuadas de manera activa.

A pesar de que los métodos de locomoción basados en patas o en ruedas han sido estudiados durante mucho más tiempo, la aplicación de los mismos sigue estando sujeta a los tipos de terreno sobre los cuales pueden moverse. La locomoción ápoda sin embargo ha abierto nuevas posibilidades, ya que por su capacidad de arrastrarse, o deslizarse por

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

diferentes superficies, estos robots pueden ser utilizados en escenarios peligrosos, así como en inspección de espacios muy reducidos e incluso en aplicaciones médicas.

Los primeros estudios en la aplicación a robots de estas técnicas de locomoción fueron realizados por Hirose (1) en 1971, desde ese entonces hasta la actualidad se han realizado un gran número de desarrollos y avances en el área, los más importantes serán descritos a continuación.

#### 3.2. Tipos de Robots ápodos

El estudio realizado en la sección 2.3.1 mostró que las técnicas de locomoción ápoda puede ser clasificadas en tres grupos: Arrastre con dos puntos de sujeción, Movimiento peristáltico y Movimiento Serpentino. En esta sección se toma como base esa división con el objetivo de realizar un análisis de la aplicación de estos métodos en robots ápodos. Adicionalmente se incluye un apartado dedicado a los robots serpentinicos, estos robots tienen cuerpos alargados y articulados al igual que los robots serpiente, pero utilizan para su locomoción ruedas u orugas activas.

Para cada forma de movimiento se analizarán las características de su implementación en robots, las ventajas e inconvenientes de la misma y los desarrollos más significativos.

##### 3.2.1. Robots Oruga

Los robots oruga son aquellos que se mueven utilizando el método de arrastre con dos puntos de apoyo. La principal ventaja de este método es simplicidad, sin embargo la eficiencia de este movimiento es muy baja y los movimientos se realizan a velocidades muy bajas. Adicionalmente los puntos de sujeción presentan una dificultad adicional, ya que es necesario tener un solo punto de apoyo en el que todo el peso del robot pueda sustentarse y esto requiere de sistemas de sujeción complejos. Por estas razones este método ha sido el menos desarrollado. Algunos desarrollos de este tipo de locomoción se han realizado con el objetivo de validar conceptos para su implementación en robots más complejos que generalmente utilizan movimiento peristáltico, otros se han desarrollado con el objetivo de moverse en entornos resbaladizos, dentro de tuberías (22) o como solución para movimientos en el sistema gastrointestinal(23),(24).

### 3.2.1.1. Características

Los robots oruga se caracterizan por tener un número bajo de grados de libertad, debido a la simplicidad del método, solo es necesario tener un grado de libertad para la expansión o contracción del cuerpo y dos sistemas de sujeción en los extremos que pueden ser considerados como otros grados de libertad o como pinzas dependiendo de la metodología que se utilice.

El movimiento de este tipo de robots se realiza casi en su totalidad sobre un plano o a través de tuberías o conductos, la mayoría de los robots de este tipo diseñados solo se mueven de manera lineal para lo cual utilizan articulaciones controladas de un solo grado de libertad, muchos prototipos reemplazan estas articulaciones por músculos artificiales o por otro tipo de elementos que permitan realizar los movimientos requeridos. En algunos casos se utilizan articulaciones o elementos móviles no controlados para permitir que el robot se adapte a variaciones en la superficie o a curvaturas en caso de moverse por tuberías.

Los actuadores utilizados en este tipo de robots son muy variados. La simplicidad de estos robots permite que sea posible experimentar con diversos actuadores, algunos prototipos utilizan motores eléctricos, los actuadores neumáticos son también utilizados en muchos casos sobre todo en prototipos para uso médico, las aleaciones de memoria de forma SMA así como otros tipos de actuadores de nueva generación también han sido utilizadas en muchos robots de este tipo.

Debido a que gran parte de los robots oruga son diseñados como plataformas de prueba, el funcionamiento es en la mayoría de los casos con una secuencia de movimientos predeterminada o teleoperado con un funcionamiento simple de andar/detenerse, utilizan para esto controladores centralizados que generalmente no están embarcados e implementan algoritmos muy sencillos, en caso de los robots utilizados para aplicaciones médicas, el control se realiza directamente por el operario.

### 3.2.1.2. Desarrollos más significativos

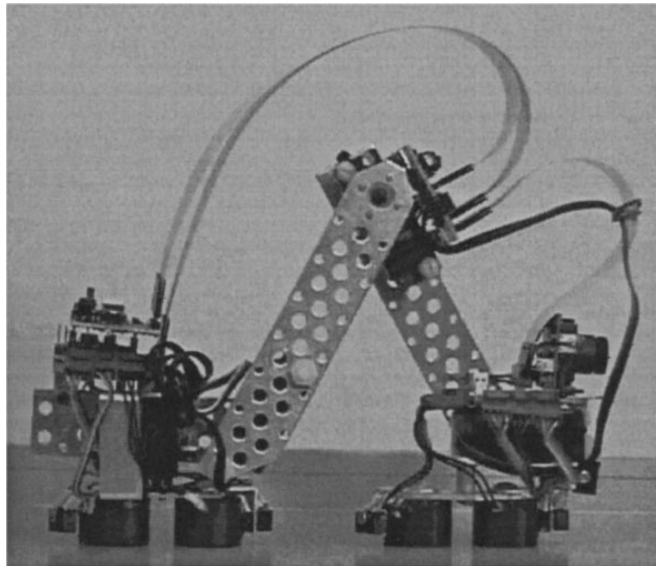
- Inchworm Robot

Es un desarrollo del departamento de *Computer Science* de Dartmouth, Hanover, en el año 2000 (25) El cuerpo del robot está compuesto por cuatro segmentos unidos por cuatro articulaciones actuadas por servomotores eléctricos. Los dos

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

segmentos de los extremos son los “pies” o puntos de apoyo del robot, y cada uno posee un electroimán que le permite sujetarse a una superficie metálica con la fuerza suficiente para soportar el peso del resto del cuerpo, la articulación central permite realizar el movimiento de expansión o contracción del cuerpo mientras que las dos articulaciones de los extremos permiten que los pies se adapten a la superficie por la que se realiza el movimiento, la cuarta articulación es utilizada como pivote y le permite al robot girar. El robot puede moverse a una velocidad máxima del robot de 12.5mm/s sobre una superficie horizontal, pero también es capaz de subir escaleras o moverse por paredes verticales.



**Figura 3.1: The Inchworm Robot** - Es un robot de 4 segmentos, 3 de las articulaciones son visibles en la figura mientras una cuarta en el pie del robot es utilizada para realizar giros. El robot tiene electroimanes en ambos pies además de sensores infrarrojos para detectar el contacto con la superficie

- Inchworm Endoscopic Robot

Es un prototipo desarrollado por la Universidad de Santa Anna (Italia) en el año 2002 (24), con el objetivo de realizar procedimientos de endoscopia, es un robot cilíndrico con dos pinzas en los extremos y un actuador neumático lineal en medio, adicionalmente a las pinzas en los extremos realiza succión para sujetarse mejor a las paredes del intestino, también girar para adaptarse a la forma del entorno y logra una velocidad máxima de 5.3mm/s.





**Figura 3.2: InchWorm Prototype** - Robot Prototipo Inchworm, posee dos pinzas de sujeción en los extremos que combinan succión y sujeción mecánica y un cuerpo central capaz de expandirse o contraerse utilizando presión de aire pasando de 115 a 195mm

### ■ MICROBOT

Microbot es un robot modular reconfigurable desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid en el año 2006 (26), se trata de un robot modular al que es posible agregarle diversos módulos dependiendo de la tarea que se pretenda desarrollar, está diseñado para moverse por tuberías, es capaz de realizar giros y moverse por pendientes de 90° mientras transmite imágenes o medidas de otros sensores a un módulo de control, utiliza servomotores en miniatura como actuadores y alcanza una velocidad máxima de 250mm/s.



**Figura 3.3: Microbot** - Micro-Robot modular multiconfigurable desarrollado por la Universidad Politécnica de Madrid, utiliza servomotores y es capaz de moverse por tuberías verticales u horizontales y realizar giros de 90°

### ■ OMEGABOT

Omegabot es un robot oruga desarrollado en la Universidad Nacional de Seoul en el año 2009 (27), realiza un movimiento tipo oruga en el que el centro del

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

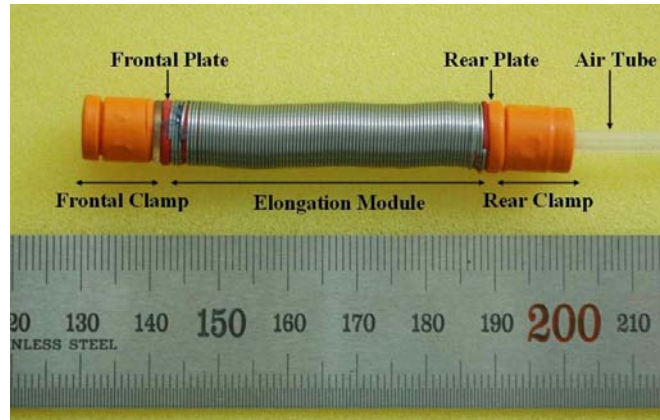
robot nunca entra en contacto con la superficie, manteniendo siempre la forma de la letra griega omega  $\Omega$  mientras un extremo se utiliza como punto de apoyo el otro se desplaza. El robot está construido con un compuesto flexible posee tres articulaciones actuadas por muelles SMA y logra moverse a una velocidad de 5mm/s.



**Figura 3.4:** Omegabot - Robot tipo oruga desarrollado por la Universidad Nacional de Seoul (Corea), utiliza un compuesto flexible actuado por muelles SMA

- Pneumatic Inchworm-like MicroRobot

Es un robot desarrollado en la Universidad Aeroespacial de Corea en el año 2007(22), se trata de un robot con actuadores neumáticos controlados por una sola línea de aire comprimido, diseñado para la inspección de tuberías de una pulgada de diámetro, está compuesto por tres cámaras de aire conectadas entre sí, pero el tamaño de los agujeros que las conectan es diferente y de esta manera se logra que la primera cámara se ensanche generando un primer punto de apoyo, luego el aire pase de manera escalonada de la primera a la segunda cámara generando la expansión del cuerpo del robot y luego a la tercera generando un segundo punto de apoyo, luego mediante la descompresión también escalonada se obtiene un movimiento de arrastre con dos puntos de apoyo. La velocidad del movimiento varía entre 10 y 50 mm/s dependiendo de la presión de aire utilizada y el tamaño de los orificios que conectan las cámaras.



**Figura 3.5: Pneumatic Inchworm-like MicroRobot** - Robot tipo oruga activado por actuadores neumáticos con una sola línea de aire comprimido, desarrollado por la Universidad Aeroespacial de Corea

### 3.2.2. Robots Gusano

Los robots gusano utilizan el movimiento peristáltico como técnica de locomoción, este tipo de movimiento, al igual que el de arrastre con dos puntos de apoyo, permite a los robots desplazarse por tuberías, o entornos cilíndricos, se ha utilizado también para sistemas de endoscopia o colonoscopia, pero en este caso la sujeción al entorno es más sencilla por lo que el número de prototipos es mucho mayor. Uno de los puntos más fuertes de este tipo de robots es la estabilidad, debido a que la mayor parte del cuerpo del robot está en contacto constante con la superficie, otra ventaja es que la forma de movimiento es independiente del tamaño del robot, razón por la cual es posible se encuentran micro robots de algunos centímetros hasta robots de algunas decenas de centímetros, adicionalmente se adapta muy bien a espacios muy estrechos debido a que la zancada requiere muy poco espacio adicional al tamaño del robot.

#### 3.2.2.1. Características

El número de grados de libertad de los robots gusano está definido por la cantidad de segmentos del robot ya que es necesario al menos uno por cada segmento, para realizar un ciclo de movimiento peristáltico es necesario tener un mínimo de tres GDL, pero la mayoría de los desarrollos utilizan 4 o más segmentos. Adicionalmente cada segmento puede tener más de un GDL para permitir que el robot pueda girar y ampliar

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

la capacidad de movimiento a dos o tres dimensiones.

El tipo de articulaciones utilizado por estos robots es muy diverso y está estrechamente ligado al actuador que se utilice, algunos sistemas utilizan articulaciones compuestas que permitan el movimiento en dos o tres ejes para orientar al robot y que al combinarse generen la contracción y expansión necesaria para el avance, otros en cambio utilizan un actuador específico para la contracción-expansión y otros adicionales para la orientación, los más sencillos como se dijo anteriormente utilizan una articulación simple que solo permite el cambio en el tamaño del segmento y por lo tanto solo son capaces de moverse de manera lineal, otra posibilidad es un punto medio, en donde se utilizan articulaciones no controladas que permiten la adaptación del robot a tuberías con curvaturas u otros entornos similares.

Los actuadores que se utilizan en los robots gusano son también muy variados. Los actuadores eléctricos están entre los más utilizados, principalmente los servomotores, debido a su facilidad en el control. Los actuadores neumáticos también son ampliamente, adicionalmente los nuevos actuadores, principalmente las SMA, se han utilizado en varios prototipos ya sea con un solo hilo para movimiento lineal o varios en paralelo para aumentar las posibilidades de movimiento, algunos desarrollos utilizan otros actuadores como fluidos magnéticos (28) o electroreolíticos.

En cuanto al nivel de autonomía, los prototipos de este tipo estudiados, al igual que los robots oruga, realizan trayectorias simples predefinidas, en algunos casos adaptándose a tuberías o paredes que limitan el movimiento, algunos robots implementan también trayectorias de curvas, el control se realiza desde un microprocesador a bordo en algunos casos, o directamente desde el ordenador.

Debido a la alta dependencia de este tipo de movimiento en la capacidad del robot de establecer un punto de apoyo, evitar el retroceso es uno de los mayores inconvenientes a resolver en la implementación y es necesario dotar a los robots con sensores para calcular y corregir estos errores.

#### 3.2.2.2. Desarrollos más significativos

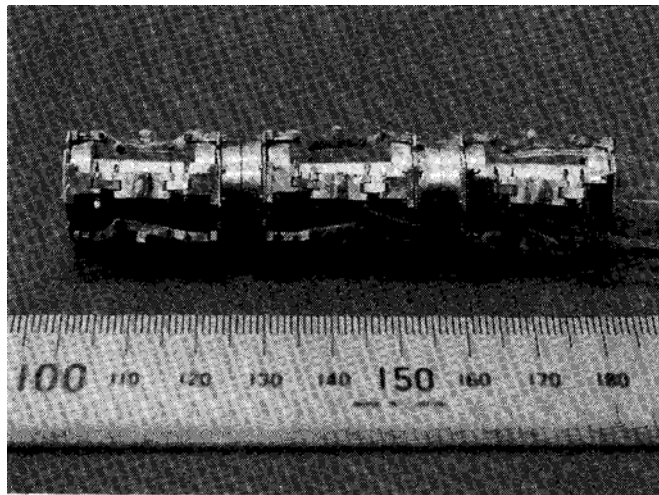
- Peristaltic Crawling Robot

Es un desarrollo de la universidad de la Prefectura de Akita en Japón (29), se trata de un robot actuado por cuatro músculos artificiales neumáticos conectados uno

al otro, los músculos artificiales han sido diseñados por el mismo grupo (30) para mejorar el desempeño del robot, el robot se mueve por un tubo de acrílico a una velocidad máxima de 0.75mm/s, y se realizó un estudio para determinar la secuencia de movimientos con mejor desempeño tomando en cuenta las características del robot y del entorno.

- EWM

EWM son las siglas de *Earthworm-type Walking Mechanism* (Mecanismo Caminante tipo Gusano), es un robot desarrollado por el Tokyo Institute of Technology en el año 1994 (31), utiliza actuadores neumáticos de tipo *Flexible Micro Actuator* y está compuesto de tres cuerpos, cada segmento está compuesto por dos placas metálicas conectadas por un actuador, para moverse requiere presiones de aire de entre 0 y 0.35MPa y tres válvulas controladas por un computador externo, está diseñado para moverse por una tubería de 22mm avanzando hacia adelante o hacia atrás dependiendo de la secuencia de comandos que se le envíe, alcanza una velocidad máxima de 2.2mm/s.



**Figura 3.6:** Earthworm-type Walking Mechanism - Robot tipo gusano desarrollado por el Tokyo Institute of Technology, utiliza tres micro actuadores neumáticos flexibles para moverse por tuberías de 20mm de diámetro

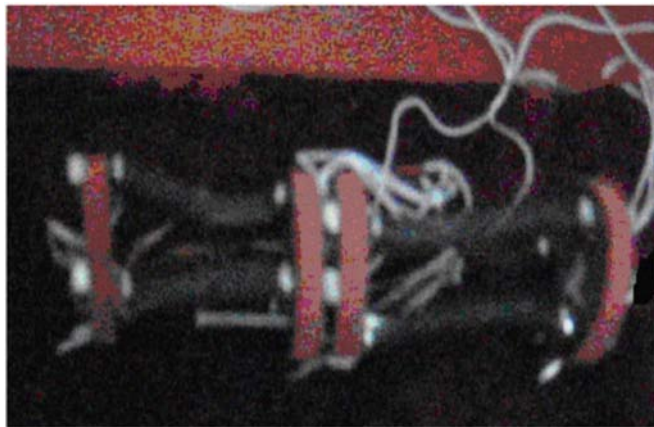
- Peristaltic Micro In-Pipe Robot

Este robot ha sido desarrollado por la Harbin Engineering University de China en el año 2011(32), es un robot modular, donde cada módulo simula un segmento

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

del cuerpo del gusano y está compuesto por tres muelles SMA ubicados en las aristas de un triángulo equilátero formando una estructura similar a la de un robot paralelo y permitiendo de esta manera que el robot se desplace en línea recta y además realice giros en tres dimensiones. El diámetro del robot es de 20mm y es utilizado para moverse en una tubería lisa de 30mm de diámetro con curvas de hasta  $44^\circ$ , el movimiento obtenido es muy lento 0.22mm/s debido a que la respuesta de los resortes SMA no permite un ciclo rápido de movimiento y además se presenta deslizamiento hacia atrás.



**Figura 3.7: Peristaltic Micro In-Pipe Robot** - Micro Robot de movimiento peristáltico en tuberías, tiene 20mm de diámetro y está compuesto por varios módulos que simulan una estructura paralela actuados por tres resortes SMA

- Underground Explorer Robot

Es un desarrollo de la universidad Chuo de Tokyo en el año 2009(33), es un robot compuesto por cuatro unidades o segmentos, cada segmento es una estructura paralela tipo Delta con tres servomotores eléctricos, por tanto es capaz de moverse en tres dimensiones y de generar altas fuerzas de contracción o expansión. El robot tiene un largo de 300mm y es capaz de moverse por tuberías verticales y horizontales, realizar giros de  $90^\circ$  y adicionalmente ha sido equipado con una protección contra el polvo que le permite operar bajo tierra pero no es capaz de hacer ningún tipo de perforación es decir que solo se mueve por conductos subterráneos ya existentes, la velocidad máxima de ascenso por una tubería es de

9mm/s aproximadamente, si el robot está descendiendo su máxima velocidad es 18mm/s



**Figura 3.8: Underground Explorer Robot** - Es un Robot compuesto por cuatro módulos dónde cada uno es una estructura paralela, es capaz de ascender o descender por tuberías verticales o conductos subterráneos.

- Artificial Earthworm

Es un desarrollo de la universidad de Santa Anna (Italia) en el año 2003(34), se trata de un robot que pretende imitar el comportamiento de una lombriz de tierra, consta de cuatro cuerpos, cada uno de ellos tiene un muelle SMA y una carcasa esférica de silicona que gracias a su flexibilidad cambia de forma, comprimiéndose cuando el muelle se activa estirándose a la vez que retorna el muelle SMA a su forma original cuando este se desactiva. Pequeños alambres de metal se agregaron en las uniones de los cuerpos para simular los cilios que utilizan las lombrices de tierra para sujetarse al sustrato. El control es muy sencillo ya que todos los actuadores se controlan en régimen todo o nada y la secuencia de movimientos es predeterminada, el robot alcanza una velocidad máxima de 0.22mm/s.

### 3.2.3. Robots Serpiente

Son robots o mecanismos de múltiples segmentos cuya propulsión se deriva de las ondulaciones de su cuerpo, no utiliza ruedas, patas ni orugas activas para propulsarse. La mayoría de los robots de este tipo implementados hasta el momento utilizan ruedas

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---



**Figura 3.9: Artificial Earthworm** - Es un Robot compuesto por cuatro cuerpos de silicona flexible actuados por un muelle SMA con los cuales genera el movimiento peristáltico. Utiliza pequeños alambres metálicos a modo de cilios para sujetarse a la superficie.

pasivas para su movimiento, estas evitan que el robot se desplace lateralmente de manera no deseada y facilitan la propulsión hacia adelante, sin embargo los robots serpiente con ruedas están diseñados para operar en superficies lisas que en su mayoría son artificiales, los robots serpientes sin ruedas brindan la posibilidad de moverse por entornos naturales que normalmente son más complejos y en dónde las ruedas no funcionarían adecuadamente, esto a costa de una mayor complejidad a la hora de controlar y mover los robots.

#### 3.2.3.1. Características

Estos robots tienen un elevado número de grados de libertad regularmente superior a 12 y pueden llegar hasta los 30 o más, esto se debe precisamente a que los desplazamientos del robot se basan en movimientos de su cuerpo y para realizarlos de manera eficiente es necesario tener muchas articulaciones.

Los primeros robots de este tipo y en general los diseños más simples solamente se mueven en un plano, pero la mayoría de los diseños recientes tiene la capacidad de moverse en las tres dimensiones, esto permite su uso en terrenos más complejos ya que sus capacidades de movimiento se amplifican y al elevarse tienen la capacidad de evitar obstáculos o adaptarse a terrenos de inclinación variable.

Normalmente utilizan articulaciones simples, es decir con un solo grado de libertad, lo que facilita su implementación y control aunque algunos diseños más complejos utilizan articulaciones de dos o incluso tres grados de libertad.



En este tipo de robots las articulaciones deben ser activas y casi en su totalidad se utilizan accionamientos eléctricos, debido a que se trata de robots móviles con un alto número de elementos activos, los motores eléctricos son la herramienta más utilizada, sin embargo algunos diseños utilizan accionamientos neumáticos, hidráulicos o SMAs, pero estos tipos de accionamientos crean mayores dificultades ya que para su operación requieren sistemas externos o consumos de potencia mayores.

Pueden tener sistemas de control centrales dónde una sola CPU a bordo o externa se encarga de calcular la posición de todas las articulaciones en cada momento y del procesamiento de todos los sensores, o sistemas de control distribuidos, es decir cada módulo controla sus propios actuadores y sensores y estos se comunican con un procesador central a través de algún tipo de bus, los sistemas distribuidos presentan mayor dificultad a la hora de su implementación pero permiten tener sistemas más robustos y con mayor eficiencia.

Estos robots pueden funcionar de manera autónoma o teleoperados, el control central o de alto nivel se realiza en algunos casos en la cabeza o cola del robot, dónde se carga una CPU de alta capacidad, o en otros casos se realiza en computadores externos, en cuyo caso se requiere una comunicación con el exterior que puede ir por cable o de manera inalámbrica.

La alimentación en este tipo de mecanismos es uno de los problemas sin resolver ya que el consumo de energía es elevado debido al alto número de accionamientos y a que los movimientos no tienen un buen nivel de eficiencia, bien puede utilizarse un cable de alimentación externo en cuyo caso la operación se puede extender por todo el tiempo que sea necesario, pero el robot no podrá alejarse del puesto de control, o puede tenerse un sistema con baterías a bordo del robot en cuyo caso se tiene la capacidad de alejarse del punto de control pero el tiempo de operación se reduce disminuyendo la capacidad operativa del robot.

### 3.2.3.2. Desarrollos más significativos

- ACM III

El *Active Cord Mechanism III* desarrollado por Hirose en el año 1972 (35) es el primer robot con el que se logró reproducir el movimiento de una serpiente, su largo era de 2m, y su peso 28Kg, logró moverse a 400mm/s, se trataba de un robot

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

planar de 20 articulaciones actuadas por servomecanismos y utilizaba ruedas libres en la base de cada segmento, modificadas para facilitar el desplazamiento en la dirección deseada.



**Figura 3.10: Active Cord Mechanism III** - El primer robot capaz de reproducir el movimiento de una serpiente, tenía 2 metros de largo y 20 articulaciones actuadas por servomecanismos eléctricos

El movimiento se realizaba enviando comandos de posición al servo de la primera articulación para que esta genere un movimiento sinusoidal, luego de un desfase de tiempo, este movimiento se transmitía al servo siguiente, logrando de esta manera que se genere una onda sinusoidal por el cuerpo del robot, utilizaba sensores táctiles en su exterior para poder adaptar el movimiento en caso de encontrar un obstáculo

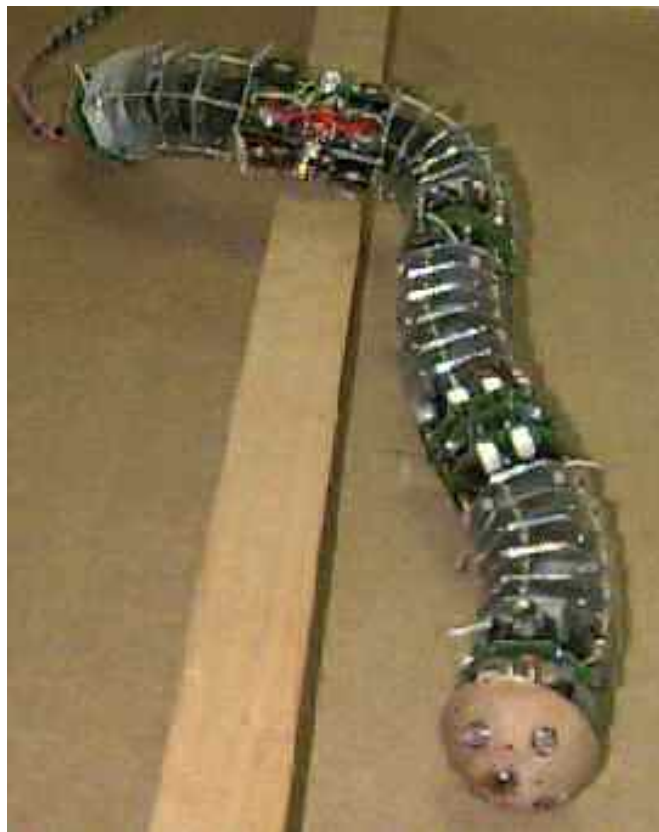
- **Hyper Redundant Manipulator**

El Manipulador Hiper Redundante fue un término introducido por Chirikjian en 1990 (36) para referirse a manipuladores con un número muy alto de grados de libertad, además presentó un algoritmo para evitar obstáculos en el plano, más tarde en 1993 construyeron un manipulador hiper redundante (37) con el objetivo de demostrar los análisis realizados previamente, este robot de 30 grados de libertad, consiste en 10 módulos donde cada módulo es un robot paralelo con 3 articulaciones prismáticas, el control de los motores y el cálculo de las trayectorias se realizaba en una computadora externa. Este robot a pesar de no ser un robot

móvil, permitió el posterior desarrollo de los robots serpiente con gran número de articulaciones.

- GMD Snake

El es un desarrollo del *German National Research Center for Information Technology* (GMD por sus siglas en alemán) en el año 1996 (38), este robot consta de una cabeza, varias secciones idénticas y una cola, cada sección tiene 2 articulaciones, las articulaciones están compuestas de laminas de aluminio de forma octagonal, cada articulación tiene 2 motores que generan movimiento horizontal y verticalmente con la ayuda de resortes. Tanto la cabeza como cada sección se controlan por un single-chip I/O device (SLIO). Los SLIO están comunicados por un bus CAN, que transmite las señales de control y la alimentación. Las trayectorias y el control de alto nivel se realizan en un PC externo.



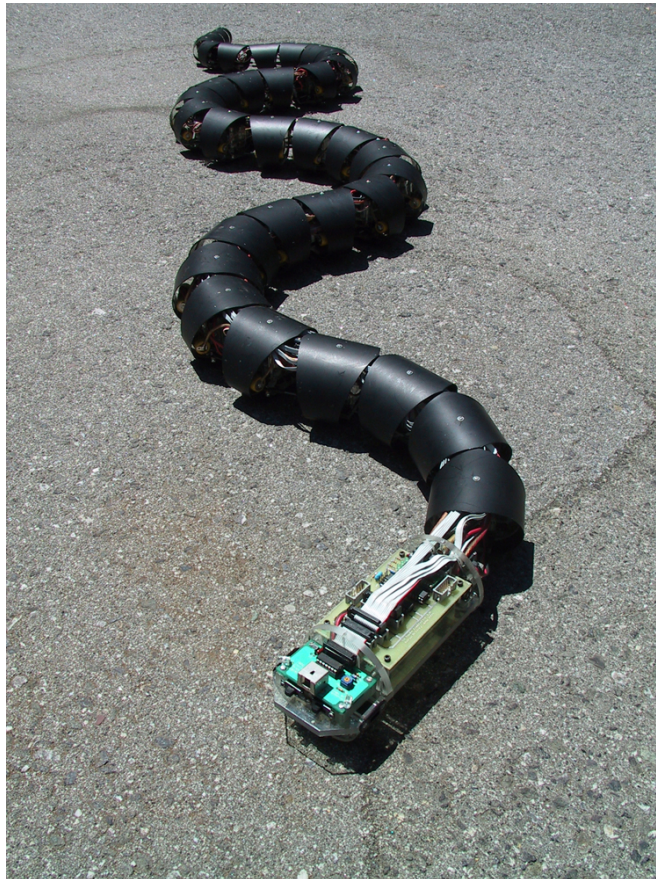
**Figura 3.11:** GMD Snake - Robot serpiente desarrollado en Alemania, fue uno de los primeros diseños que no utilizó ruedas para realizar el movimiento serpentino

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

- S5

En 1999 Miller desarrolló el robot S5 (39) este robot es la evolución de diseños previos del mismo autor, tiene 32 articulaciones de dos grados de libertad cada una, accionadas por servomotores ubicados en direcciones opuestas lo que le permite ondular horizontal y verticalmente, utiliza una rueda libre en la parte baja de cada sección para facilitar el desplazamiento adicionalmente, una conexión mecánica a tipo de columna une las secciones y permite también el paso del cables. La velocidad y la dirección se controlan con un joystick, y un segundo joystick controla la elevación y el movimiento lateral, tiene 42 baterías distribuidas entre las secciones, el control de los servomotores está repartido en 8 tarjetas de controladoras de servomotores y dos microprocesadores externos.



**Figura 3.12: Robot Serpiente S5** - Este Robot es una evolución de diseños previos del mismo autor, tiene 64 servomotores eléctricos controlados por 8 tarjetas controladoras y un procesador central.

- ACM R3

En 2001 Hirose desarrolló el ACM R3 (40), este robot modular mide 1.8 metros y pesa 12 Kg, cada modulo tiene 1 grado de libertad y se alternan rotando  $90^\circ$  uno del siguiente para lograr un movimiento en 3D, todos los módulos son idénticos. Tiene un par de ruedas pasivas en cada modulo, estas facilitan el movimiento y al ser de diámetro mayor al tamaño del modulo, entran siempre en contacto con la superficie sin importar la rotación o inclinación del robot, el inconveniente de estas ruedas es que limitan el giro de cada articulación a  $60^\circ$ , además de la ondulación lateral este robot es capaz de moverse haciendo Ues, girando sobre su propio eje o con otros patrones, también puede elevar una parte de su cuerpo a modo de cabeza para obtener una vista mejor del terreno.



**Figura 3.13:** Active Cord Mechanism R3 - Robot ACM R3 desarrollado por Hirose, tiene un par de ruedas pasivas por módulo con diámetro superior al tamaño del módulo, lo cual les permite estar siempre en contacto con el terreno, además de realizar movimiento serpentino puede avanzar formando “Ues” o haciendo rotaciones.

- 3D Snake Robot

En el año 2003 Hashimoto del Tokyo Institute of Technology en 2003 desarrolló

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

un robot capaz de moverse en 3 dimensiones (41), este consiste de una cabeza y varios módulos idénticos, cada modulo tiene una articulación vertical en el centro y 2 articulaciones horizontales en los extremos, además un par de ruedas pasivas en el eje de la articulación vertical. Para controlar el robot se implementó un sistema de control de 3D en tiempo real utilizando un sistema externo de visión estéreo que pasa los datos a un ordenador encargado de calcular los ángulos de inclinación de cada articulación, estos datos se envían vía WLAN a un ordenador abordo del robot que se encarga de procesarlos y enviar los comandos de posición a cada modulo.

- AMPHIBOT I y II

Cresspi en la Escuela Politécnica Federal de Laussane (Suiza) desarrolló el robot AMPHIBOT I en el año 2004 (42), se trata de un robot planar que está compuesto por varios módulos de un grado de libertad cada uno. Cada modulo cuenta con un micro controlador, un motor, una batería y está completamente sellado para permitir su funcionamiento en el agua. Adicionalmente es posible añadirle ruedas pasivas en la base para facilitar el desplazamiento en tierra. Una versión mejorada de este robot es el AMPHIBOT II (43) desarrollado por el mismo laboratorio en el año 2006. Esta nueva versión adicionalmente a las características del primer diseño, incluye varias mejoras mecánicas, mejoras en la impermeabilidad, comunicación wireless y un ordenador embarcado que está ubicado en la cabeza del robot y se utiliza para realizar cómputo en línea de las trayectorias.



**Figura 3.14: AMPHIBOT II** - Desarrollado en la EPFL, es un robot anfibio con capacidad de procesamiento de abordo y comunicación inalámbrica

- ACM R5

En el año 2005 Hirose presentó el robot ACM R5 (44) uno de los robots serpiente más avanzado que se han construido hasta la actualidad, se trata de un robot

anfibia capaz de moverse en 3 dimensiones, es un diseño modular en el que cada modulo tiene articulaciones universales de 2 GDL, tiene un diseño mecánico externo con palas para el movimiento en el agua y ruedas pasivas en los extremos de las mismas para el movimiento en tierra por lo que puede pasar del agua a la tierra sin ninguna modificación, cuenta además con un avanzado sistema de control, en cada modulo se encuentra una CPU, baterías, motores y las líneas de comunicación con los otros módulos. Cada modulo reconoce automáticamente su orientación y posición lo cual facilita el intercambio de partes.

- CMU Modular Snakes

El laboratorio de Biorobotics de la Universidad de Carnegie Mellon es también uno de los más importantes focos de desarrollo para robots serpiente modulares y reconfigurables, en los últimos años han desarrollado diversos modelos incrementando gradualmente las capacidades de sus robots, uno de los últimos diseños es el robot Greasefire desarrollado en el año 2007 (45), este robot está compuesto por varios módulos idénticos de un grado de libertad cada uno que se ubican rotados 90° uno del otro para poder realizar movimientos en las tres dimensiones, para este diseño realizaron modificaciones a servomotores genéricos para poder acomodarlo a la estructura diseñada para cada modulo, utilizan dos tipos de recubrimiento uno solo en los puntos críticos para el desplazamiento y otro que cubre toda la superficie del robot lo cual les permite trabajar en diversos entornos, utiliza un bus RS485 para comunicar los módulos con un repetidor que a su vez se comunica con el computador principal externo al robot, se realiza control de la posición de los motores con un PID y adicionalmente se regula el consumo de corriente en cada motor. Cada módulo cuenta con un encoder magnético para reemplazar el potenciómetro comúnmente utilizado en los servomotores y permitir que el motor gire libremente.

### 3.2.4. Robots Serpentinicos

Robots o mecanismos de múltiples segmentos que, a pesar de tener estructuras mecánicas en forma de serpiente, tienen sistemas de propulsión basados en ruedas, patas u orugas activas.

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---



**Figura 3.15:** CMU ModSnakes - El robot es capaz de realizar diversos *gaits*, entre ellos ondulación lateral, serpenteo lateral, concentrina, además puede escalar por tuberías o subir escaleras.



### 3.2.4.1. Características

Estos robots son normalmente más complejos en construcción que los robots serpiente aunque el número de GDL es en general inferior, los grados de libertad en este caso no se utilizan para desplazarse sino para orientar el robot, evitar obstáculos, alcanzar objetivos, etc. Para lograr estos movimientos además de los sistemas de propulsión pueden utilizar articulaciones activas o utilizar los propios movimientos con articulaciones pasivas.

Los sistemas de propulsión más utilizados son las ruedas activas debido a la facilidad en la implementación, sin embargo para entornos más complejos utilizan sistemas de orugas u otros sistemas que les permitan operar sobre terrenos más complejos.

Los robots de este tipo utilizan en su mayoría articulaciones de dos o en algunos casos tres grados de libertad debido a que sus diseños están orientados a moverse por entornos altamente complejos y requieren alta movilidad y capacidad de adaptación, normalmente no tienen un elevado número de grados de libertad ya que al tener sistemas alternos de propulsión no necesitan muchas articulaciones para adaptarse al terreno, evitar obstáculos o alcanzar objetivos.

En caso de utilizar articulaciones activas, en su mayoría se utilizan motores eléctricos, pero también existen algunos diseños con mecanismos neumáticos que brindan un alto torque, muy útil en este tipo de robots, estos robots utilizan alimentación por baterías que cargan normalmente a bordo, cargan también mini compresores en caso de utilizar accionamientos neumáticos ya que usualmente no tienen conexiones externas por cables.

A diferencia de los robots serpiente estos normalmente no son modulares por lo que se utilizan sistemas de control a bordo centrales para todos los accionamientos, dependiendo del nivel de autonomía del robot se puede tener sistemas de tele operación o cálculo de trayectorias en sistemas externos, utilizando comunicación inalámbrica.

Los sistemas de control de estos dispositivos normalmente van a bordo teniendo una o varias CPUs, aunque es usual que utilicen un ordenador externo para realizar control de alto nivel o tele operación del robot.

### 3.2.4.2. Desarrollos más significativos

- NTUA Robotic Snake

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

En 1997, Migadis de la Universidad Nacional Técnica de Atenas (46) desarrolló este robot que está compuesto por 3 módulos, cada uno con 2 articulaciones, en total son 7 eslabones conectados por 6 articulaciones de rotación, en el primer eslabón pueden ponerse instrumentos o otros elementos necesarios para realizar diversas tareas, tiene 3 juegos de ruedas activas una por cada módulo que permiten el moverse y cambiar de forma al mismo tiempo, Utiliza motores DC diferentes para las articulaciones de cada módulo, en el segundo módulo están las ruedas activas, se realizó el cálculo de la cinemática directa necesaria para ubicar correctamente el robot en cada momento

- GMD Snake 2

El GMD Snake 2 fue desarrollado en el año 1999 (47) en el *German National Research Center for Information Technology*, se trata de una evolución del GMD Snake, esta vez desarrollaron un robot propulsado por ruedas con el objetivo de realizar tareas prácticas, utilizaron articulaciones universales para unir las 10 secciones, cada una de ellas es como un cilindro de aluminio con huecos para los sensores, tiene 5 sensores IR de distancia por cada módulo, además 2 motores DC para controlar la posición de las articulaciones y 1 más para mover las ruedas, tiene la electrónica integrada en cada módulo con un procesador y un manejador de bus CAN, puede ser alimentado con un cable externo o cargar las baterías en un módulo adicional en la cola

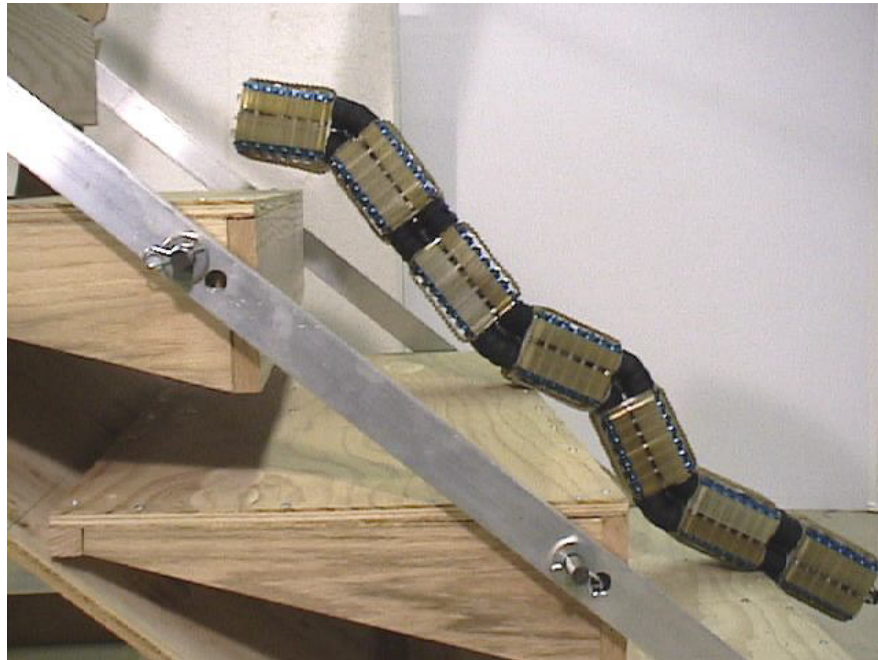


**Figura 3.16: GMD Snake 2** - Robot serpentino desarrollado como evolución del modelo tipo serpiente GMD Snake, tiene 10 secciones articuladas con ruedas accionadas por motores eléctricos y capacidad para diversos sensores

- OmniTread OT-4

En 2007 Borenstein de la universidad de Michigan desarrolló el robot OmniTread OT-4 (48), este robot serpentino es también la evolución de un diseño previo el

OmniTread OT-8 (49). El OT- 4 tiene 7 segmentos y 6 articulaciones de 2 GDL cada una, cada modulo es un cubo recubierto en su exterior por bandas dentadas que al moverse permiten al robot desplazarse hacia adelante, son actuadas por un único motor en el segmento central. Las articulaciones son manejadas por actuadores neumáticos que les brindan potencia y estabilidad. Utiliza un sistema bidireccional de comunicaciones inalámbricas para enviar datos de los sensores al control y señales del joystick de control al robot. Utiliza dos placas, una para manejar la alimentación y otra para controlar los elementos y realizar la comunicación.



**Figura 3.17: OmniTread OT-4** - El robot es capaz de realizar diversos *gaits*, entre ellos ondulación lateral, serpenteo lateral, concentrina, además puede escalar por tuberías o subir escaleras.

### 3.2.5. Consideraciones Finales

La tabla 3.1 muestra que se han logrado grandes avances en el desarrollo de este tipo de robots, en la última década se han incrementado notoriamente el trabajo en esta línea y los resultados son muy prometedores, sin embargo algunos aspectos de la

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

Nombre	Tipo	Actuador	GDL	Velocidad	Tamaño	Año
Omegabot	Oruga	SMA	3	5mm/s	ND	2009
Pneumatic Inchworm	Oruga	Neumático	1	50mm/s	70mm	2007
Microbot	Oruga	Eléctrico	2	250 mm/s	60mm	2006
Inchworm Robot	Oruga	Eléctrico	4	12.5mm/s	252mm	2000
Inchworm Prototype	Oruga	Neumático	3	5.3mm/s	195mm	2002
Per. Crawling Rob.	Gusano	Neumático	4	0.75 mm/s	95mm	2003
EWM	Gusano	Neumático	3	2.2 mm/s	83mm	1994
Per. M.I.P. Robot	Gusano	SMA	6	0.22mm/s	ND	2011
Underground Rob.	Gusano	Eléctrico	12	9mm/s	0.3m	2009
Art. Earthworm	Gusano	SMA	4	0.22mm/s	50mm	2004
ACMIII	Serpiente	Eléctrico	20	400mm/s	2m	1972
NTUA Rob. Snake	Serpentino	Eléctrico	20	ND	1.65 m	1996
S5	Serpiente	Eléctrico	64	ND	ND	1999
GMD Snake 2	Serpentino	Eléctrico	20	ND	1.5m	1999
ACM R3	Serpiente	Electrico	20	ND	1.75m	2001
AMPHIBOT I	Serpiente	Eléctrico	7	35mm/s	0.56m	2004
Snake Robot	Serpiente	Eléctrico	12	ND	0,92m	2004
ACM R5	Serpiente	Eléctrico	18	400mm/s	1,75 m	2005
AMPHIBOT II	Serpiente	Eléctrico	7	40mm/s	0.772 m	2006
OmniTread OT-4	Serpentino	Eléctrico	12	1.5m/s	0,94m	2007
Greasefire	Serpiente	Eléctrico	16	ND	1,16m	2007
Snake Robot	Serpiente	Eléctrico	20	270mm/s	1,8 m	2008

**Cuadro 3.1: Resumen de Desarrollos** - Características más relevantes de los desarrollos presentados en este capítulo.

construcción y operación están aún por resolver, un primer reto consiste en la necesidad de aumentar la capacidad de cómputo a bordo para eliminar la necesidad de una CPU externa para procesar las trayectorias y realizar el control de alto nivel, ya que esto implica tener un cordón umbilical conectado al sistema o tener un sistema de comunicaciones inalámbricas con un alto ancho de banda, y cualquiera de las dos opciones no permite que el robot opere en entornos reales, para solucionar esto es necesario un progreso tanto en la miniaturización de los sistemas de cómputo como en la optimización y mejora de los algoritmos de control y generación de trayectorias.

Otro aspecto necesario para sacar los robots de los laboratorios es aumentar su velocidad y capacidad de actuación, a diferencia de los robots con ruedas que pueden desplazarse a altas velocidades con niveles de control buenos, los sistemas de locomoción de los robots ápodos no permiten que se mueva o evite obstáculos rápidamente.

Adicionalmente es necesario el desarrollo de patrones de movimiento que sean independientes de terreno en el que se desplaza el robot o hacer que el robot pueda cambiar fácilmente de un patrón de movimiento a otro sin necesidad de una re-programación completa, también hay que estudiar la forma de utilizar los obstáculos o elementos del entorno como puntos de apoyo para mejorar la velocidad en el movimiento del robot.

Otro inconveniente de estos robots es su limitada capacidad de llevar carga útil, debido a que todo su cuerpo está lleno de accionamientos y sistemas, quedan pocos espacios para llevar cargas, para solucionar este inconveniente hay que pensar en nuevos diseños mecánicos de las partes que permitan tener más compartimentos para carga o sensores.

Finalmente uno de los mayores inconvenientes es la alimentación, debido a la baja eficiencia en los patrones de movimiento y al alto número de accionamientos, el consumo de potencia es muy elevado y esto restringe el tiempo de operación, y cargar muchas baterías hace que el peso del sistema aumente y a la vez la capacidad de carga disminuya.

No obstante los inconvenientes presentados, los robots serpiente son una línea de investigación muy interesante debido a las grandes ventajas que brindan y eso se ve reflejado en el elevado número de grupos de investigación alrededor del mundo que están trabajando en estos sistemas, lo cual brinda grandes expectativas respecto a las capacidades que tendrán en un futuro.

### 3. LOCOMOCIÓN ÁPODA ARTIFICIAL

---

## 4

# Actuadores Para la Locomoción Ápoda

### 4.1. Actuadores o Músculos Artificiales

El movimiento en la gran mayoría de los animales utiliza músculos como motores para realizar todos sus movimientos, los músculos son actuadores lineales, compuestos por fibras, que generan trabajo y calor a partir de energía química y se controlan mediante impulsos eléctricos. Estos actuadores no solamente tienen una capacidad de generar potencia superior a la de cualquier elemento del mismo tamaño creado por el hombre, sino que pueden actuar como frenos, amortiguadores, resortes o transmisiones.

Los músculos solamente pueden ejercer fuerza de contracción por tanto las articulaciones de los animales son operadas por un conjunto de varios músculos dispuestos de forma tal que permitan el movimiento en las direcciones deseadas, siendo necesario siempre que haya antagonismo entre un par de músculos, esto es cuando uno se comprime el antagonista se relaja y viceversa.

En el ámbito de la industria se conoce como músculos artificiales a un tipo de actuadores lineales neumáticos, pero para este trabajo consideramos como músculo artificial a cualquier mecanismo o combinación de ellos que sea capaz de reproducir el comportamiento de los músculos, es decir cualquier elemento capaz de generar un movimiento en el sistema al que está acoplado a partir de la conversión de uno o varios tipos de energía en energía mecánica lineal o rotacional. El objetivo de un músculo artificial al igual que cualquier otro actuador mecatrónico es controlar posiciones, movimientos, aceleraciones

## 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

o fuerzas.

Se han desarrollado diversos tipos de actuadores con el propósito de emular el comportamiento de los músculos, estos actuadores pueden ser clasificados utilizando diferentes parámetros, en la sección 4.1.1 se presentan estas clasificaciones (50).

### 4.1.1. Clasificación de los Actuadores

Como se mencionó previamente los actuadores siempre realizan una transformación de energía en potencia mecánica, por tanto, una forma de clasificación está dada por el sentido en el que fluye la energía, es decir por el signo de dicha potencia, de esta manera se tiene:

- **Actuadores Semi-Activos** Son aquellos en los que la potencia generada es menor que cero, esto significa que estos actuadores solamente pueden oponerse al movimiento, es decir, actúan como controladores de la energía disipada a consecuencia de la interacción mecánica. Ejemplos de actuadores de este tipo son aquellos basados en fluidos electro-reológicos o magneto-reológicos, y su aplicación más común es el control de vibraciones.
- **Actuadores Activos** Estos actuadores pueden generar potencia mayor que o menor que cero, es decir que pueden generar movimiento o actuar como frenos activos, incrementando o disminuyendo el nivel de energía del sistema controlado según sea el caso. La gran mayoría de los actuadores descritos en este capítulo son de este tipo.

Otra manera de clasificar los actuadores es tomando como criterio el tipo de movimiento que son capaces de realizar, de esta manera se tienen dos tipos de actuadores:

- **Actuadores Traslacionales** Tienen como salida potencia mecánica traslacional, definida por una velocidad lineal  $v$  y una fuerza  $F$ , estos actuadores solo son capaces de realizar movimientos lineales.
- **Actuadores Rotacionales** Tienen como salida potencia mecánica rotacional, definida por una velocidad angular  $w$  y un torque o par  $T$ , pueden realizar giros continuos o por pasos dependiendo de la configuración y el tipo de actuador.



Esta clasificación depende en gran medida del arreglo geométrico en que se configure el actuador, además es posible convertir un actuador prismático en un rotacional y viceversa, por estas razones los dos tipos de actuadores pueden ser obtenidos utilizando casi cualquier tipo de transductor.

Un tercer criterio para la clasificación de los actuadores está dado por la rigidez del mismo, entendida como la capacidad de soportar fuerzas tanto de tensión como de compresión, y por tanto su capacidad de transmitir movimiento en una o dos direcciones, en este caso se tiene:

- **Actuadores Suaves** Están hechos de materiales transductores configurados en láminas delgadas o en alambres, por tanto solo pueden actuar en una dirección y contrarrestando fuerzas de tensión, es decir, son actuadores uni-direccionales.
- **Actuadores Duros** Estos actuadores tienen una estructura rígida y por lo tanto pueden soportar fuerzas de tensión y también de presión, son actuadores bi-direccionales.

Finalmente es posible clasificar los actuadores de acuerdo al tipo de energía que utilizan como entrada para obtener potencia mecánica, según esta clasificación se tiene:

- **Energía Eléctrica** Son la gran mayoría de los actuadores, están basados en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, ya sea por flujo de corriente o por la presencia de campos eléctricos. Este es un proceso que puede ser bi-direccional en algunos casos, adicionalmente las variaciones en las características eléctricas del actuador pueden ser utilizadas como sensores. Algunos actuadores de este tipo son los motores eléctricos, o los actuadores piezoeléctricos.
- **Energía Térmica** Son actuadores que se activan por cambios en su temperatura, convirtiendo de esta manera la energía calórica en energía mecánica, algunos ejemplos de estos actuadores son las SMA, los polímeros termo activados o los actuadores de expansión térmica.
- **Energía Magnética** Utilizan materiales que modifican su comportamiento ante la presencia de un campo magnético, al igual que los actuadores eléctricos algunos de estos pueden convertir también energía mecánica en energía magnética, son

## 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

ejemplos de este tipo los MSMA (*Magnetic Shape Memory Alloys*), los actuadores basados en fluidos magneto-reológicos o los actuadores magneto-expansivos.

- **Energía Química** Estos actuadores están basados en la respuesta de algunos materiales a la presencia de ciertos químicos en su entorno, un ejemplo son algunos polímeros electro-activos húmedos.
- **Energía por Presión de Fluidos** La presión de un fluido en una cámara es utilizada para generar fuerza en el actuador, en esta categoría se encuentran los actuadores neumáticos e hidráulicos.

Un gran porcentaje de los actuadores que se utilizan actualmente se basa en una combinación de estos principios, así por ejemplo aunque el principio de las SMA está basado en un cambio en la temperatura, este cambio se logra haciendo fluir corriente eléctrica por la aleación y generando calor por el efecto de *Joule*, otro ejemplo claro son los motores DC que generan un campo magnético a partir del flujo de corriente.

En la sección 4.2 se describen con más detalle los actuadores más comúnmente utilizados, que han sido desarrollado en el ámbito industrial y directamente o con algunas modificaciones han sido utilizados en robótica bio-inspirada, sin embargo el desarrollo de nuevas tipos de actuadores es una línea de investigación en la que diversos grupos están trabajando. Estas nuevas formas de obtener movimiento y su aplicación a la robótica es tratada en la sección 4.3.

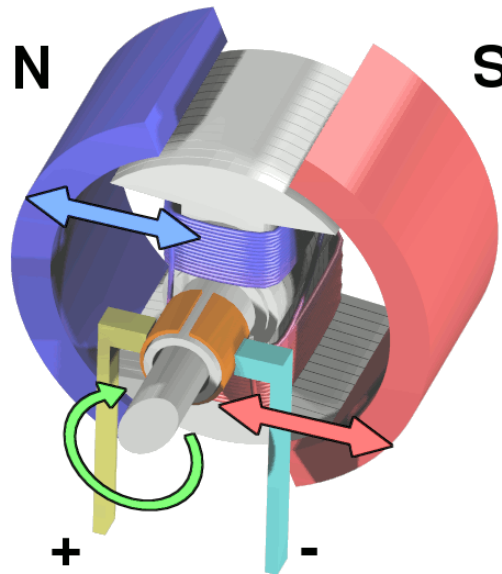
### 4.2. Actuadores tradicionales

Los actuadores tradicionales han sido ampliamente utilizados desde el siglo pasado en casi cualquier ámbito y sus aplicaciones son innumerables, en esta categoría encontramos tres tecnologías principales, los Motores Electromagnéticos, los actuadores Neumáticos y los actuadores Hidráulicos(51)

#### 4.2.1. Motores Electromagnéticos

Existen varios tipos de motores electromagnéticos, como motores síncronos, motores de inducción, o motores de corriente continua, pero todos se basan en la interacción entre

dos campos magnéticos uno el rotor y otro en el estator del motor, uno de los campos magnéticos se genera utilizando imanes permanentes, electroimanes o por inducción, mientras el otro se controla con el paso de corriente a través de bobinas.



**Figura 4.1: Motor Electromagnético** - Principio de funcionamiento de un motor eléctrico con un rotor de dos polos y imán permanente en el estator.(52)

La relación entre el torque generado por un motor electromagnético y su masa depende del diseño electromagnético, es decir, de la distribución del campo magnético en el espacio entre el rotor y el estator, mientras que la relación entre la potencia y la masa de un motor depende además de la potencia eléctrica que se le suministre por lo que puede ser controlado variando el ciclo útil de la misma.

Los motores electromagnéticos pueden funcionar directamente acoplados a la carga, pero en la mayoría de los casos esta configuración no brinda el par necesario, por esta razón se utilizan cajas reductoras para incrementar la potencia de salida del actuador a coste de disminuir la velocidad del movimiento. Para realizar un control del movimiento ya sea en velocidad o posición de estos actuadores es posible acoplar un encoder a su eje de giro.

Este es el tipo de actuadores más ampliamente utilizado por su versatilidad y la facilidad en el control que brindan, por tanto es posible encontrarlos en casi cualquier

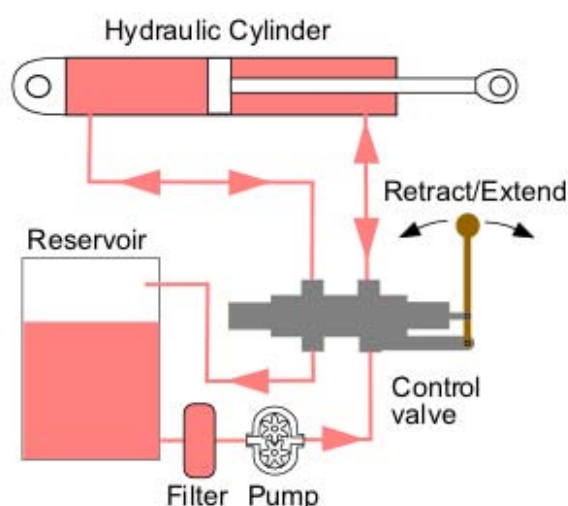
## 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

entorno o aplicación, desde robots industriales hasta micro-robots, los robots ápodos no son la excepción ya que un gran número de los desarrollos de este tipo basa su funcionamiento en motores electromagnéticos como se puede observar en la tabla 3.1

### 4.2.2. Hidráulicos

Los actuadores hidráulicos convierten la energía brindada por fluidos líquidos a presión en energía mecánica ya sea por rotación o movimiento lineal, es probablemente una de las técnicas más antiguas de movimiento controlado ya que sus orígenes se remontan al siglo III A.C. (53), pero su uso se potenció al utilizarse en combinación con bombas hidráulicas y servovalvulas actuadas por mecanismos electromagnéticos.



**Figura 4.2: Esquema de un Actuador Hidráulico** - Circuito hidráulico abierto, utiliza una bomba para hacer fluir el líquido continuamente y mantener la presión sobre el pistón, al cambiar de posición la válvula se modifica la presión y se produce movimiento.(54)

Estos actuadores se utilizan cuando se requiere una fuerza muy alta así como una alta velocidad en el movimiento, debido a que el fluido hidráulico es altamente incompresible, la fuerza o presión aplicada se transmite inmediatamente, es independiente de la distancia entre la entrada y la salida y no requiere una transmisión mecánica externa. Una ventaja adicional de estos actuadores sobre los motores electromagnéticos es su capacidad de mantener la posición sin necesidad de incrementar el consumo de

energía, ya que simplemente cerrando una válvula se mantiene la presión en el sistema y es posible mantener la posición del actuador fija, incluso si existe una carga externa sobre el actuador.

La desventaja de estos actuadores es la dificultad que presentan a la hora de realizar un control preciso de su posición, adicionalmente necesitan varios componentes adicionales para su funcionamiento principalmente un tanque que actúa como reservorio del fluido, por esta razón las aplicaciones de estos actuadores se centran en robots industriales o en maquinaria pesada y su uso en robots bio-inspirados o ápodos no es común, sin embargo un robot serpiente desarrollado en noruega (55) utiliza actuadores de este tipo para moverse.

### 4.2.3. Neumáticos

Los actuadores neumáticos funcionan con un principio similar al de los Hidráulicos, es decir utilizan la energía presión de un fluido para generar potencia mecánica, pero estos utilizan como fluido aire en lugar de líquido. La expansión del aire hace que un pistón se mueva en la dirección deseada, este pisto es normalmente un disco o un cilindro que se utiliza para transferir la fuerza hacia la carga.

Los actuadores neumáticos son más silenciosos y rápidos que los hidráulicos, además no requieren reservorios y son menos sensibles a fugas debido a que operan a presiones menores, sin embargo su capacidad de carga es más limitada. Los actuadores neumáticos tienen su mayor campo de acción en la industria, en procesos de control de calidad, etiquetado, embalaje, herramientas, etc.

## 4.3. Actuadores Emergentes

### 4.3.1. Músculos Neumáticos de McKibben

Un tipo de actuadores especialmente útil en robots bio-inspirados son los músculos neumáticos de McKibben, se trata de actuadores traslacionales con capacidad de contraerse y expandirse de manera similar a la de un músculo natural, para ello utilizan una red de fibras que se comprime al incrementar la presión neumática en su interior y se relaja cuando esta disminuye, diferentes variaciones de este concepto se han desarrollado en los últimos años.

## 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---



**Figura 4.3: Músculo Artificial Neumático** - El actuador se comprime cuando la presión neumática en su interior es incrementada y se relaja cuando esta se reduce. Este actuador se utilizó para el desarrollo de un robot bipedo(56)

Una aplicación muy interesante de músculos neumáticos es la *Shadow Dexterous Hand* (57), Diferentes robots ápodos también se han desarrollado utilizando diseños ad-hoc de músculos neumáticos, la mayoría de ellos enfocados a aplicaciones de endoscopia debido a que son seguros y bio-compatibles.

### 4.3.2. Actuadores Piezoeléctricos

El efecto Piezoeléctrico es una modificación de la polarización de un material dieléctrico cuando se lo somete a un estrés mecánico, este efecto es reversible, es decir cuando se aplica un campo eléctrico el material presenta una deformación mecánica, este efecto en la mayoría de los casos es muy pequeño para ser utilizado directamente por lo que son necesarios arreglos geométricos para generar una potencia mecánica lineal o rotacional suficiente.

Es posible configurar y combinar estos actuadores de diferentes maneras, una primera forma es apilar varios actuadores en la misma dirección y conectarlos en serie para obtener movimiento lineal, otra posibilidad acoplar dos actuadores en paralelo de manera que al activar uno o el otro se logra doblar el actuador en el sentido deseado, otra posibilidad es realizar un arreglo que permita girar un rotor creando de esta manera un motor piezoeléctrico.

Los actuadores piezoeléctricos tienen varias ventajas, la precisión de su movimiento es muy alta, son muy compactos y pueden generar altas fuerzas con un bajo consumo de energía, adicionalmente tienen una velocidad de respuesta muy alta y no son sensibles a la interferencia electromagnética. La mayor desventaja que presentan es la necesidad de voltajes para crear el campo eléctrico requerido lo cual implica el uso de elevadores de

tensión o circuitos similares, además de que la relación entre el tamaño y la compresión del material no es baja y su comportamiento presenta no linealidades por histéresis.

Estos actuadores son utilizados en aplicaciones en las que se requiere un alto nivel de precisión y en la que las distancias son pequeñas al igual que las cargas como en mecanismos de auto-enfoque o zoom en cámaras fotográficas o de vídeo, o en aparatos para calibración, otras aplicaciones han sido desarrolladas para eliminar vibraciones típicamente en instrumentos de aeronaves, en robots ápodos no se encuentran muchas aplicaciones de estos actuadores, pero se ha planteado un modelo para un robot gusano utilizando estos actuadores (58)

### 4.3.3. Polímeros Electro-Activos

Los polímeros electro-activos o EAP por sus siglas en inglés son actuadores basados en la respuesta mecánica de algunos polímeros a estímulos químicos o eléctricos, estas respuestas pueden ser muy diferentes entre sí dependiendo del material y el principio físico explotado y por tanto se producen diversos tipos de movimientos, además la mayoría de estos actuadores se basan en tecnologías aún en desarrollo tanto en el área de materiales como en las técnicas de control.

Los actuadores basados en EAP pueden ser clasificados en dos grandes grupos, polímeros iónicos y polímeros dieléctricos.

#### 4.3.3.1. Polímeros Electro-Activos Iónicos

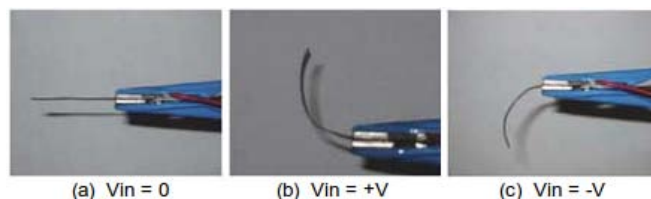
Son también conocidos como polímeros húmedos, su funcionamiento está basado en el desplazamiento de los iones dentro del material, para su funcionamiento requieren niveles bajos de tensión, sin embargo la intensidad debe ser alta para permitir el flujo de iones, en este grupo de materiales encontramos los Compuestos Iónicos Metal-Polímero (IMPC), los Polímeros Conductivos y los Gel Electro-Sensibles.

**IMPC** Los compuestos IMPC son estructuras compuestas basadas en membranas de intercambio iónico y capas delgadas de metal (50), el principio de su funcionamiento está basado en la atracción electrostática entre el ánodo y los iones catódicos generada por la presencia de un campo eléctrico, estos actuadores tienen una alta capacidad de deformación y presentan impedancias bajas.

#### 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

La principal limitación de estos actuadores es que solamente tienen la capacidad de doblarse lo cual limita en gran medida la fuerza que pueden ejercer, adicionalmente requieren un entorno húmedo para funcionar ya que si el polímero se seca el actuador dejará de funcionar.



**Figura 4.4: Polímero Electro-Activo Iónico** - Se muestra el funcionamiento del actuador, (a) La tensión aplicada es cero. (b) La tensión aplicada es positiva. (c) La tensión aplicada es negativa (59)

**Gel Electro-Sensibles** Un Gel polímero es una estructura entrecruzada de polímeros disueltos en un solvente, el proceso de actuación está directamente relacionado con la capacidad de estas estructuras para absorber o repeler el solvente en respuesta a estímulos externos y de esta manera mover cargas externas.

Estos materiales pueden ser muy diferentes entre sí, las características y capacidades dependen del tipo de polímero y de el entorno en el que sea utilizado, las aplicaciones desarrolladas son experimentales, y algunas de ellas están en el campo de los robots ápodos. (60)

**Polímeros Conductivos** Son actuadores basados en materiales que contienen una estructura de polímeros conjugados, estos polímeros tienen la capacidad de modificar su estructura mecánica cuando se someten a cambios en sus propiedades electroquímicas.

Los polímeros conductivos más utilizados son basados en polypyrrole (PPy) polyaniline (PANi), el mecanismo de actuación está basado en la absorción o expulsión de iones y de solvente por parte de la estructura molecular y su consecuente cambio en los niveles de oxidación cuando se someta a estímulos electroquímicos, esto tiene como consecuencia un cambio en la rigidez y en el volumen del material.



### 4.3.3.2. Polímeros Electro-Activos Eléctricos

Son también conocidos como EAP secos, responden modificando sus propiedades mecánicas ante la presencia de un campo eléctrico externo, presentan varias ventajas sobre los EAP húmedos, al no requerir el flujo de masa en su interior tienen una respuesta en tiempo más rápida, no requieren un entorno húmedo para su funcionamiento lo cual facilita su empaquetado y acople a otros elementos y presentan alta estabilidad química. La desventaja de estos actuadores es que requieren unos niveles de tensión muy elevados ( $>1.000V$ ) debido a que su deformación es cuadráticamente dependiente del campo eléctrico. Existen dos tipos principales de estos actuadores:

**Elastómeros Dielectricos** Los elastómeros dieléctricos son condensadores que cambian su capacitancia cuando se les aplica una tensión elevada, el campo eléctrico crea una interacción entre las cargas eléctricas conocidas como fuerzas de *Maxwell*, estas fuerzas hacen que el dieléctrico comprima su altura y expanda su área logrando deformaciones mayores al 100% y que pueden llegar a ser del 300% cuando se realiza pretensión del material. (61)



**Figura 4.5: Robot MERBot** - Es un robot que utiliza articulaciones de 2 GDL basadas en elastómeros dieléctricos en forma de rollo para cada una de sus seis patas (62)

Son los EAP más utilizados, y los únicos en los que se ha desarrollado un producto comercial y varias aplicaciones en robots bio-inspirados(63), al igual que algunos experimentos en robots ápodos.

## 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

**Polímeros Electro-Dinámicos** Están basados en materiales polímeros ferro-eléctricos que se caracterizan por reorientar sus dipolos eléctricos ante la presencia de un campo eléctrico presentando un comportamiento similar al de los materiales piezoeléctricos, logran una deformación mecánica de hasta el 5 %, pero requieren una densidad de energía mayor que los elementos piezoeléctricos.

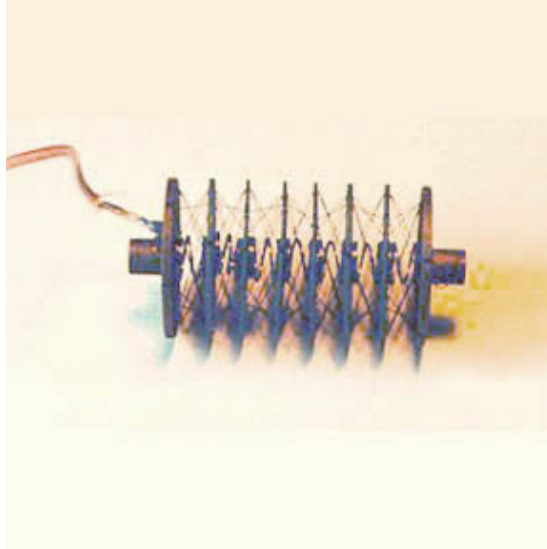
### 4.3.4. Aleaciones con memoria de forma SMA

Las aleaciones con memoria de forma son un tipo de aleaciones metálicas que, luego de una deformación mecánica, son capaces de recuperar su forma original cuando su temperatura supera un valor determinado. Estas aleaciones tienen dos fases estables, una fase de alta temperatura o austenita en la cual la aleación se tiene un comportamiento rígido gracias a una composición atómica cúbica y una fase de baja temperatura llamada martensita en la cual la aleación es flexible gracias a una composición atómica menos simétrica.

Se han desarrollado muchas aleaciones que presentan este comportamiento, sin embargo la aleación más ampliamente utilizada es la de Nickel-Titanium (NiTi), debido a su que tiene una buena estabilidad en temperatura, una excelente resistencia a la corrosión y su capacidad de compresión es de hasta un 8 % (64).

Como se mencionó en la sección 4.1.1, las SMA utilizan el principio de *Joule* para incrementar su temperatura, lo cual permite activar el actuador utilizando corriente eléctrica, lo cual facilita su uso y control, adicionalmente la aleación de NiTi incrementa su resistividad eléctrica en aproximadamente un 20 % cuando cambia de la fase austenita a la martensita(51) y haciendo uso de esta característica es posible tener una realimentación del comportamiento del actuador.

Es posible someter estas aleaciones a un proceso de “reprogramación” que consiste en cambiar la forma original, para esto es necesario incrementar la temperatura de la aleación hasta un valor límite dependiente del tipo de aleación, al realizar este proceso la SMA recordará la forma que se le haya programado, esto es muy útil para crear herramientas SMA como pinzas o separadores, y es utilizado también para crear muelles SMA y de esa manera obtener deformaciones del orden de 300 % o incluso mayores, esto a costa de una pérdida en la fuerza del actuador.



**Figura 4.6: Actuador Lineal SMA** - Actuador lineal SMA desarrollado por la universidad McGill de Montreal. Tiene una configuración que le permite obtener una deformación del 100 % (65)

Una de las mayores desventajas de estos actuadores es su no linealidad, las aleaciones NiTi pueden tener una histéresis entre 25 y 35°C.(64), otro inconveniente es la lenta respuesta en tiempo que presenta debido a tratarse de un sistema térmico.

Las SMA han encontrado aplicaciones en muy diversos ámbitos, en la medicina se utilizan como pinzas, en aparatos de ortodoncia e incluso con el objetivo de remover coágulos de sangre (66), en robots bio-inspirados también se encuentra un gran número de aplicaciones (67) al igual que en robots ápodos (68).

#### 4.4. Análisis Comparativo de los distintos tipos de actuadores

Para facilitar el análisis se creó una tabla, resumiendo los tipos de actuadores mencionados en este capítulo, en esta tabla se muestra las categorías a las que cada actuador pertenece de acuerdo con las diferentes clasificaciones realizadas en la sección 4.1.1, debido a que todos los actuadores mencionados son activos dicha clasificación no se incluye en la tabla.

La comparación entre los actuadores se puede realizar teniendo en cuenta diversas

#### 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

Actuador	Flujo de Fuerza		Energía	Movimiento	
	Suaves	Duros		Tras.	Rot.
M. Electromagnéticos		X	El./Mag.	X	X
Hidráulicos		X	Fluidos	X	X
Neumáticos		X	Fluidos	X	X
Musculos de McKibben	X		Fluidos	X	
Piezoeléctricos		X	Eléctrica	X	X
Gel Polímero	X		El./Ter./Quim.	X	
IMPC	X		Eléctrica		Doblarse
Pol. Conductivos	X		Eléctrica		Doblarse
Elas. Dieléctricos	X		Eléctrica	X	
Pol. Electro-Dinámicos	X		Eléctrica	X	
SMA	X		El. Ter.	X	X

**Cuadro 4.1: Resumen de Actuadores** - Se muestra un resumen de los actuadores analizados en este capítulo y su clasificación, se utilizaron algunas abreviaciones. (El. - Eléctrica; Mag. - Magnética; Ter. - Térmica; Quim. - Química)

características de un actuador, debido a la diversidad de actuadores y las grandes diferencias entre unos y otros, no es posible en todos los casos realizar comparaciones directas o incluir todos los tipos de actuadores en cada parte del análisis.

**Desarrollo de la Tecnología y Controlabilidad** En cuanto al desarrollo de la tecnología se refiere, claramente los actuadores tradicionales tienen una gran ventaja sobre los emergentes, debido a que son utilizados en diversos ámbitos y han sido desarrollados durante más de un siglo, en el caso de los motores eléctricos se ha llegado prácticamente al límite de las posibilidades de este tipo de actuadores (51). Las técnicas de control en los actuadores tradicionales están muy bien desarrolladas, y se ponen a prueba diariamente en un sinnúmero de aplicaciones, los motores electromagnéticos permiten alcanzar niveles de precisión muy elevados, tanto en posición como en velocidad o aceleración, los actuadores neumáticos presentan inherentemente algunos inconvenientes en cuanto al control de posición, pero se han implementado diversas técnicas para solucionar estos inconvenientes, mientras los actuadores hidráulicos se ubican en un punto intermedio.

En el caso de los actuadores emergentes, la tecnología más desarrollada y con más

#### 4.4 Análisis Comparativo de los distintos tipos de actuadores

---

aplicaciones es la de los actuadores piezoeléctricos, este efecto es conocido desde el siglo XIX y se ha logrado obtener una amplia variedad de actuadores, tanto en niveles de deformación como en potencia, precisión o tiempos de respuesta. Los actuadores SMA siguen en la línea, se han desarrollado ampliamente durante las últimas décadas y han encontrado aplicación en diversos ámbitos, sin embargo tienen un amplio margen de mejora sobretodo para resolver los inconvenientes de no linealidad que presentan, así como otros inconvenientes de modelado y control.

Los actuadores basados en polímeros electro-activos en cambio son una tecnología que está aún en desarrollo tanto desde el punto de vista de desarrollo de materiales y estudio de fenómenos de transducción como en los métodos de control necesarios para activarlos, y posiblemente sea necesario esperar varios años antes de tener aplicaciones completamente funcionales y controlables.

**Recorrido Máximo** <sup>1</sup> El recorrido máximo o deformación máxima de un actuador es el máximo desplazamiento que puede lograr un actuador, y es aplicado solamente a los actuadores lineales, en este aspecto los actuadores tradicionales tienen también una clara ventaja, en el caso de los electromagnéticos incluso es posible obtener desplazamiento ilimitado.

En cuanto a los actuadores emergentes, el desplazamiento va ligado a la capacidad del actuador de deformarse y por tanto se expresa como un porcentaje de su tamaño  $L$ , en este aspecto los actuadores basados en elastómeros dieléctricos son los que brindan un mayor desplazamiento que puede ser superior al 100 %, los actuadores basados en SMA también pueden alcanzar grandes deformaciones cuando se utilizan en modo de muelle, aunque por construcción solo logran deformaciones de hasta un 5-8 %, los actuadores piezoeléctricos son los que menor capacidad de deformación tienen, en algunos casos limitada a un 0.1 - 0.4 %.(50)

**Respuesta en Tiempo** La respuesta en tiempo de un actuador  $f$ , es definida por la máxima frecuencia a la que puede trabajar, este parámetro varía dependiendo, en general los actuadores de menor tamaño pueden funcionar a mayores velocidades, pero esta relación varía dependiendo del tipo de actuador que se utilice.

---

<sup>1</sup>En la terminología inglesa se conoce como *stroke*

#### 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---

Los actuadores en los que requieren un transporte de masa para su funcionamiento tienen una mejor respuesta en frecuencia, en los actuadores tradicionales los basados en fluidos, principalmente los hidráulicos funcionan en general a mayores velocidades que los motores electromagnéticos, en los actuadores emergentes, los piezoeléctricos son los que mejor frecuencia presentan y son considerados como tecnologías rápidas ya que alcanzan frecuencias mayores a los 100Hz. Las SMA en cambio solo pueden funcionar a bajas frecuencias menores a 1hz, las otras tecnologías están entre estos dos valores. (50)

**Escalabilidad** La posibilidad de miniaturizar los actuadores es una característica muy importante en el diseño de un robot ávido, por tanto es útil comparar el comportamiento de los actuadores cuando se varía su tamaño. Todos los tipos de actuadores tienen una relación entre su tamaño  $L$  y sus factores de mérito, estas relaciones pueden mantenerse o no de un tipo de actuador a otro.

La fuerza máxima  $F$  que los actuadores pueden ejercer es una característica solamente de los actuadores lineales, este factor es proporcional al cuadrado del tamaño  $F \propto L^2$  en todos los actuadores estudiados.

La deformación o *stroke* es otro caso en el que todos los actuadores guardan una relación similar con el tamaño ya que la deformación es siempre proporcional al tamaño del actuador  $S \propto L$

La relación entre el tamaño la respuesta en tiempo presenta un comportamiento diferente dependiendo del tipo de actuador, para los actuadores que no requieren flujo de corriente o de iones como los actuadores piezoeléctricos, o los elastómeros dieléctricos la respuesta en tiempo es inversamente proporcional al tamaño  $F \propto f^{-1}$ , mientras que para aquellos en los que no si hay flujo de corriente o de iones, como los SMA o los EAP iónicos la respuesta en tiempo es inversamente proporcional al cuadrado del tamaño del actuador, lo cual quiere decir que son mucho más sensibles a la escalabilidad.

En el cuadro 4.2 se muestra un resumen de las comparaciones hechas en este apartado.

#### 4.4 Análisis Comparativo de los distintos tipos de actuadores

---

<b>Actuador</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>Rec. Máx.</b>	<b>Res. Tiempo</b>	<b>Escal.</b>
M. Electromagnéticos	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Hidráulicos	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Medio
Neumáticos	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	Medio
Musculos de McKibben	Alto	Medio	Alto	Medio
Piezoeléctricos	Alto	Bajo	Muy Alto	Alto
Gel Polímero	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alto
IMPC	Bajo	Medio	Bajo	Muy Alto
Pol. Conductivos	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alto
Elas. Dieléctricos	Medio	Alto	Medio	Alto
Pol. Electro-Dinámicos	Bajo	Bajo	Medio	Alto
SMA	Alto	Bajo	Bajo	Muy Alto

**Cuadro 4.2: Comparación de Actuadores** - Se muestra una comparación de los los actuadores analizados en este capítulo, de acuerdo a los items descritos en este apartado, con valoraciones de: Muy Alto, Alto, Medio y Bajo. Se utilizaron algunas abreviaciones. (Rec. Max. - Recorrido Máximo; Res.- Respuesta; Escal.- Escalabilidad)

#### 4. ACTUADORES PARA LA LOCOMOCIÓN ÁPODA

---



## 5

# Diseño de Una Arquitectura de Control Para Robots Ápodos

Una parte principal en el desarrollo de un robot es la arquitectura de control. Esta debe ser una combinación de software y hardware que permita su correcto funcionamiento y control, maximizando de esta forma las capacidades del robot. En este capítulo se describe el diseño e implementación de una arquitectura de control para robots ápodos. Se inicia con una visión general del esquema de la arquitectura y luego se hace una descripción cada nivel, explicando en cada caso las funcionalidades y el hardware/software que lo soporta.

### 5.1. Esquema de la arquitectura

La arquitectura se diseña con el objetivo de ser aplicada a un robot ápodo genérico, en el que se puedan implementar los diferentes modos de marcha de estos robots, ya sea en modo autónomo o teleoperado. Es una arquitectura jerárquica multinivel, que combina la potencia de cálculo de un ordenador con la velocidad y portabilidad de un microprocesador.

La arquitectura está compuesta por tres niveles, la capa superior es la estación de control que funciona en un ordenador de escritorio o portátil, se trata de un software que permite generar los patrones de movimiento, descargar los mismos y realizar control teleoperado del sistema. En la capa intermedia tenemos un módulo maestro que funciona en un microcontrolador de altas capacidades, este módulo se comunica con el

## 5. DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL PARA ROBOTS ÁPODOS

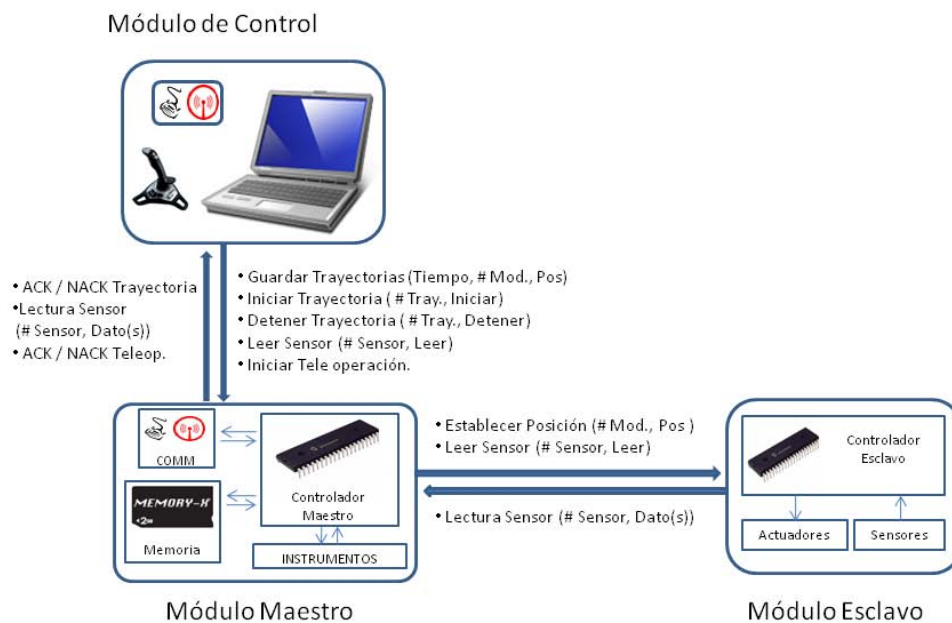
computador de control, almacena los patrones de movimiento generados por este y se encarga de enviar las señales de control a los módulos esclavos. Los módulos esclavos funcionan en un microcontrolador sencillo, se encargan de recibir los comandos del módulo maestro y controlar los actuadores y sensores de cada módulo del robot. Aunque la arquitectura es genérica, la descripción que se realiza de la misma está basada en la implementación realizada para un robot serpiente.



**Figura 5.1: Arquitectura de Control** - La arquitectura está compuesta por un módulo de control, un módulo maestro y varios módulos esclavos, se muestran las características más generales de cada uno

En la fig. 5.1 se muestra un esquema general de la arquitectura diseñada, así como los componentes de cada módulo. El módulo de control se comunica únicamente con el módulo maestro, esta comunicación se realiza por medio de un cable o de manera inalámbrica utilizando un esquema de comunicación serial punto a punto. El módulo maestro se comunica además de con los módulos esclavos esta comunicación se hace por medio de un bus I<sup>2</sup>C. Los módulos esclavos solo se comunican con el módulo maestro,

es decir no hay comunicación directa entre los mismos. En la fig. 5.2 se muestran los mensajes que genera y envía cada nivel de la arquitectura. A continuación se explicará con más detalle cada parte tanto en la parte de hardware como en las funcionalidades de software.



**Figura 5.2: Mensajes Enviados por Cada Nivel** - Se muestran los mensajes generados y enviados por cada nivel de la arquitectura

### 5.1.1. Control en PC

La capa de control de alto nivel y generación de trayectorias se implementa sobre un ordenador, ya sea de escritorio o portátil, se trata de un programa escrito en lenguaje `c#` que cuenta con las varias funcionalidades integradas en una interfaz gráfica que se muestra en la fig. 5.3 y se describen con mayor detalle a continuación.

**Iniciar Conectividad** La primera parte del software se encarga de realizar la conectividad con el módulo maestro, en el caso más simple se trata simplemente de

## 5. DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL PARA ROBOTS ÁPODOS



**Figura 5.3: Interfaz Gráfica de Usuario** - La interfaz gráfica mostrada es utilizada para el robot serpiente, está dividida según las funcionalidades descritas

seleccionar el número del puerto serial, las configuraciones que se utilizarán para realizar la comunicación y un control para abrir o cerrar el puerto.

**Generación de Trayectorias** A partir del estudio del movimiento que se desee implementar, se obtienen algoritmos que permiten conocer la posición deseada de cada actuador en cada instante de tiempo durante la ejecución de una forma de movimiento específica. Este algoritmo es implementado en esta parte del programa y se obtiene como resultado una tabla dónde se tiene el número de actuador, el instante de tiempo y la posición deseada en ese instante. Los algoritmos utilizados para generar estas trayectorias se explican en el capítulo 6

Algunos parámetros deben ser definidos para todas las trayectorias, ya que son independientes del tipo de movimiento implementado y además definen el tamaño de la tabla; El número de cuerpos define la cantidad de actuadores que tiene el robot y por tanto la cantidad de columnas de la tabla; El tiempo de muestreo define el incremento temporal entre cada fila de la tabla, es dependiente de la velocidad

Tiempo (s)	Actuador 1	Actuador 2	Actuador n
0	0	10	20
0.01	10	20	30
0.02	20	30	40
0.03	30	40	50
.	.	.	.
.	.	.	.

**Cuadro 5.1: Ejemplo de Trayectoria** - Se muestra la estructura de una trayectoria simulada, las columnas representan los actuadores y en cada fila se guardan la posición deseada en ese tiempo, los datos se codifican entre 0 y 255 para que puedan ser almacenados en un solo byte en la memoria del módulo maestro

del actuador y del controlador y debe ser además un múltiplo de 10 milisegundos que es la frecuencia mínima a la que el módulo maestro puede trabajar; La duración del movimiento define el final de la tabla, generalmente se implementa el tiempo necesario para realizar una zancada completa optimizando el espacio de almacenamiento en el módulo maestro.

**Almacenar o Restaurar trayectorias** Las trayectorias generadas pueden ser almacenadas en un archivo de texto plano para ser luego exportadas o incluso almacenadas directamente en una memoria externa, de igual manera es posible a partir de un archivo guardado cargar en memoria una tabla de posiciones generada previamente con el objetivo de enviarla al módulo maestro.

**Enviar Trayectoria** Una vez generada la trayectoria, es necesario enviarla al módulo maestro, para esto es necesario que la comunicación se haya establecido previamente. La comunicación se hace vía serial. En primera instancia se envían una serie de datos de cabecera: tiempo de muestreo, cantidad de cuerpos, cantidad de datos, luego se envían los datos byte a byte. El módulo maestro responde con un ACK además de un identificador de cada trayectoria enviada, este debe ser guardado para posteriormente realizar el control del robot.

**Enviar Comandos** Para controlar el funcionamiento del robot es necesario enviar algunos comandos, estos pueden ser: Ordenes de iniciar o detener el movimiento; Entrar en modo teleoperado; Solicitar información de sensores o instrumentos.

## 5. DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL PARA ROBOTS ÁPODOS

---

Estas ordenes son enviadas por el puerto de comunicaciones con la misma estructura utilizada para las trayectorias, es decir, datos de cabecera seguidos de los comandos y en caso de ser necesario datos extra.

**Recepción de Datos** Es necesario también recibir una serie de datos desde el módulo maestro, estos datos pueden ser confirmación de comandos recibidos, de solicitudes de datos o de trayectorias almacenadas. En la versión actual del programa estos datos se muestran en crudo, pero será posible interpretar estos datos para presentarlos de manera más amigable al usuario.

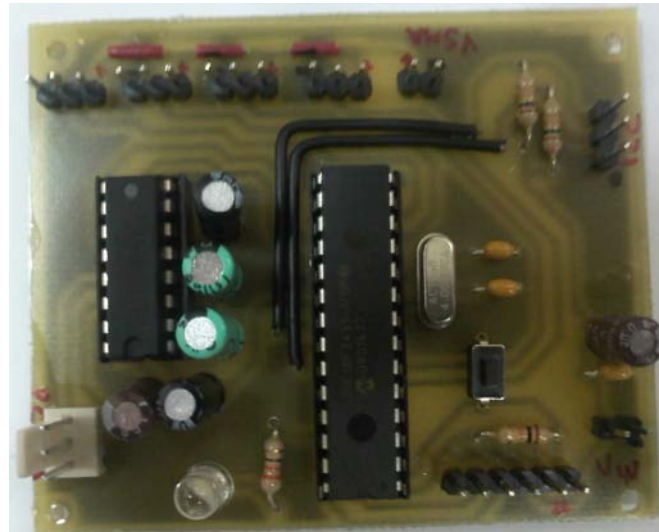
### 5.1.2. Módulo maestro

El módulo maestro es un software escrito en lenguaje Pic-C para un microcontrolador de gama media PIC18F2455. Se realizó un diseño de una tarjeta electrónica para este módulo en la que además del controlador se tiene el puerto de comunicaciones, el bus i<sup>2</sup>c, y puertos adicionales para control directo de instrumentos, actuadores o sensores. la fig. 5.4(a) muestra una imagen de la tarjeta diseñada y su esquema electrónico se muestra en la fig. 5.4(b). Las funcionalidades del módulo maestro se describen a continuación.

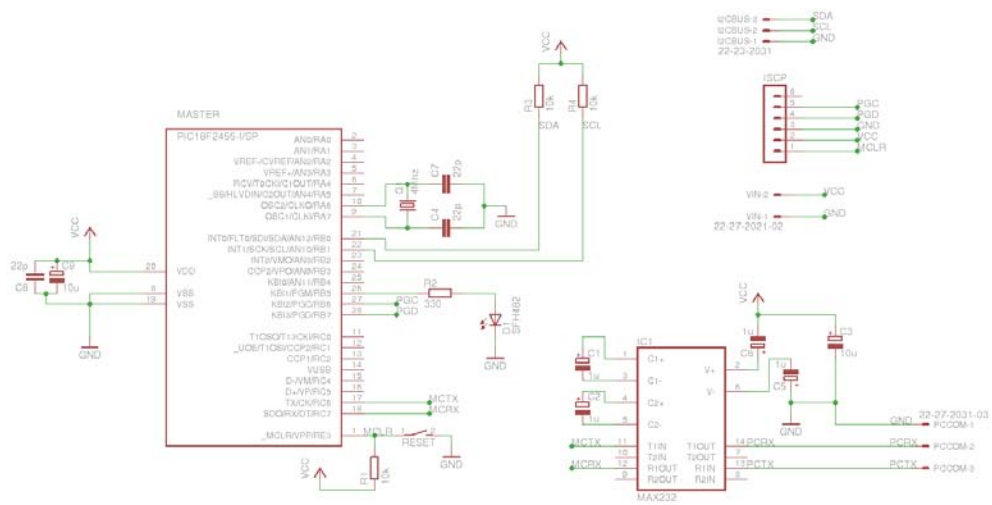
**Comunicación Serial** La tarjeta implementa un puerto de comunicación serial full dúplex RS232 capaz de conectarse directamente con el puerto de un ordenador, por este medio se reciben una serie de datos compuestos por una cabecera que define que tipo de dato se está recibiendo seguida de los datos propiamente dichos, este canal también es utilizado para enviar comandos de aceptación (ACK) o de error, así como identificadores de trayectorias almacenadas, lecturas de sensores, etc.

**Almacenamiento de Trayectorias** Cuando se recibe una orden de almacenar una trayectoria, seguida de los parámetros necesarios descritos en la sección 6.4.2, se asigna un identificador a esta trayectoria y se almacenan los datos en la memoria flash, ya sea interna del microcontrolador o en un dispositivo externo, al finalizar el almacenamiento retorna vía serial el identificador de la trayectoria y la dirección inicial de memoria donde fue almacenada. La cantidad de trayectorias que puede almacenar el módulo está condicionada por varios factores: número de cuerpos del robot, duración de la trayectoria, frecuencia de muestreo y por supuesto el

## 5.1 Esquema de la arquitectura



(a) Imagen de la Tarjeta



(b) Esquema Electrónico

**Figura 5.4: Tarjeta Electrónica del Módulo Maestro** - La tarjeta electrónica del módulo maestro, compuesta por el controlador PIC18f2455, un puerto de comunicación serial, un bus i<sup>2</sup>c, un conector de programación ICSP, y varios conectores para instrumentos o actuadores

## 5. DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL PARA ROBOTS ÁPODOS

---

tamaño de la memoria. En el módulo desarrollado para el robot serpiente es posible almacenar alrededor de 20 trayectorias diferentes.

**Ejecución de trayectorias** Una vez almacenada al menos una trayectoria, se habilita la posibilidad de iniciar la ejecución. Cuando se recibe el comando de iniciar el movimiento seguido de un identificador de trayectoria válido, el controlador inicia el movimiento. Primero se cargan en la memoria las constantes del movimiento, principalmente el número de cuerpos y la cantidad de datos, se envía inicialmente un comando para que los actuadores tomen una posición inicial y a partir de ese momento las posiciones que deben tomar en cada instante de tiempo obtenidas de los datos almacenados en memoria. Al llegar al final de la trayectoria esta vuelve a empezar desde el principio, realizando de esta manera un movimiento continuo. La velocidad del bus i<sup>2</sup>c hace posible enviar los comandos de posición a todos los esclavos en un tiempo menor al establecido en el muestreo de la trayectoria, ya que es mucho mayor a la de los actuadores.

**Teleoperación** La teleoperación del robot es posible de almacenando previamente varias trayectorias, cada una de estas debe generar en el robot un comportamiento específico, por ejemplo: avanzar en línea recta, girar a derecha o izquierda, retroceder, etc. Luego se entra en modo de ejecución de trayectorias y se envían comandos para cambiar a una u otra trayectoria según las ordenes recibidas desde el mando.

**Ejecución de comandos** El módulo maestro puede recibir otros comandos por parte del ordenador, estos deben ser definidos de acuerdo a los elementos periféricos del mismo, en caso de contar con sensores o actuadores será posible solicitar lecturas o información de los mismos, o ordenar acciones en caso de tener actuadores adicionales a los utilizados para locomoción como motores para cámaras o pinzas, para esto la tarjeta diseñada cuenta con una serie de puertos de entrada/salida digital adicionales.

### 5.1.3. Módulos esclavos

Los módulos esclavos son los encargados de controlar los actuadores y sensores en cada cuerpo del robot. Su funcionamiento es muy sencillo y está completamente sujeto

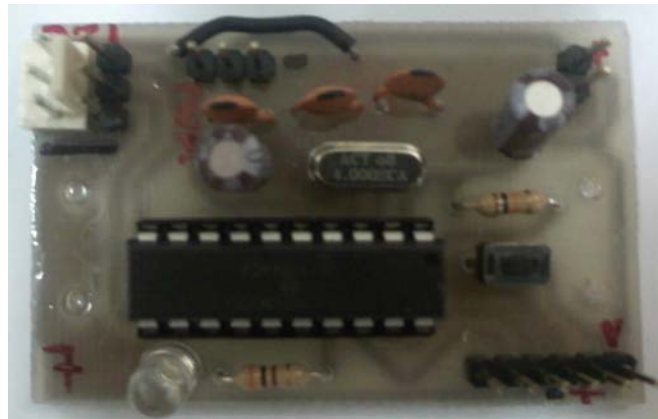


a los comandos recibidos por parte del módulo maestro a través del bus  $i^2c$ . El modulo maneja un PWM para controlar un actuador, el cual debe ser calibrado previamente estableciendo un valor máximo y uno mínimo de acuerdo a las restricciones mecánicas del robot. Cuando se recibe una señal de control (entre 0 y 255) para el actuador es procesada y traducida al valor de PWM correspondiente teniendo en cuenta la calibración previa, un ciclo de control de bajo nivel puede ser implementado dependiendo del tipo de actuador utilizado, también es posible agregar una etapa adicional de potencia. En caso de solicitar datos de sensores conectados se realiza la lectura de los mismos y se envía el dato. La fig. 5.5(a) muestra una imagen de la tarjeta desarrollada para estos módulos, el componente principal es un microcontrolador de gama baja PIC18F13K22, el esquema electrónico de la misma se muestra en la fig. 5.5(b). Es necesaria una de estas tarjetas por cada cuerpo del robot.

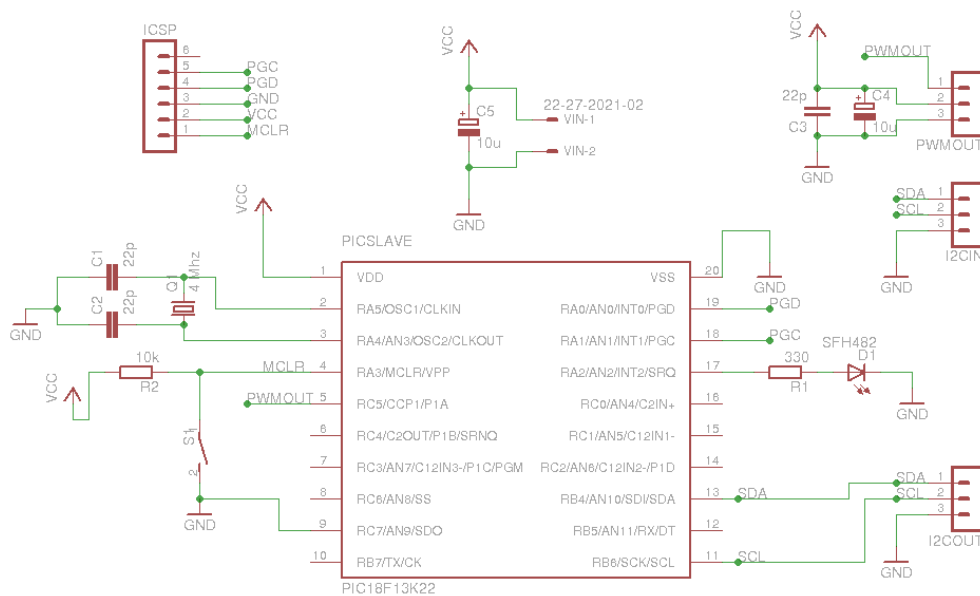
## 5.2. Aplicaciones

La arquitectura descrita en esta sección puede ser utilizada en cualquier robot en el que sea posible generar previamente las posiciones deseadas de cada actuador, es de gran utilidad para este estudio ya que puede ser utilizada para generar cualquier tipo de locomoción ápada independientemente del tipo de actuador que se utilice o del tamaño del robot desarrollado. Como parte del desarrollo de esta tesis se implementó en un robot serpiente de 12 GDL con servomotores como actuadores, y en gusano 4 GDL con actuadores basados en SMA, para los que fue necesario agregar una etapa de potencia adicional en los módulos esclavos. Se estudia su posible aplicación otros desarrollos del grupo de robótica y cibernética, entre ellos unen un pez robótico con 4 GDL y actuadores SMA y en un robot gusano de 12 GDL.

## 5. DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL PARA ROBOTS ÁPODOS



(a) Imagen de la Tarjeta



(b) Esquema Electrónico

**Figura 5.5: Tarjeta Electrónica de los Módulos Esclavos** - La tarjeta electrónica de los módulos esclavos, compuesta por el controlador PIC18F13K22, un bus i<sup>2</sup>c, un conector de programación ICSP utilizado también para conectar sensores

## 6

# Generación y Evaluación de Trayectorias Para Robots Ápodos

El objetivo de este capítulo es describir los algoritmos utilizados para la generación de trayectorias en robots ápodos, y su implementación en software de simulación. Luego de una introducción el capítulo se divide en tres secciones de acuerdo a los métodos de locomoción descritos en la sección 2.3.1. En cada modo de marcha se describe un modelo de robot utilizado, el algoritmo para generar las trayectorias y se muestran los resultados obtenidos en la simulación.

### 6.1. Introducción

La implementación de los modos de marcha estudiados en este trabajo requiere que en cada caso se genere un algoritmo que permita obtener la posición deseada de los actuadores del robot en cada instante de tiempo. Estos algoritmos deben adaptarse a las características del robot sobre el que se estén implementando, por tanto es necesario tener un modelo del mismo, en este modelo se debe definir el número de cuerpos o de actuadores, el tipo de cada actuador, el tiempo de muestreo entre otros parámetros. Una vez definido el modelo el algoritmo puede generar uno o varios modos de marcha para el mismo robot, y cada modo de marcha tendrá un comportamiento diferente dependiendo de las características del entorno sobre el que se mueva y las propias características del robot.

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

Para poder comparar los métodos de locomoción implementados es necesario recordar algunas variables cinemáticas. Como se explicó en capítulos anteriores existen tres variables cinemáticas independientes: Largo de la zancada  $l$ ; Tiempo de estancia  $t_s$  y Tiempo de progresión  $t_p$ . A partir de estas variables se pueden obtener otras:

La velocidad de avance, está dada por la relación entre el largo de la zancada y el tiempo total de la misma:  $v = \frac{l}{t_p+t_s}$ .

La frecuencia de la zancada es uno sobre el tiempo total de la zancada:  $f_z = \frac{1}{t_p+t_s}$ .

La velocidad de progresión es la velocidad a la que puede avanzar el robot sin tener en cuenta el tiempo de estancia:  $v_p = \frac{l}{t_p}$ .

El ciclo útil es la relación entre el tiempo de progresión y el tiempo total de la zancada:  $DC = \frac{t_p}{t_p+t_s}$ .

También se define la eficiencia del movimiento  $\eta$  como la relación entre el avance real del robot con el máximo avance puntual durante una zancada, por tanto está ligado a la capacidad del modo de marcha de evitar el retroceso.

Con el objetivo de probar los diferentes métodos de locomoción, se han modelado tres robots utilizando la herramienta de simulación de robots móviles Webots<sup>TM</sup>(69), en cada caso se definieron las características del robot y de sus actuadores para que sean similares entre sí. Este entorno de simulación facilita tanto la implementación de los robots y sus correspondientes algoritmos como la obtención de los resultados ya que es posible extraer directamente posiciones u orientaciones del robot en cada momento.

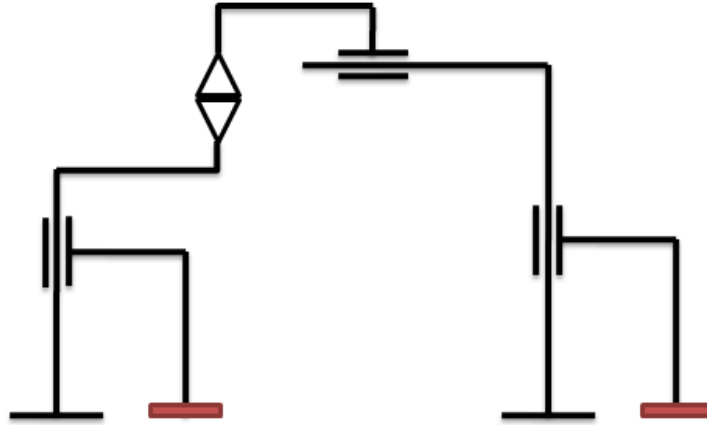
A continuación se detalla los modelos y algoritmos implementados en cada modo de marcha, así como los resultados obtenidos en el software de simulación.

### 6.2. Arrastre con dos puntos de Apoyo

#### 6.2.1. Modelo Del Robot

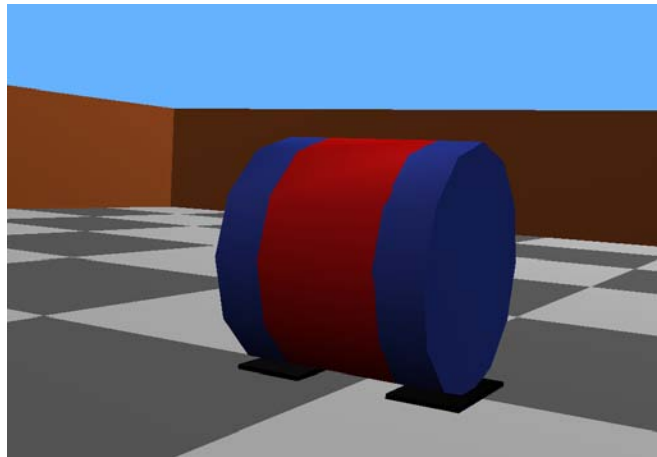
El robot modelado para este modo de marcha tiene cuatro grados de libertad: Dos en los extremos para activar o desactivar el sistema de sujeción a la superficie, uno en el centro que permite expandir o contraer el cuerpo del robot y uno más en el centro, pero sobre el eje vertical del robot, para determinar su orientación, un sencillo diagrama del modelo de robot utilizado se muestra en la figura 6.1

El robot se modeló como un cuerpo cilíndrico de 2.5 cm de largo y 5 cm de diámetro. La deformación máxima es del 100 % y se alcanza en 1.6 segundos. Los puntos de apoyo



**Figura 6.1: Diagrama del Robot Oruga** - Se muestra un diagrama del robot oruga diseñado. Los bloques rojos representan un sistema de sujeción (i.e. Material con alto coeficiente de rozamiento) de cada extremo

de cada extremo se simulan con con una almohadilla con coeficiente de rozamiento alto. En la figura 6.2 muestra una captura de la simulación.



**Figura 6.2: Simulación en Webots™ del Robot Oruga** - Se muestra una captura de pantalla del robot oruga simulado en Webots™

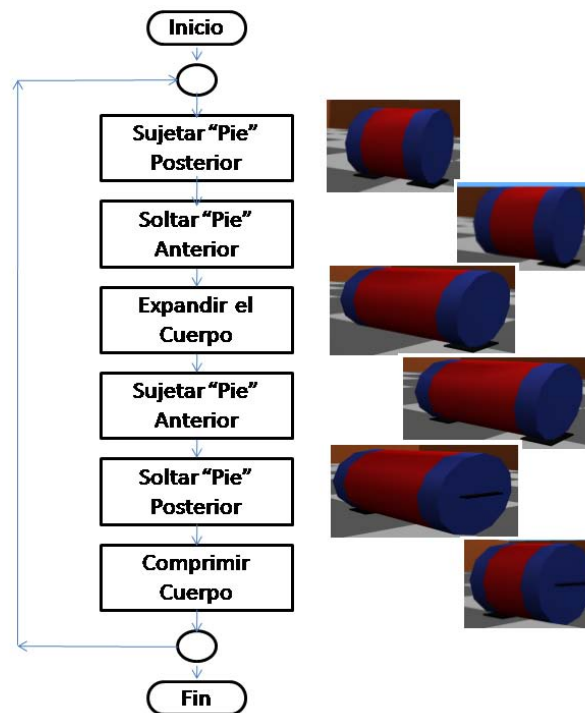
### 6.2.2. Generación de la Trayectoria

Para este robot se diseñó una trayectoria inspirada en el movimiento de las sanguijuelas descrita en la sección 2.2.6. Esta trayectoria solamente le permite avanzar en

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

línea recta ya la articulación rotacional no se mueve durante el avance del robot. En caso de ser necesario que el robot realice un giro es necesario enviar un comando adicional especificando el ángulo de deseado.



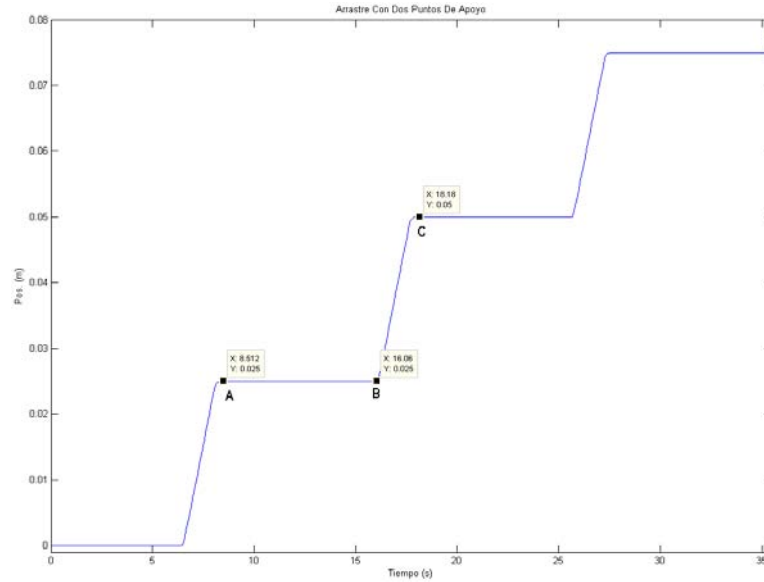
**Figura 6.3: Diagrama de Flujo del Algoritmo para el Arrastre con dos puntos de Apoyo** - Se muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para generar las trayectorias de este modo de marcha, en cada paso se muestra una imagen del robot simulado ejecutando el algoritmo

El diagrama de flujo del algoritmo, así como las imágenes del robot en cada paso, se muestran en la figura 6.3. La implementación del algoritmo se hizo en lenguaje C, utilizando el entorno de desarrollo de Webots<sup>TM</sup>. Debido a la simplicidad de este algoritmo los parámetros cinemáticos del movimiento están determinados por las características de los actuadores más que por la configuración del algoritmo.

### 6.2.3. Evaluación de la Trayectoria

Para evaluar la trayectoria se ejecutó la trayectoria y se extrajo la posición del robot en cada instante, un análisis de los datos obtenidos permite encontrar las características cinemáticas del movimiento.

## 6.2 Arrastre con dos puntos de Apoyo



**Figura 6.4: Resultado Modo de Marcha: Arrastre con dos puntos de Apoyo -** Posición del Robot durante 3 zancadas. Se etiquetan los puntos importantes de una zancada para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

En la figura 6.4 se muestra el resultado del modo de marcha, a partir de esta gráfica, teniendo en cuenta el tiempo y posición en los puntos A, B y C, es posible obtener directamente las tres variables cinemáticas independientes y a partir de estas las demás variables cinemáticas.

- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = 0,05m - 0,025m; \quad l = 0,025m \quad (6.1)$$

- Tiempo de estancia  $t_s$

$$t_s = t_B - t_A; \quad t_s = 16,06s - 8,512s; \quad t_s = 7,548s \quad (6.2)$$

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_C - t_B; \quad t_p = 18,18s - 16,06s; \quad t_p = 2,12s \quad (6.3)$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_C - P_B}; \quad \eta = \frac{0,025m}{0,025m}; \quad \eta = 100\%$$

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

- Velocidad de Avance  $v$

La velocidad de avance del robot es una variable que depende de las anteriores, por lo que utilizando los valores obtenidos en (6.1), (6.2) y (6.3) se encuentra:

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,025m}{7,548s + 2,12s}; \quad v = 2,58mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

La frecuencia de la zancada también se puede obtener a partir de (6.2) y (6.3):

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{7,548s + 2,12s}; \quad f_z = 0,1Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,025m}{2,12s}; \quad v_p = 11,79mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{2,12s}{7,548s + 2,12s}; \quad DC = 21,92\%$$

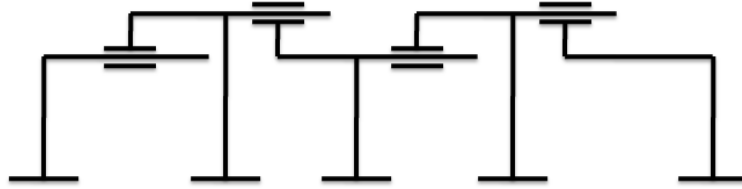
### 6.3. Movimiento Peristáltico

#### 6.3.1. Modelo Del Robot

Se ha simulado un robot gusano de 4 cuerpos o anillos que pueden ser actuados de manera independiente. Cada uno de estos cuerpos simula un segmento de una lombriz de tierra, es decir, un cuerpo cilíndrico de volumen constante que puede contraerse o expandirse longitudinalmente o circularmente. Cuando el segmento se contrae longitudinalmente, el rozamiento entre dicho segmento y la superficie se incrementa con el objetivo de simular la sujeción al sustrato que la lombriz de tierra logra utilizando filamentos retráctiles. Para facilitar el modelo solamente se consideró un movimiento en línea recta, por lo que el robot puede ser modelado como una serie de articulaciones traslacionales.

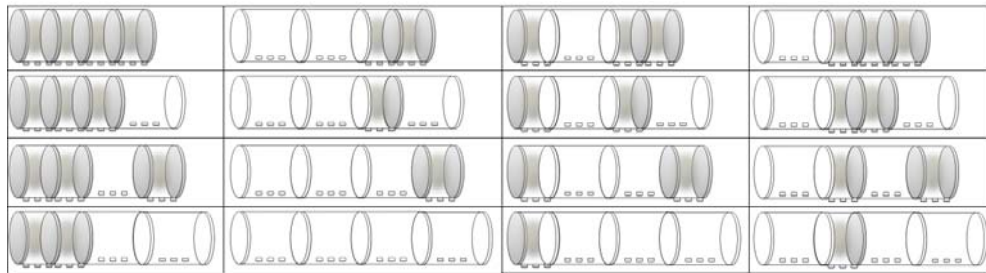
Utilizar un robot de solamente 4 cuerpos permite conocer todas las posibles formas que puede lograr el robot durante su marcha, es decir todas las combinaciones de





**Figura 6.5: Diagrama del Robot Gusano** - Se muestra un diagrama del robot gusano diseñado

contracción y expansión de los segmentos que pueden obtenerse. Teniendo en cuenta que cada segmento solamente puede estar en 2 estados finales (contraído o expandido longitudinalmente al máximo), el cuerpo del robot puede adoptar 16 formas diferentes.



**Figura 6.6: Posibles Estados Finales del Robot Gusano** - Para un robot gusano de 4 cuerpos se pueden obtener 16 estados finales, los cuales se muestran en la figura. Los segmentos comprimidos se muestran sombreados

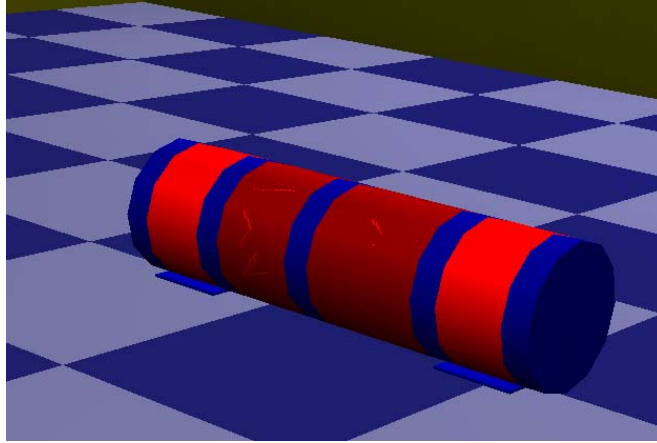
Los cuerpos del robot se simularon en Webots<sup>TM</sup> con características similares a las utilizadas para el robot oruga, es decir cilindros de 2.5 cm de largo y 5 cm de diámetro, con deformación máxima del 100 % que se alcanza en 1.6 segundos. Filamentos retráctiles son simulados en cada segmento del robot utilizando almohadillas con coeficiente de rozamiento alto. A diferencia del robot anterior el movimiento de estas almohadillas no es independiente, está ligado a la compresión del correspondiente segmento.

### 6.3.2. Generación de la Trayectoria

Las trayectorias implementadas en este robot fueron generadas mediante una secuencia de movimientos, es decir una combinación de posiciones que permita reproducir el movimiento peristáltico. Esta secuencia no es única, es decir que es posible encontrar diferentes combinaciones de las posiciones mostradas en la figura 6.6 que permitan

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

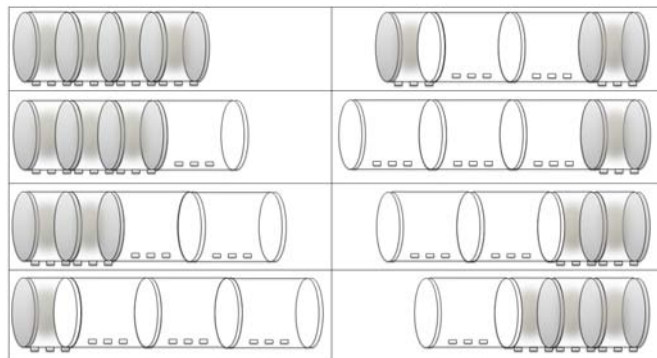
---



**Figura 6.7:** Simulación en Webots™ del Robot Gusano - Se muestra una captura de pantalla del robot gusano simulado en Webots™

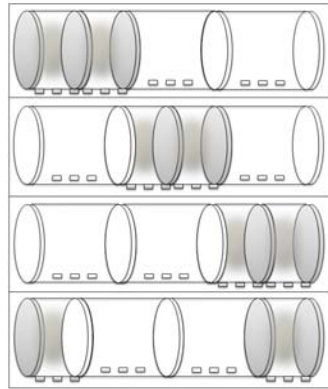
al robot avanzar, cada secuencia representa un modo de marcha diferente y por tanto se analizará independientemente. A continuación se describen los modos de marcha implementados.

- **Expansión Completa** Esta trayectoria está basada en el arrastre con dos puntos de apoyo, se inicia con el cuerpo del robot completamente comprimido, luego se expanden los segmentos uno a uno, al llegar al segmento más posterior del robot, se comprime primero el primer segmento para cambiar el punto de apoyo y luego se comprimen nuevamente todos los segmentos para reiniciar el movimiento, esta secuencia de movimientos se muestra en la figura 6.8



**Figura 6.8:** Modo de Marcha “Expansión Completa” del Robot Gusano - Secuencia de movimientos realizados por el robot gusano en este modo de marcha, los segmentos comprimidos se muestran sombreados

- **Peristáltico** Este modo de marcha está inspirado en el movimiento peristáltico de la lombriz de tierra. Se basa en la transmisión de una onda de compresión desde la parte anterior hacia la parte posterior del robot, la secuencia inicia con los dos primeros segmentos comprimidos, luego la compresión se desplaza hacia los dos segmentos centrales y finalmente llega a los segmentos traseros. La secuencia de movimientos descrita se muestra en la figura 6.9



**Figura 6.9: Modo de Marcha “Peristáltico” del Robot Gusano** - Se muestra la secuencia de movimientos de este modo de marcha, los segmentos comprimidos se muestran sombreados

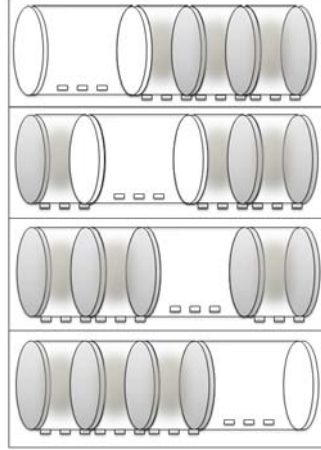
- **Peristáltico Simple** Este modo de marcha es similar al **Peristáltico**, pero en este caso se inicia con un solo segmento expandido que se va moviendo desde la parte anterior a la posterior del robot, manteniendo siempre un solo segmento expandido en cada paso. Esta secuencia de movimientos se muestra en la figura 6.10
- **Sinusoides Desplazadas** En este modo de marcha, es también similar basado al movimiento peristáltico. La diferencia está en que en lugar de tener una compresión lineal de los segmentos, estos se controlan mediante señales sinusoidales con un desfase entre sí. Este modo de marcha está basado en las trayectorias generadas para robots serpiente que se explica con más detalle en la sección 6.4.2.

#### 6.3.3. Evaluación de la Trayectoria

Para la evaluación de los modos de marcha utilizados en este robot, se calcularon las variables cinemáticas independientes a partir de los resultados de las simulaciones,

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---



**Figura 6.10: Modo de Marcha “Peristáltico Simple” del Robot Gusano** - Se muestra la secuencia de movimientos de este modo de marcha, los segmentos comprimidos se muestran sombreados

y a partir de estas las otras variables. Cada modo de marcha descrito en la sección anterior se analizará por separado, mostrando en cada caso la posición de robot durante la ejecución del modo de marcha y sus respectivas variables cinemáticas.

### ▪ Expansión Completa

- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = -0,099m - (-0,149)m; \quad l = 0,05m$$

- Tiempo de estancia  $t_s$

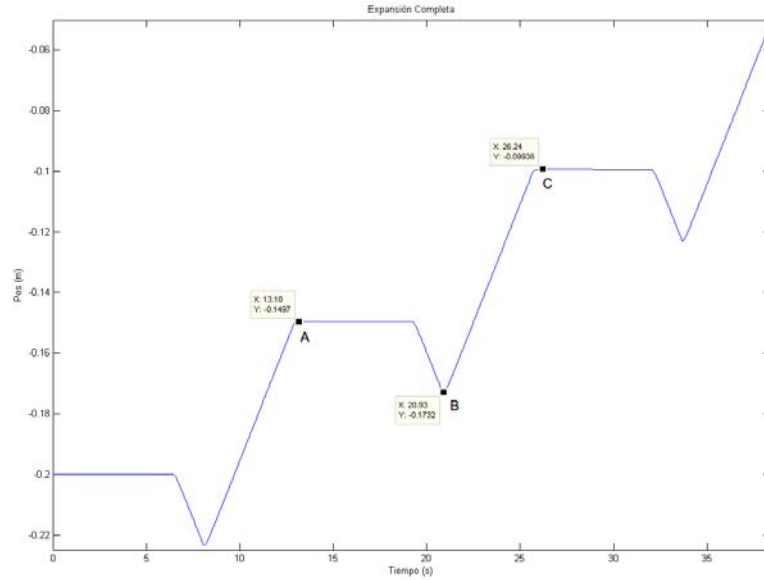
$$t_s = t_B - t_A; \quad t_s = 20,93s - 13,18s; \quad t_s = 7,75s$$

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_C - t_B; \quad t_p = 26,24s - 20,93s; \quad t_p = 5,31s$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_C - P_B}; \quad \eta = \frac{0,05m}{0,074m}; \quad \eta = 68,16\%$$



**Figura 6.11: Resultado Modo de Marcha: “Expansión Completa”** - Posición del Robot durante 3 zancadas. Se etiquetan los puntos importantes de una zancada para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,05m}{7,75s + 5,31s}; \quad v = 3,83mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{7,75s + 5,31s}; \quad f_z = 0,07Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

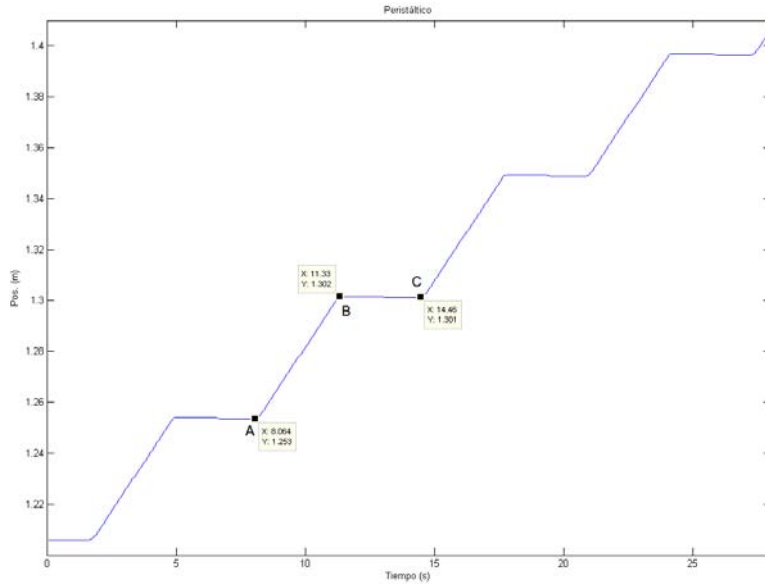
$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,05m}{5,31s}; \quad v = 9,41mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{5,31s}{7,75s + 5,31s}; \quad DC = 40,65 \%$$

#### ■ Peristáltico

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS



**Figura 6.12: Resultado Modo de Marcha: “Peristáltico”** - Posición del Robot durante 4 zancadas. Se etiquetan los puntos importantes de una zancada para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = 1,301m - 0,1253m; \quad l = 0,048m$$

- Tiempo de estancia  $t_s$

$$t_s = t_C - t_B; \quad t_s = 14,46s - 11,33s; \quad t_s = 3,13s$$

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_B - t_A; \quad t_p = 11,33s - 8,064s; \quad t_p = 3,27s$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_B - P_A}; \quad \eta = \frac{0,048m}{0,049m}; \quad \eta = 97,9\%$$

- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,048m}{3,13s + 3,27s}; \quad v = 7,5mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{3,13s + 3,27s}; \quad f_z = 0,15Hz$$

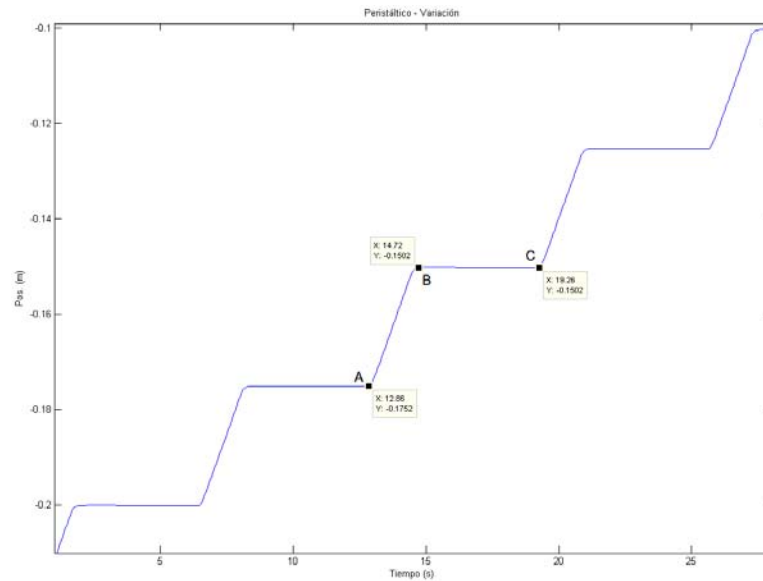
- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,048m}{3,27s}; \quad v = 14,67mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{3,27s}{3,13s + 3,27s}; \quad DC = 51,09 \%$$

■ Peristáltico Simple



**Figura 6.13: Resultado Modo de Marcha: “Peristáltico Simple”** - Posición del Robot durante 4 zancadas. Se etiquetan los puntos importantes de una zancada para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = -0,1502m - (-0,1752m); \quad l = 0,025m$$

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

- Tiempo de estancia  $t_s$

$$t_s = t_C - t_B; \quad t_s = 19,26s - 14,72s; \quad t_s = 4,54s$$

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_B - t_A; \quad t_p = 14,72 - 12,86s; \quad t_p = 1,86s$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_B - P_A}; \quad \eta = \frac{0,025m}{0,025m}; \quad \eta = 100\%$$

- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,025m}{4,54s + 1,86s}; \quad v = 3,9mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{4,54s + 1,86s}; \quad f_z = 0,15Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,025m}{1,86s}; \quad v_p = 13,44mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{1,86s}{4,54s + 1,86s}; \quad DC = 29,06\%$$

### ■ Sinusoides Desplazadas

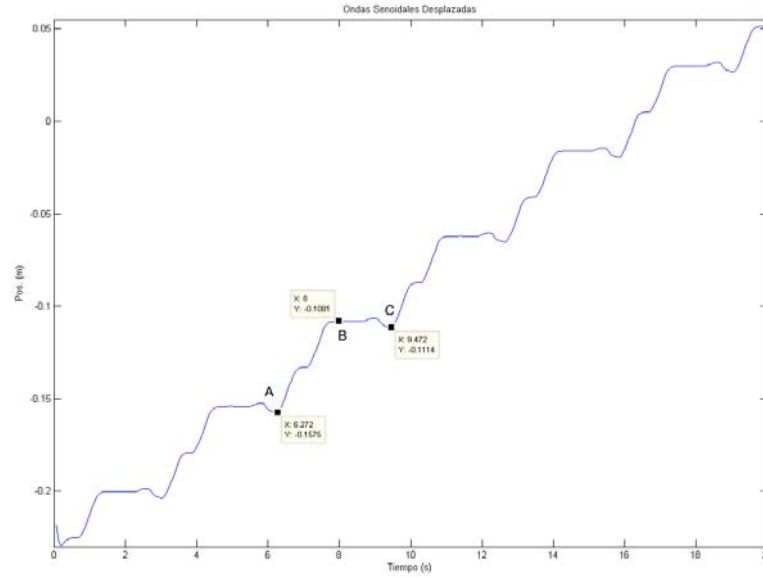
- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = -0,1114m - (-0,1575m); \quad l = 0,046m$$

- Tiempo de estancia  $t_s$

$$t_s = t_C - t_B; \quad t_s = 9,472s - 8s; \quad t_s = 1,472s$$





**Figura 6.14: Resultado Modo de Marcha: “Sinusoides Desplazadas”** - Posición del Robot durante 6 zancadas. Se etiquetan los puntos importantes de una zancada para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_B - t_A; \quad t_p = 8 - 6,272s; \quad t_p = 1,728s$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_B - P_A}; \quad \eta = \frac{0,046m}{0,049m}; \quad \eta = 93,31\%$$

- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,046m}{1,472s + 1,728s}; \quad v = 14,37mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{1,472s + 1,728s}; \quad f_z = 0,31Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,046m}{1,728s}; \quad v_p = 26,62mm/s$$

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

- Ciclo Útil  $DC$

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{1,728s}{1,472s + 1,728s}; \quad DC = 54\%$$

### 6.4. Movimiento Serpentino

#### 6.4.1. Modelo Del Robot

Para implementar el movimiento serpentino se modeló un robot modular, donde cada segmento está compuesto por un eslabón rígido y una articulación rotacional. El primer modelo implementado consiste en un robot de 8 GDL con todas sus articulaciones sobre el eje vertical por lo que el robot solamente puede moverse en un plano.



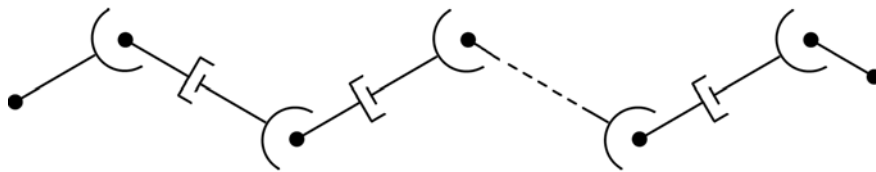
**Figura 6.15: Diagrama del Robot Serpiente Planar** - El robot serpiente planar está compuesto por 9 segmentos accionados por 8 articulaciones rotacionales sobre el eje vertical

En la figura 6.15 se muestra un diagrama del robot serpiente planar, este robot se simuló, utilizando el software de simulación Webots<sup>TM</sup>, como una serie de segmentos rígidos de 5cm x 3cm x 2cm, unidos por articulaciones rotacionales sobre el eje vertical. Como se explicó en la sección 2.2.1 para que el movimiento sea posible es necesario tener irregularidades en la superficie en las que el robot pueda apoyarse lateralmente para generar empuje, para facilitar la ejecución de este modo de marcha el robot serpiente se modeló en un pasillo de anchura igual a la amplitud del movimiento realizado por el mismo, de manera tal que permita tener el punto de apoyo lateral y realizar el movimiento completo.

Para superar la limitación del robot serpiente planar, se simuló un segundo modelo de robot serpiente con capacidad de moverse en los tres ejes. Para lograr este movimiento el robot utiliza 14 GDL rotacionales, 7 de ellos sobre el eje vertical y los 7 restantes sobre el eje perpendicular al sentido de desplazamiento del robot, con lo que se logra que el robot pueda elevarse de la superficie y por tanto generar el rozamiento necesario para realizar el movimiento serpentino sin necesidad de paredes laterales.



**Figura 6.16:** Simulación del Robot Serpiente Planar en un Pasillo - Captura de pantalla de la simulación en Webots<sup>TM</sup> del robot serpiente planar moviéndose en un pasillo

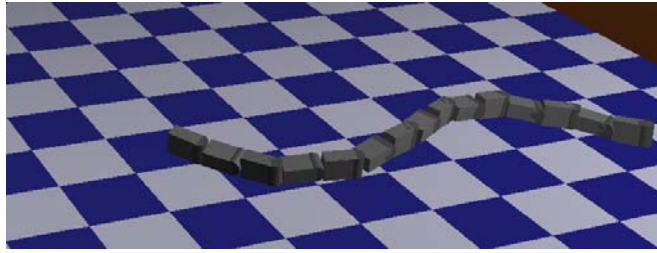


**Figura 6.17:** Diagrama del Robot Serpiente 3D - El robot serpiente 3D está compuesto por 15 segmentos accionados por 14 articulaciones rotacionales, 7 sobre el eje vertical y 7 sobre el eje axial. En la figura se muestra un diagrama resumido del robot

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

Para la simulación en Webots<sup>TM</sup> se utilizó como base el mismo módulo del robot serpiente planar. Se incrementó el número de segmentos y se modificó su orientación para poder obtener un la configuración mostrada en la figura 6.17, el movimiento se realiza sobre una superficie plana y se eliminaron las barreras laterales utilizadas en la simulación del robot serpiente planar.



**Figura 6.18: Simulación del Robot Serpiente 3D** - Imagen de la simulación en Webots<sup>TM</sup> del robot serpiente 3D con 14 GDL cada uno con una rotación de 90° con respecto al anterior.

### 6.4.2. Generación de la Trayectoria

- **Robot Serpiente Planar** La generación de la trayectoria serpentina o de ondulación lateral, se realizó tomando como base el estudio realizado por Hirose(70), en el que se introdujo la “Curva Serpentina<sup>1</sup>” que define el movimiento serpentino utilizado por las serpientes mientras se mueven con este modo de marcha. Un punto cualquiera en la curva está dado por:

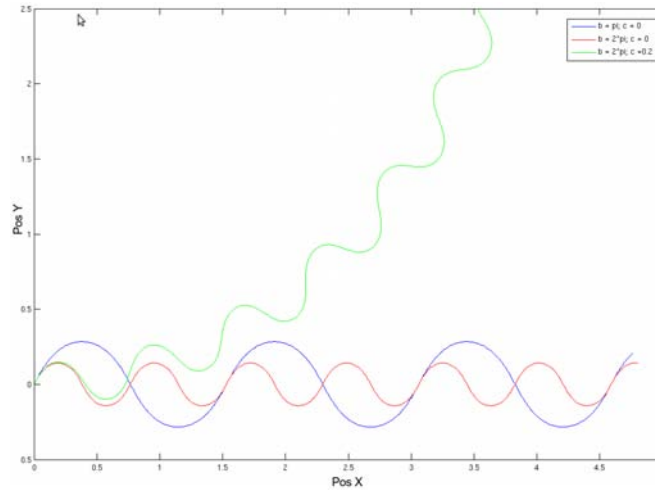
$$\begin{aligned}x(s) &= \int_0^s \cos(\psi(\sigma))d\sigma \\y(s) &= \int_0^s \sin(\psi(\sigma))d\sigma \\ \psi(\sigma) &= a \cos(b\sigma) + c\sigma\end{aligned}\tag{6.4}$$

Dónde  $s$  es un parámetro que determina la longitud del arco desde el origen hasta un punto en la curva y los escalares  $a$ ,  $b$  y  $c$  determinan la forma de la curva.  $a$  determina la amplitud de la onda.  $b$  Determina el numero de ondulaciones por

---

<sup>1</sup>El nombre original en idioma inglés es *Serpenoid Courve*

unidad de longitud y  $c$  determina la dirección de la curva (en términos de una trayectoria circular), en la figura 6.19 se muestran varias curvas manteniendo  $a$  constante y variando los escalares  $b$  y  $c$



**Figura 6.19: Curvas Serpentinadas** - Se muestran tres curvas serpentinadas con variación en los parámetros  $b$  y  $c$  de las ecuaciones (6.4).

Esta curva puede ser aproximada en términos de  $n$  segmentos rígidos conectados en serie como se muestra en la figura 6.15. Para esto se toman  $n + 1$  puntos de la curva denotados como  $s_i$  con  $(i = 0, 1, \dots, n)$  y se conectan cada uno con el siguiente con una línea recta. Los valores de  $x_i$  y  $y_i$  pueden ser aproximados como:

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{k=1}^i \frac{1}{n} \cos \left( a \cos \left( \frac{kb}{n} \right) + \frac{kc}{n} \right) \\ y_i &= \sum_{k=1}^i \frac{1}{n} \sin \left( a \cos \left( \frac{kb}{n} \right) + \frac{kc}{n} \right) \end{aligned} \tag{6.5}$$

El ángulo de cada segmento  $i$  con el eje  $x$  se denota como  $\theta_i$  y puede calcularse como:

$$\tan(\theta_i) = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} = \frac{\sin(a \cos(ib/n) + ic/n)}{\cos(a \cos(ib/n) + ic/n)}$$

De dónde se puede encontrar que:

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

$$\theta_i = a \cos\left(\frac{ib}{n}\right) + \frac{ic}{n}$$

Debido a que todos los segmentos están conectados en serie, es necesario conocer el ángulo relativo  $\phi_i$  de cada uno con respecto al anterior, ya que este será el valor que debe ser enviado al actuador. Este valor se encuentra fácilmente como:

$$\phi_i = \theta_i - \theta_{i+1} = \alpha \sin\left(i\beta + \frac{\beta}{2}\right) + \gamma \quad (6.6)$$

Dónde:

$$\alpha = a \left| \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right|, \quad \beta = \frac{b}{n}, \quad \gamma = -\frac{c}{n}$$

Finalmente, para imitar la locomoción serpentina es necesario variar la posición relativa de cada segmento con respecto al anterior de manera que el cuerpo del robot serpiente tome la forma de una curva serpentina en movimiento, para esto se introduce el tiempo como parámetro en la ecuación (6.6) de manera que se obtiene:

$$\phi_i(t) = \alpha \sin(\omega t + (i-1)\beta) + \gamma \quad (6.7)$$

Dónde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son los parámetros que definen la forma de la trayectoria que ejecutará el robot y  $\omega$  determina la velocidad a la que la curva se propaga por el cuerpo del robot. Esta ecuación se calcula variando el parámetro  $t$  desde un tiempo inicial  $t_o$  hasta un tiempo final  $t_f$  con incrementos determinados  $\Delta t$

Para resumir, los parámetros de entrada necesarios para determinar una trayectoria serpentina son los siguientes:

- Número de Cuerpos  $n$ .
- Tiempo de muestreo  $\Delta t$ .
- Duración del movimiento  $t_f$ .

- Periodos de onda por unidad de longitud  $b$ .
- Amplitud de la onda  $a$ .
- Velocidad de Propagación de la onda  $\omega$ .
- Constante de Dirección (Bias)  $c$ .

En la figura 6.20 se muestra un ejemplo de una trayectoria serpentina y los ángulos de cada segmento de un robot de 8 GDL durante su ejecución.

### ■ Robot Serpiente 3D

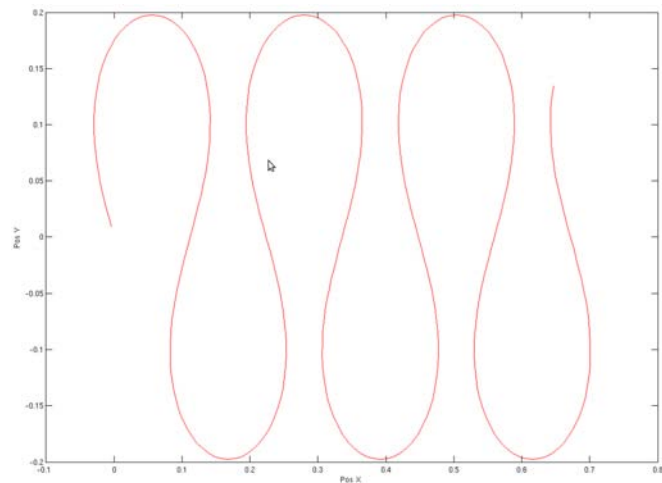
La ecuación descrita anteriormente brinda las posiciones para un robot planar, y requiere, como se ha mencionado en capítulos anteriores, un modelo de fricción anisotrópica en el que la fricción normal sea mayor que la fricción tangencial al desplazamiento. Para eliminar esta limitación se generó una variación de esta trayectoria en la que se incluye un movimiento en el eje transversal. El robot se eleva para evitar el rozamiento durante una parte del movimiento y regresa al contacto con la superficie en los puntos de curvatura del movimiento, creando los puntos de apoyo necesarios para propulsar el robot.

Como se observa en la figura 6.21 por cada periodo de la curva serpentina es necesario tener dos puntos de apoyo, por lo cual se concluye que la curva que controle el movimiento vertical debe tener una frecuencia dos veces mayor a la misma, adicionalmente los valles de la curva vertical deben coincidir con los máximos y mínimos de la curva planar.

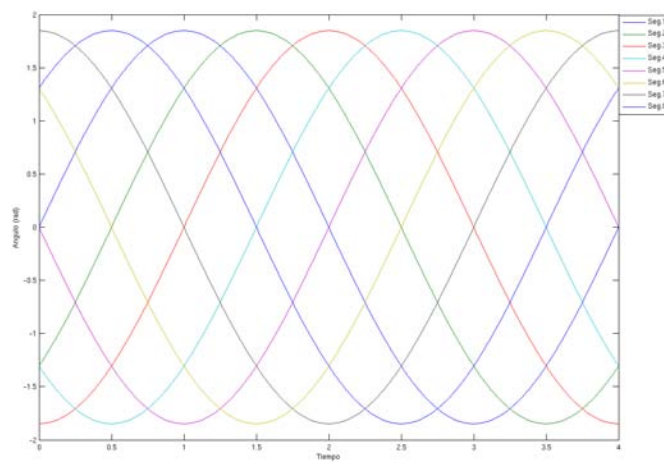
Para lograr esto se utilizó la ecuación (6.4) duplicando el valor del escalar  $b$  que define el número de periodos por unidad de longitud, modificando la amplitud del movimiento  $a'$  por un valor mucho menor que el de  $a$  ya que solamente es necesario elevar el robot para evitar el rozamiento y eliminando  $c$  puesto que la dirección del movimiento se determina por la curva en el plano XY. Adicionalmente para que los valles de la señal coincidan con los picos de la curva serpentina, se modificó la función  $\psi(s)$  para que ejecute un seno en lugar del coseno original. En conclusión las ecuaciones que definen los puntos de la posición vertical  $x(s)$ ,  $z(s)$  del robot es la siguiente:

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---



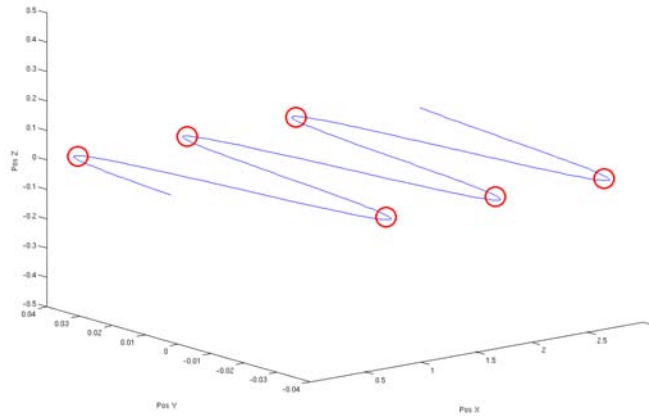
(a) Posiciones X,Y de la Trayectoria Serpentina



(b) Ángulos de cada segmento durante la trayectoria

**Figura 6.20: Trayectoria Serpentina Planar** - Se muestra un ejemplo de trayectoria serpentina planar con los siguientes parámetros  $n = 8$ ,  $\Delta t = 0,1$ ,  $t_f = 4$ ,  $b = 2\pi$ ,  $a = 2$ ,  $\omega = 0,5\pi$  y  $c = 0$





**Figura 6.21: Puntos de apoyo de la curva serpentina 3D** - Se muestra una curva serpentina planar, y se resaltan con círculos rojos las zonas en las que se desea que el robot entre en contacto con la superficie

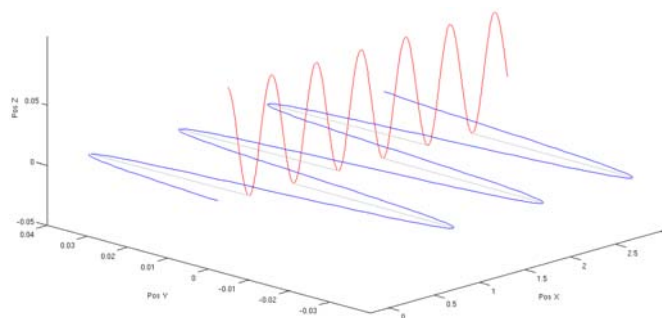
$$\begin{aligned}
 x(s) &= \int_0^s \cos(\psi(\sigma)) d\sigma \\
 z(s) &= \int_0^s \sin(\psi(\sigma)) d\sigma \\
 \psi(\sigma) &= at \sin(2b\sigma)
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

finalmente si combinamos las ecuaciones (6.4) y (6.4) podemos obtener una sola expresión que determine la trayectoria del robot:

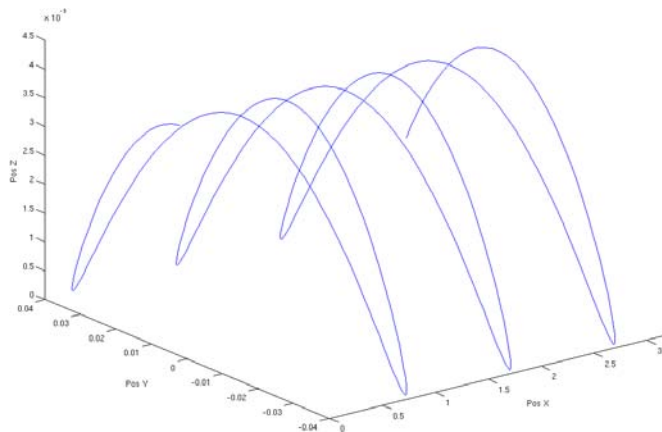
$$\begin{aligned}
 x(s) &= \int_0^s \cos(\psi(\sigma)) d\sigma \\
 y(s) &= \int_0^s \sin(\psi(\sigma)) d\sigma \\
 z(s) &= \int_0^s \sin(\psi(\sigma)) d\sigma \\
 \psi(\sigma) &= a \cos(b\sigma) + c\sigma \\
 \psi'(\sigma) &= at \sin(2b\sigma)
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---



(a) Curva Serpentina en XY y XZ



(b) Curva Serpentina en tres dimensiones

**Figura 6.22: Curva Serpentina en tres dimensiones** - (a) muestra las dos curvas serpentinadas que determinan la trayectoria que debe seguir el robot para moverse en 3 dimensiones. (b) el resultado de la combinación de ambas

Siguiendo un procedimiento análogo al realizado para la trayectoria planar, se puede obtener una expresión que permita calcular el ángulo de cada segmento sobre cada eje, para esto se define además del ángulo  $\phi_i$  que se mide sobre el eje Z, un ángulo  $\theta_i$  que determina el ángulo relativo de cada segmento medido sobre el eje Y. La expresión que determina este ángulo es:

$$\theta_i(t) = \alpha' \cos(2\omega t + (i - 1)\beta) \quad (6.10)$$

Nuevamente si se unen las ecuaciones (6.6) y (6.10) es posible tener una expresión que determine los ángulos del robot durante esta trayectorias

$$\begin{aligned} \phi_i(t) &= \alpha \sin(\omega t + (i - 1)\beta) + \gamma \\ \theta_i(t) &= \alpha' \cos(2\omega t + (i - 1)\beta) \end{aligned} \quad (6.11)$$

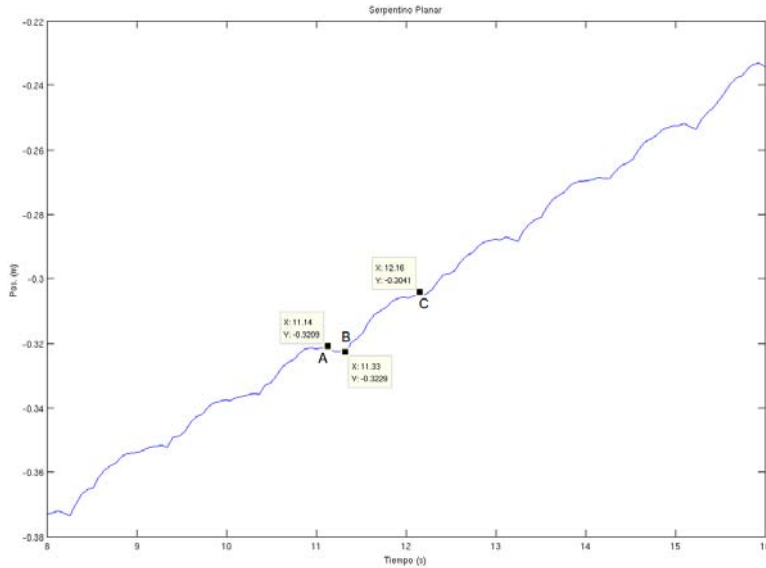
La ecuación (6.11) se implementó también en Webots<sup>TM</sup> para controlar el robot modelado en el mismo entorno y obtener los resultados que se presentan en el siguiente apartado.

### 6.4.3. Evaluación de la Trayectoria

- **Robot Serpiente Planar en Pasillo** Para la ejecución de esta trayectoria, se utilizó los siguientes parámetros:
  - Número de Cuerpos  $n = 8$ .
  - Tiempo de muestreo  $\Delta t = 64ms$ .
  - Duración del movimiento  $t_f = 8s$ .
  - Periodos de onda por unidad de longitud  $b = 2\pi$ .
  - Amplitud de la onda  $a = 1$ .
  - Velocidad de Propagación de la onda  $\omega = \pi$ .
  - Constante de Dirección (Bias)  $c = 0$ .

El resultado se muestra en la figura 6.23. Al igual que en los casos anteriores, a partir de los puntos marcados en dicha gráfica se obtienen las variables cinemáticas independientes y luego las demás variables.

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS



**Figura 6.23: Resultado Modo de Marcha: “Serpentino Planar” en un pasillo -** Posición del Robot durante 8 segundos de ejecución de la trayectoria. Se etiquetan tres puntos de la gráfica para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = -0,3041m - (-0,3209m); \quad l = 0,0168m$$

- Tiempo de estancia  $t_s$

$$t_s = t_B - t_A; \quad t_s = 11,33s - 11,14s; \quad t_s = 0,19s$$

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_C - t_B; \quad t_p = 12,16s - 11,33s; \quad t_p = 0,83s$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_C - P_B}; \quad \eta = \frac{0,0168m}{0,0188m}; \quad \eta = 89,36\%$$

- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,0168m}{0,83s + 0,19s}; \quad v = 16,47mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{0,83s + 0,19s}; \quad f_z = 0,98Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,0168m}{0,83}; \quad v = 20,24mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

Cabe resaltar que en este modo de marcha el ciclo útil esperado era del 100 % debido a la continuidad del movimiento, sin embargo los resultados muestran que en los momento de contacto con las paredes del pasillo hay una interrupción del mismo por lo que se tiene un tiempo de estancia diferente de cero.

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{0,83s}{0,83s + 0,19s}; \quad DC = 83\%$$

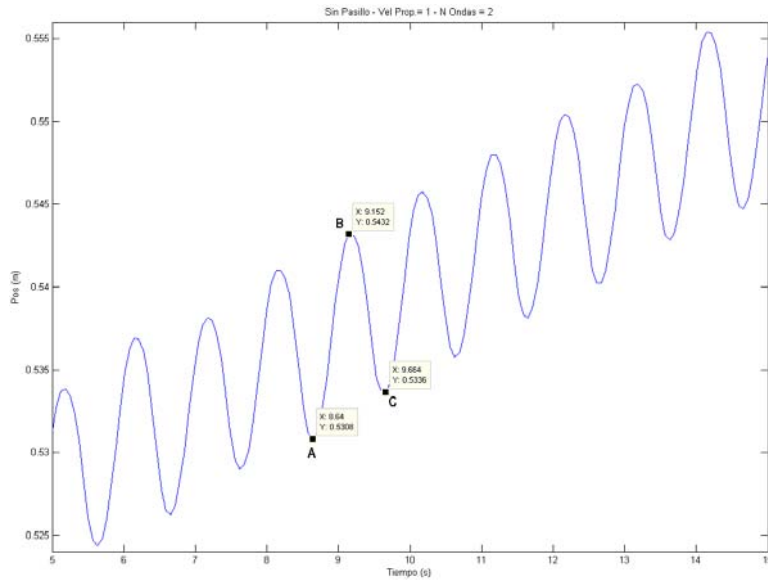
- **Robot Serpiente Planar en Superficie Plana** La trayectoria serpentina en una superficie plana y con fricción isotrópica tiene como resultado un movimiento ineficiente, en el que la velocidad lograda es muy baja debido a que el robot no cuenta con puntos de apoyo laterales. Para tener una idea del comportamiento del robot en estas condiciones se realizó una simulación obteniendo los resultados que se muestran en la figura 6.24

Los resultados muestran que la eficiencia del movimiento es solamente del 22 %, logrando una velocidad de 2,7mm/s

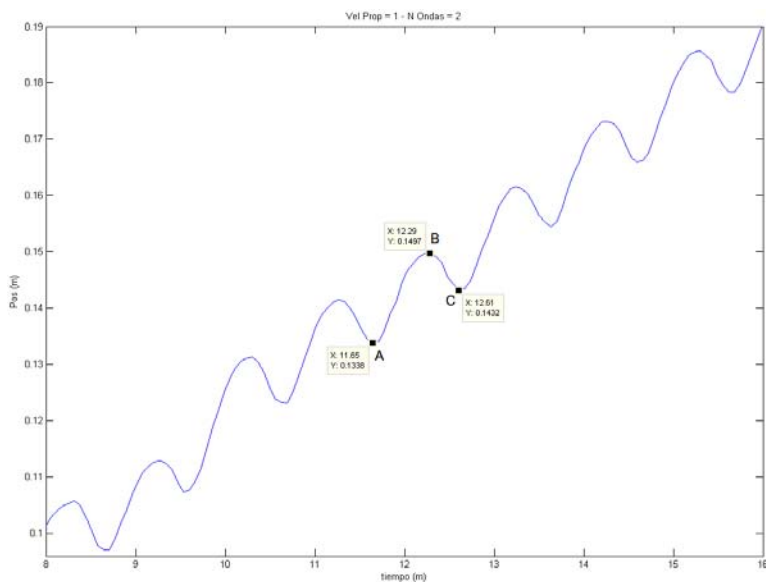
- **Robot Serpiente 3D**

El modo de marcha Serpentino en tres dimensiones se implementó también en el software de simulación, los parámetros de la trayectoria utilizados fueron los mismos que para el movimiento en un pasillo. La figura 6.25 muestra el resultado obtenido, a partir del cual es posible obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS



**Figura 6.24: Resultado Modo de Marcha: “Serpentino Planar” sin apoyos laterales** - Posición del Robot durante 10 segundos de ejecución de este modo de marcha. Se etiquetan tres puntos de la gráfica para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.



**Figura 6.25: Resultado Modo de Marcha: “Serpentino 3D” en superficie plana** - Posición del Robot durante 8 segundos de ejecución de este modo de marcha. Se etiquetan tres puntos de la gráfica para obtener las variables cinemáticas de este modo de marcha.

- Largo de la zancada  $l$

$$l = P_C - P_A; \quad l = 0,1432m - 0,1334m); \quad l = 0,094m$$

- Tiempo de estancia  $t_s$

$$t_s = t_C - t_B; \quad t_s = 12,61s - 12,29s; \quad t_s = 0,32s$$

- Tiempo de progresión  $t_p$

$$t_p = t_C - t_B; \quad t_p = 12,29s - 11,65s; \quad t_p = 0,64s$$

- Eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{P_C - P_A}{P_C - P_B}; \quad \eta = \frac{0,094m}{0,016m}; \quad \eta = 59,12\%$$

- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,094m}{0,32s + 0,64s}; \quad v = 9,79mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{0,32s + 0,64s}; \quad f_z = 1,04Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,094m}{0,64s}; \quad v_p = 14,68mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

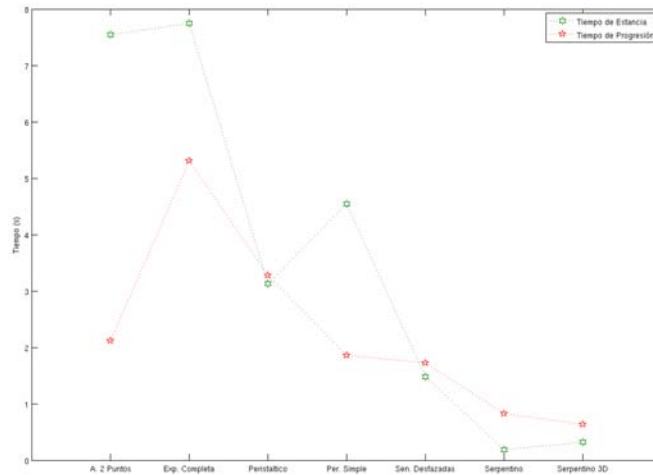
En este tipo de movimiento, a pesar de que el movimiento se realiza continuamente, hay un instante de retroceso como puede apreciarse en la figura 6.25, lo cual hace que este valor sea menor de lo esperado.

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{0,64s}{0,32s + 0,64s}; \quad DC = 66\%$$

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

M. de Marcha	$l(m)$	$t_s(s)$	$t_p(s)$	$\eta(\%)$	$v(\frac{mm}{s})$	$f_z(Hz)$	$v_p(\frac{mm}{s})$	DC(%)
A. 2 Puntos	0,025	7,55	2,12	100	2,58	0,1	11,79	21,92
Exp. Completa	0,05	7,75	5,31	68,16	3,83	0,07	9,41	40,65
Peristáltico	0,048	3,13	3,27	97,9	7,5	0,15	14,67	51,09
Per. Simple	0,025	4,54	1,86	100	3,9	0,15	13,44	29,06
Sen. Desplazadas	0,046	1,472	1,728	93,31	14,37	0,31	26,62	54
Serpentino	0,0168	0,19	0,83	89,36	16,47	0,98	20,24	83
Serpentino 3D	0,094	0,32	0,64	59,12	9,79	1,04	14,68	66

**Cuadro 6.1:** Resumen de Variables cinemáticas de los modos de marcha - Se muestra un resumen de los resultados encontrados en este capítulo



**Figura 6.26:** Comparación de Tiempo de estancia y Tiempo de Progresión de los distintos modos de marcha - Se muestran los tiempos de estancia  $t_s$  y de progresión  $t_p$  de los modos de marcha estudiados

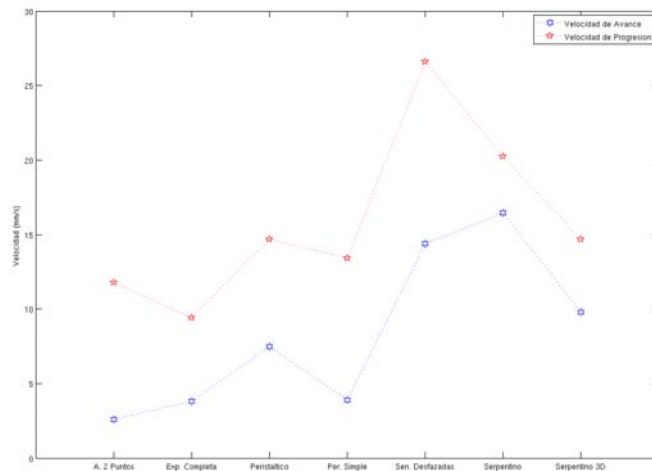


## 6.5. Análisis y Comparación

El cuadro 6.1 muestra un resumen de los resultados encontrados en este capítulo.

Los resultados mostrados en el cuadro 6.1 se presentan también en gráficas separadas para facilitar su análisis. La figura 6.26 muestra los tiempos de estancia y de progresión para los modos de marcha estudiados. Se puede observar que los modos de marcha basados en el Arrastre con dos puntos de apoyo presentan una gran diferencia entre los tiempos de estancia y de progresión, ya que el robot está quieto durante la mayoría del movimiento, esto también puede observarse en el ciclo útil que en ambos casos es menor al 40 %. El modo de marcha “Peristáltico Simple” en el que solamente se mueve un segmento del robot a la vez presenta un comportamiento similar a los dos anteriormente mencionados y su ciclo útil es también inferior al 30 %.

Por otro lado los modos de marcha basados en la trayectoria serpentina, tienen en todos los casos un tiempo de estancia menor que el tiempo de progresión, y por tanto un ciclo útil mayor al 50 %.



**Figura 6.27: Comparación de Velocidad de Avance y de Progresión de los distintos modos de marcha** - Se muestra tanto la velocidad de avance  $v$  como la de progresión  $v_p$  de los modos de marcha estudiados

En la figura 6.27 se observa nuevamente que los modos de marcha basados en el desplazamiento de señales sinusoidales permiten alcanzar velocidades mayores tanto de progresión como de avance, sin embargo se puede apreciar también el efecto negativo de una baja eficiencia en la velocidad, ya que el movimiento serpentino en tres dimensiones

## 6. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA ROBOTS ÁPODOS

---

presenta una velocidad relativamente baja, en comparación con el serpiente planar, esto se debe a que la eficiencia del movimiento serpiente en tres dimensiones (59 %) es mucho menor que el planar (89 %). En el caso del robot gusano, se observa que la velocidad del movimiento peristáltico simple es muy similar al de la expansión completa, esto debido a que en los dos modos de marcha un solo segmento está en movimiento a la vez, mientras en los otros varios segmentos se mueven al mismo tiempo, logrando de esta manera velocidades más altas.

# 7

## Desarrollo de un Robot Serpiente

En este capítulo se describe el modelado y la construcción de un robot serpiente en configuración planar y de tres dimensiones, con el objetivo de implementar los modos de marcha estudiados en este trabajo. Se inicia con el diseño mecánico del sistema, luego se realiza una descripción del modelo cinemático y dinámico del robot y el entorno. Finalmente se describen las pruebas realizadas así como los resultados obtenidos.

### 7.1. Diseño mecánico y electrónico

#### 7.1.1. Criterios de Diseño

- **Modularidad** Una de las características más relevantes a la hora de construir un robot con alto número de actuadores es la modularidad, esto es, el robot debe ser construido de manera tal que el cada segmento del cuerpo debe ser un módulo que controle un grado de libertad. Los módulos debes ser intercambiables entre sí lo cual requiere que su diseño y funcionamiento no dependa de su posición u orientación en el cuerpo del robot. Adicionalmente el recambio o intercambio de partes debe ser un proceso sencillo.
- **Reconfigurable** El diseño del robot debe permitir la configuración de más de una forma del cuerpo del robot, esto quiere decir que el mismo diseño se debe utilizar para crear un robot serpiente planar o un robot serpiente de tres dimensiones, o una variación de estos, adicionalmente el número de cuerpos del robot debe ser variable.

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

---

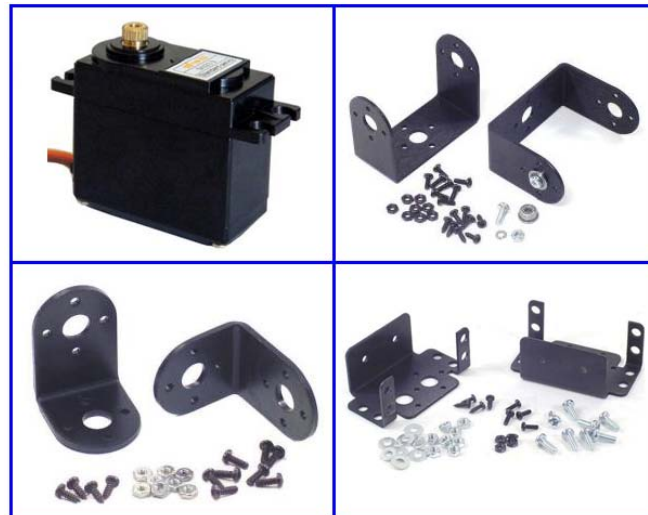
- **Actuadores** Para la selección de los actuadores se tuvo en cuenta el análisis realizado en el capítulo 4, en el que se concluyó que los actuadores tradicionales presentan una ventaja debido a su elevado nivel de desarrollo, capacidad de movimiento y controlabilidad. Debido a que un robot serpiente requiere un elevado número de actuadores y en cada uno de ellos se debe controlar la posición, se optó por el uso de servomotores eléctricos, ya que estos permiten controlar directamente la posición del actuador y adicionalmente son de fácil montaje y costo relativamente bajo.
- **Componentes Mecánicos** Los componentes mecánicos adicionales del robot, (i.e. Soportes, uniones) deben ser componentes disponibles en el mercado, es decir no se desarrollarán componentes mecánicos adicionales para el robot.
- **Compatibilidad Con La Arquitectura Para Robots Ápodos** El robot debe funcionar bajo la arquitectura para robots ápodos descrita en el capítulo 5.

### 7.1.2. Diseño del Módulo Base

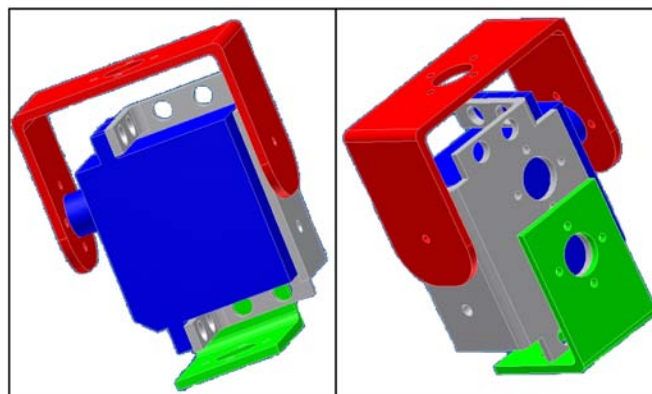
Cada módulo del robot es idéntico, y está compuesto por

- Una tarjeta electrónica del módulo esclavo, que se muestra en el figura 5.5(a).
- Un servomotor eléctrico estándar DYS-S0213MG
- Un soporte de aluminio multipropósito para servomotores. Lynxmotion Modelo ASB-04
- Un soporte en “C” de aluminio. con rodamientos. Lynxmotion Modelo ASB-09.
- Un Conector en “L” de aluminio. Lynxmotion Modelo ASB-06.

Para facilitar el proceso de diseño, estos componentes se modelaron utilizando la herramienta de diseño asistido por computador Autodesk®Inventor®, mediante el cual se unieron los componentes, determinando de esta forma el espacio disponible para la tarjeta electrónica, para las baterías u otros componentes adicionales del módulo, el modelo del módulo se muestra en la figura 7.2



**Figura 7.1: Componentes de un Módulo del robot serpiente** - Se muestran los componentes de un módulo del robot: Servomotor(71); Soporte Multipropósito; Soporte en “C”; Conector en L (72)



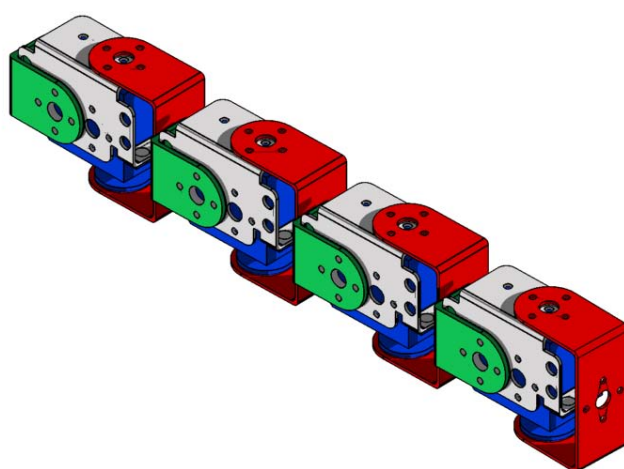
**Figura 7.2: Modelo CAD del módulo diseñado** - Se muestra una vista frontal y otra posterior del módulo base del robot modelado en Inventor®

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

---

### 7.1.3. Diseño del Robot Serpiente

Luego de tener el módulo base, se modelaron varias versiones del robot serpiente, un primer diseño se compone de varios módulos dispuestos con la misma orientación, de manera tal que se forme un robot serpiente planar con 8 grados de libertad, un diagrama simplificado de este robot se muestra en la figura 6.15, mientras una imagen de robot construido se muestra en la figura 7.3(b)



(a) Modelo CAD del Robot Planar con 4 GDL

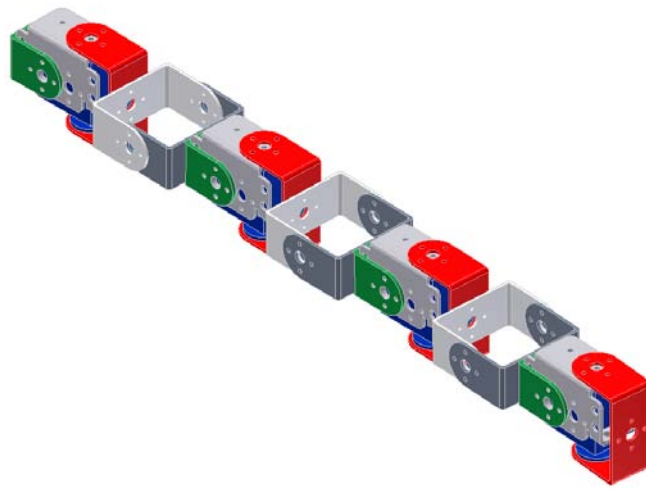


(b) Robot Serpiente Planar de 8 GDL

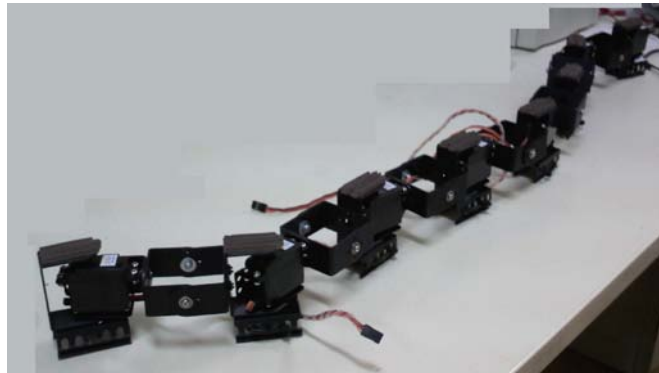
**Figura 7.3: Robot Serpiente en Configuración Planar** - (a) Modelo CAD del un robot serpiente planar de 4 GDL. (b) Imagen del robot serpiente planar de 8 GDL desarrollado durante este trabajo

Debido a falta de flexibilidad en las conexiones mecánicas de los módulos, este diseño no permite al robot adaptarse a irregularidades o pequeños cambios en la superficie, aún ante pequeñas variaciones en la inclinación del terreno el robot perderá varios puntos de soporte haciendo inviable el movimiento. Una solución a este problema se consiste en el diseño de una articulación pasiva sobre el eje longitudinal del robot. Esta articulación conectada a los módulos permite al robot tener movilidad verticalmente y por tanto

utilizar la fuerza de gravedad para adaptarse a pequeños cambios en la superficie. Las articulaciones pasivas están formadas por dos soportes en “C” (Lynxmotion Modelo ASB-09) unidos entre sí por sus extremos laterales y conectados a cada módulo en la parte central. En la figura 7.4(a) se muestra un diseño CAD de 4 módulos conectados por articulaciones pasivas, desde el punto de vista de control y modelado, el robot se considera idéntico al mostrado en la figura 6.15 con una longitud mayor en cada segmento del robot.



(a) Modelo CAD del robot serpiente planar de 4GDL con articulaciones libres



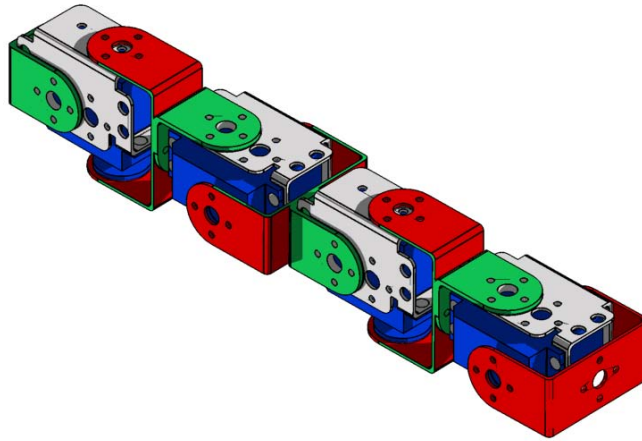
(b) Robot Serpiente Planar de 8 GDL con articulaciones pasivas

**Figura 7.4: Robot Serpiente Planar con articulaciones libres en el eje longitudinal** - (a)Diseño CAD de un robot serpiente de 4 GDL unidos por articulaciones pasivas que le permiten adaptarse a variaciones en el terreno. (b) Imagen del robot serpiente planar de 8 GDL con articulaciones pasivas

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

---

El tercer diseño es un robot serpiente con capacidad de moverse en tres dimensiones, con una configuración como la mostrada en la figura 6.17. Para esto se modificó la orientación de los módulos del robot, girando  $90^\circ$  cada uno respecto al anterior. El diseño en CAD de este robot así como su construcción se muestran en la figura 7.5(a)



(a) Modelo CAD del robot serpiente 3D de 4GDL



(b) Robot Serpiente 3D de 13 GDL

**Figura 7.5: Robot Serpiente en configuración 3D** - (a)Diseño CAD de un robot serpiente 3D de 4 GDL con articulaciones activas. (b) Imagen del robot serpiente 3D de 13 GDL desarrollado en este proyecto

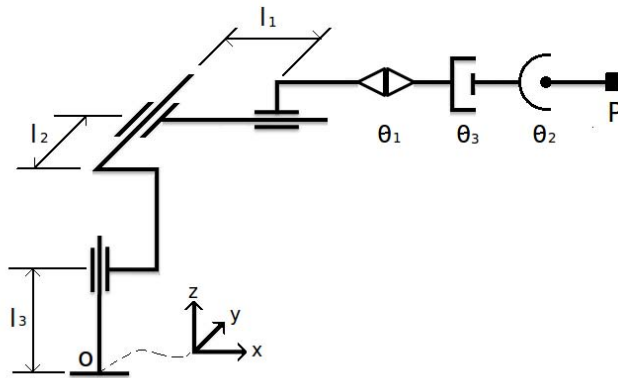
### 7.2. Modelado Cinemático del Robot

El modelo cinemático directo del robot nos permite conocer la ubicación de la cabeza del robot con respecto a un sistema de referencia fijo, a partir de la posición de cada una de las articulaciones, lo cual es de mucha utilidad si se pone a bordo del robot un sensor o una cámara. Debido a que se trata de un robot móvil, el modelo debe ser dividido



en dos partes, una primera conversión desde el origen del sistema de referencia hasta la cola del robot, y un segundo sistema desde la cola del robot hasta la cabeza del mismo.

Para establecer la primera transformación, se utilizó una estructura virtual para la orientación y posición del robot (73), esta estructura es una herramienta matemática en la que se simulan tres articulaciones prismáticas, una sobre cada eje de movimiento además de tres articulaciones rotacionales también sobre cada eje, de esta manera es posible obtener cualquier posición y orientación del robot.



**Figura 7.6: Estructura Virtual para el la Orientación y Posición del robot -** Esquema de la estructura virtual para la posición y orientación de robot utilizada, se definen las distancia  $l_1$ ,  $l_2$  y  $l_3$  sobre los ejes xyz además los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$   $\theta_3$  sobre los correspondientes ejes

El esquema de esta estructura se muestra en la figura 7.6, la transformación entre el punto  $o$  y el punto  $P$  (cola del robot) consiste en los siguientes movimientos:

$${}^oT_P = Trans(l_1, l_2, l_2) \times Rot_x(\theta_1) \times Rot_y(\theta_2) \times Rot_z(\theta_3)$$

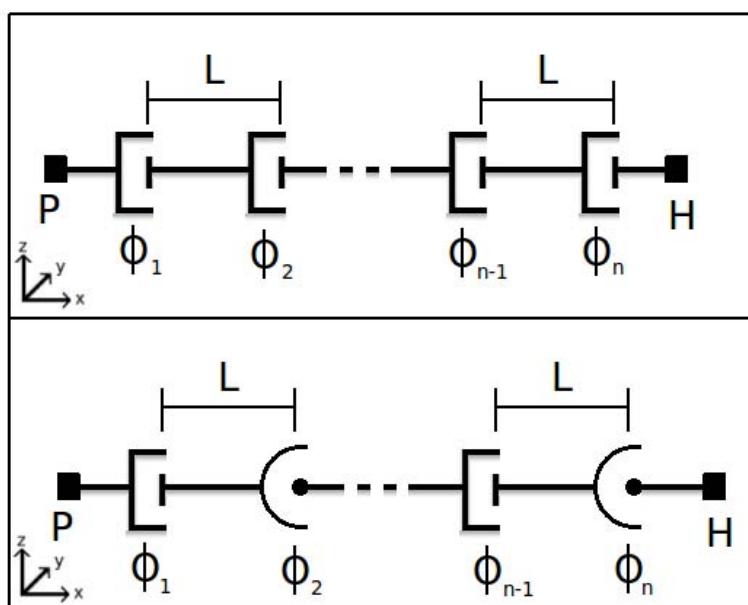
La matriz de transformación homogénea que define este movimiento es:

$${}^oT_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

$${}^oT_P = \begin{pmatrix} c(\theta_2) c(\theta_3) & -s(\theta_3) c(\theta_1) + c(\theta_3) s(\theta_2) s(\theta_1) & s(\theta_3) s(\theta_1) + c(\theta_3) s(\theta_2) c(\theta_1) & d_1 \\ s(\theta_3) c(\theta_2) & c(\theta_3) c(\theta_1) + s(\theta_3) s(\theta_2) s(\theta_1) & -c(\theta_3) s(\theta_1) + s(\theta_3) s(\theta_2) c(\theta_1) & d_2 \\ -s(\theta_2) & c(\theta_3) s(\theta_1) & c(\theta_1) c(\theta_2) & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La segunda transformación depende de la configuración del robot, en el caso de tener un robot serpiente planar se trata de varias articulaciones rotacionales sobre el eje vertical conectadas una en serie con la otra, mientras para el robot de tres dimensiones las articulaciones estarán sobre dos ejes principales.



**Figura 7.7:** Esquema del robot serpiente planar y 3D - Se muestra un esquema correspondiente a la segunda parte del modelo cinemático, con las articulaciones del robot en configuración planar (arriba) y 3D (abajo)

En la figura 7.7 se muestran los esquemas para el robot serpiente en configuración planar y 3D que determinan la configuración del robot y por tanto la transformación entre la cola  $P$  y la cabeza del robot  $H$ , el tamaño del módulo se define por  $L$  y es el mismo en los dos casos, en el caso del robot planar la transformación está dada por:

$${}^P T_H = Trans(0, 0, L) \times Rot_z(\phi_1) \times Trans(0, 0, L) \times Rot_z(\phi_2) \dots \\ \times Trans(0, 0, L) \times Rot_z(\phi_{n-1}) \times Trans(0, 0, L) \times Rot_z(\phi_n)$$

$$\begin{aligned}
 {}^P T_H = & \begin{pmatrix} \cos(\phi_1) & -\sin(\phi_1) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\phi_2) & -\sin(\phi_2) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_2) & \cos(\phi_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdots \\
 & \times \begin{pmatrix} \cos(\phi_{n-1}) & -\sin(\phi_{n-1}) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_{n-1}) & \cos(\phi_{n-1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\phi_n) & -\sin(\phi_n) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_n) & \cos(\phi_n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

En el caso del robot serpiente 3D la transformación está dada por:

$$\begin{aligned}
 {}^P T_H = & Trans(0, 0, L) \times Rot_z(\phi_1) \times Trans(0, 0, L) \times Rot_y(\phi_2) \dots \\
 & \times Trans(0, 0, L) \times Rot_z(\phi_{n-1}) \times Trans(0, 0, L) \times Rot_y(\phi_n)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}^P T_H = & \begin{pmatrix} \cos(\phi_1) & -\sin(\phi_1) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\phi_2) & 0 & \sin(\phi_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi_2) & 0 & \cos(\phi_2) & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdots \\
 & \times \begin{pmatrix} \cos(\phi_{n-1}) & -\sin(\phi_{n-1}) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_{n-1}) & \cos(\phi_{n-1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\phi_n) & 0 & \sin(\phi_n) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi_n) & 0 & \cos(\phi_n) & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Finalmente la posición y orientación de la cabeza del robot con respecto a un punto fijo se obtiene multiplicando las dos transformaciones obtenidas  ${}^o T_H = {}^o T_A \times {}^P T_H$ . La cinemática inversa es un problema mucho más complejo debido a la naturaleza hiper redundante del robot, por esta razón el cálculo de las posiciones de cada actuador, desarrollado en el capítulo 6, se abordó a partir del análisis de la trayectoria deseada.

### 7.3. Modelado Dinámico del Robot

El modelo dinámico permite conocer la relación entre los movimientos realizados por el robot y las fuerzas implicadas, bien sea para conocer las aceleraciones o movimientos inducidos por fuerzas dadas (dinámica directa) o las fuerzas necesarias para lograr un movimiento determinado (dinámica inversa), en esta sección se estudia el proceso necesario para obtener el modelo dinámico inverso del robot serpiente en la configuración más general, es decir con capacidad de moverse en las tres dimensiones.

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

---

Para obtener este modelo, se considera cada módulo del robot como un cuerpo rígido con masa uniformemente distribuida, que interactúa solamente con los segmentos a los que está directamente conectado. Es necesario iniciar determinando la nomenclatura: que se utilizará se define  $V$ ,  $\dot{V}$  y  $F$  como vectores columna en  $\mathfrak{R}^{6 \times 1}$  de la siguiente manera:

$$V = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

Dónde  $v$  y  $\omega$  representan la velocidad lineal y angular de un cuerpo.

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}$$

Dónde  $\dot{v}$  y  $\dot{\omega}$  representan la aceleración lineal y angular de un cuerpo.

$$F = \begin{bmatrix} N \\ f \end{bmatrix}$$

Dónde  $N$  y  $f$  representan las fuerzas lineal y angular de un cuerpo. Se definen también  $P_{i-1,i}$  y  $R_{i-1,i}$  como matrices en  $\mathfrak{R}^{6 \times 6}$  que representan la translación y rotación entre cuerpo  $i - 1$  y el cuerpo  $i$  definidas de la siguiente manera:

$$P_{i-1,i} = \begin{bmatrix} I_3 & p_{i-1,i} \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

$p_{i-1,i}$  es una matriz en  $\mathfrak{R}^{3 \times 3}$  correspondiente a la matriz simétrica *Skew* correspondiente al vector que une los dos cuerpos del robot.

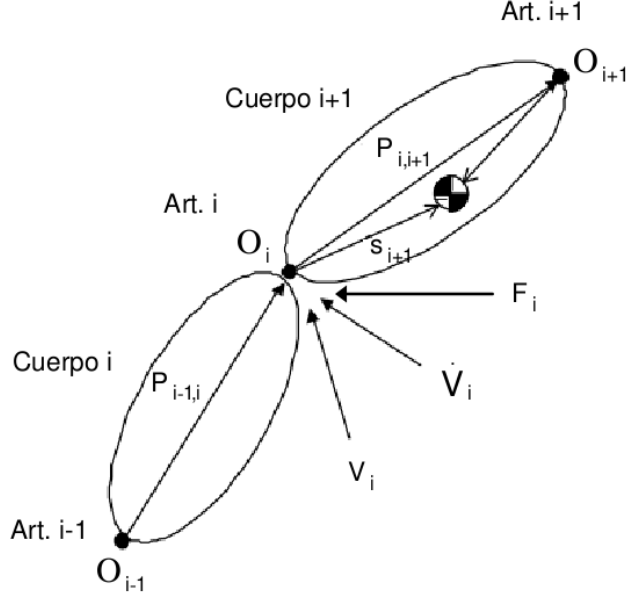
$$R_{i-1,i} = \begin{bmatrix} r_{i-1,i} & 0 \\ 0 & r_{i-1,i} \end{bmatrix}$$

Para tener una mejor idea de estos conceptos, estos se muestran en la figura 7.8

La propagación de las velocidad del cuerpo  $i - 1$  al cuerpo  $i$  está dada por (75):

$$V_i = P_{i-1,i}^T R_{i-1,i}^T V_{i-1} + H_i \dot{\phi}_i, \quad \{\forall_i : i = i \dots n\} \quad (7.1)$$

El vector  $H_i$  está definido en  $\mathfrak{R}^{6 \times 1}$  y permite la proyección de la velocidad angular con respecto al eje de movimiento de la articulación. La aceleración articular  $\dot{\phi}_i$  puede encontrarse derivando en el tiempo la ecuación que permite conocer las posiciones de las articulaciones durante el movimiento serpentino (6.7). Ahora si se deriva la ecuación (7.1) con respecto al tiempo, se obtienen las aceleraciones espaciales:



**Figura 7.8: Definiciones para la dinámica del robot serpiente** - Se muestran gráficamente los conceptos mencionados para la obtención de la dinámica del robot serpiente en forma de un sistema multicuerpo (74)

$$\dot{V}_i = P_{i-1,i}^T R_{i-1,i}^T \dot{V}_{i-1} + H_i \ddot{\phi}_i + P_{i-1,i}^T R_{i-1,i}^T V_{i-1} + H_i \dot{\phi}_i, \quad \{\forall_i : i = i \dots n\} \quad (7.2)$$

El tercer término determina las fuerzas de coriolis mientras el cuarto término corresponde a las aceleraciones centrífugas, finalmente la propagación de fuerzas hacia la parte posterior del robot está dada por:

$$F_i = J_i \dot{V}_i + \left[ \dot{J}_i - S_{i,cm} \dot{J}_i \right] + R_{i-1,i} P_{i-1,i} F_{i+1} + S_{i,cm} F_{ri,cm}, \quad \{\forall_i : i = i \dots n\} \quad (7.3)$$

Dónde  $J_i$  es una matriz en  $\mathfrak{R}^{6 \times 6}$  que se define como el operador tensor de inercia del cuerpo. El operador  $S_{i,cm}$  es también una matriz en  $\mathfrak{R}^{6 \times 6}$  con una estructura idéntica a la de  $P_{i-1,i}$  y corresponde a la distancia que hay entre el eje de la articulación y el centro de masas del cuerpo. Finalmente las fuerzas requeridas en cada articulación se encuentran como:

$$\tau_i = H_i^T F_i, \quad \{\forall_i : i = i \dots n\} \quad (7.4)$$

### 7.4. Pruebas Iniciales

En esta sección se describen algunas pruebas realizadas con el prototipo de robot serpiente, tanto en configuración planar como en tres dimensiones. Estas pruebas iniciales se realizaron con el objetivo de establecer las condiciones adecuadas para implementar los modos de marcha de serpentin.

Inicialmente se configuró el robot planar, como se muestra en la figura 7.3(b), con esta configuración se buscaba comprobar la capacidad del robot de realizar la secuencia de movimientos correctamente. Las pruebas comprobaron que el robot es capaz de realizar los movimientos, sin embargo debido a la rigidez del mismo, no había suficientes puntos de contacto para comprobar la eficiencia del movimiento.



**Figura 7.9: Prueba del robot serpiente en configuración planar** - El robot serpiente se probó inicialmente en configuración planar, el objetivo era comprobar la capacidad del sistema para realizar la secuencia de movimientos

La segunda serie de pruebas se realizó utilizando articulaciones pasivas en el robot, de esta manera se logró que todos los segmentos del robot hagan contacto continuo con la superficie, sin embargo el inconveniente durante estas pruebas fue lograr que se generen fuerzas de fricción adecuadas para propulsar al robot. Para lograr que la fricción sea mayor en la dirección normal al avance, se agregaron a la base del robot soportes en forma de C invertida, de manera tal que el soporte sea solamente sobre dos líneas, una imagen de los soportes agregados a cada módulos se muestra en la figura 7.10.

## 7.5 Implementación de Trayectorias Serpentinadas en el Robot Serpiente

---



**Figura 7.10: Soportes diseñados para mejorar el rozamiento del robot serpiente**  
- Imagen de los soportes agregados en la base de cada módulo para mejorar el rozamiento del robot serpiente durante las pruebas

Estos soportes mejoraron el desempeño del robot y se probaron en diferentes superficies: Sobre tierra suelta el robot fue capaz de realizar el movimiento correctamente, pero la superficie no brindó la tracción deseada, por lo que el no se consiguió un avance considerable del robot. Sobre superficies rugosas como cemento, el rozamiento entre el suelo era muy alto y por tanto requería un torque muy elevado en los motores, lo que impidió que el movimiento se realice correctamente. Sobre una superficie lisa sin irregularidades, el robot no era capaz de avanzar debido a la falta de puntos de apoyo laterales. En la figura 7.11 se muestran imágenes de las pruebas realizadas sobre diferentes superficies.

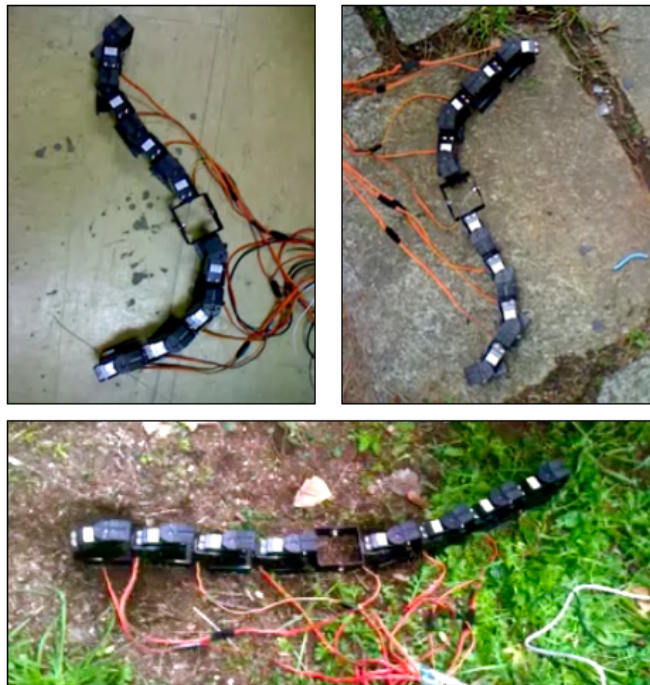
El siguiente grupo de pruebas se realizó moviendo el robot en un pasillo, se construyó un entorno similar al modelado en la sección 6.4.1 con dos barreras laterales sobre una superficie plana, regular y con bajo coeficiente de rozamiento. En estas pruebas se logró un comportamiento correcto, se comprobó que las variaciones en los parámetros de la trayectoria se reflejan en el comportamiento del robot y se verificó que el movimiento de cada segmento del cuerpo sea el adecuado. Por tanto este entorno se seleccionó para aplicar las trayectorias generadas en el capítulo 6.

### 7.5. Implementación de Trayectorias Serpentinadas en el Robot Serpiente

Una vez establecido el entorno adecuado para realizar las pruebas, se realizaron las pruebas de verificación de la trayectoria. Se utilizó el robot serpiente en configuración planar con 8 GDL, y articulaciones libres conectando cada módulo. El pasillo utilizado

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

---

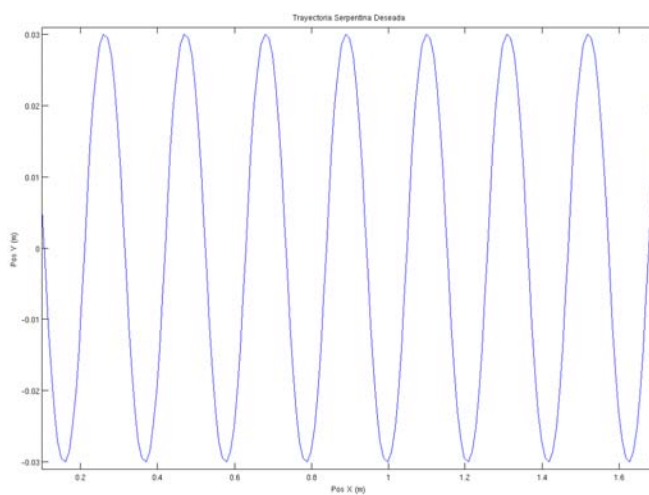


**Figura 7.11: Pruebas del robot serpiente sobre diferentes superficies.** - Se muestran imágenes de las diferentes pruebas realizadas en tierra suelta, sobre superficies rugosas y sobre superficies planas y lisas.



## 7.5 Implementación de Trayectorias Serpentinadas en el Robot Serpiente

tiene un largo de  $1,5m$  y la distancia entre las paredes es de  $0,3m$ . Utilizando la ecuación (6.4) se obtuvo la ideal que debe recorrer el robot, mostrada en la figura 7.12. Los parámetros utilizados fueron  $a = 0,82$ , para adaptar la amplitud del movimiento al ancho del pasillo,  $b = 8\pi$  para obtener un recorrido regular y  $c = 0$  debido a que el movimiento se realiza en línea recta.



**Figura 7.12: Trayectoria Teórica para el robot serpiente en un pasillo** - Se muestra la trayectoria ideal calculada con el objetivo de ser implementada en el robot serpiente.

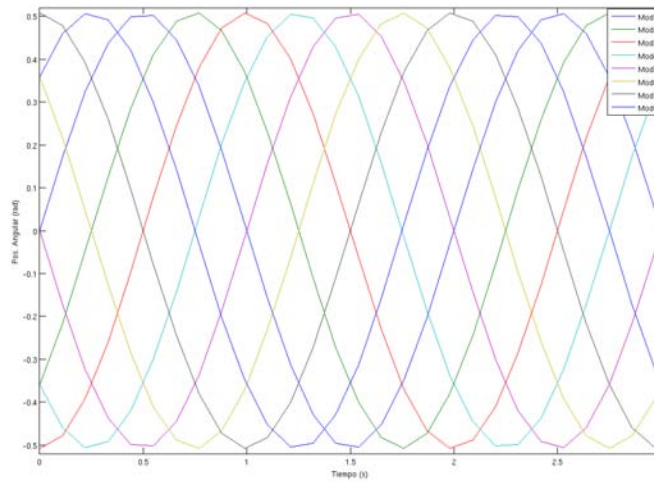
Utilizando estos parámetros se calcularon también las posiciones cada una de las articulaciones activas del robot de acuerdo con la ecuación (6.7), en este caso la amplitud del movimiento de cada módulo se limitó a  $30^\circ$ , el movimiento de cada actuador es periódico por lo que solamente se calculó durante un intervalo de  $3s$ , con un tiempo de muestreo de  $50ms$ , la velocidad de propagación de la onda fue  $\omega = \pi$ . los valores obtenidos se muestran en la figura 7.13

Finalmente estas posiciones se normalizaron en un Byte y se almacenaron en una tabla, para luego ser transmitidas al modulo maestro del robot serpiente, mediante el procedimiento descrito en el capítulo 5. Una vez almacenadas las trayectorias se probaron en el entorno. La figura 7.14 muestra una secuencia de imágenes de la prueba realizada.

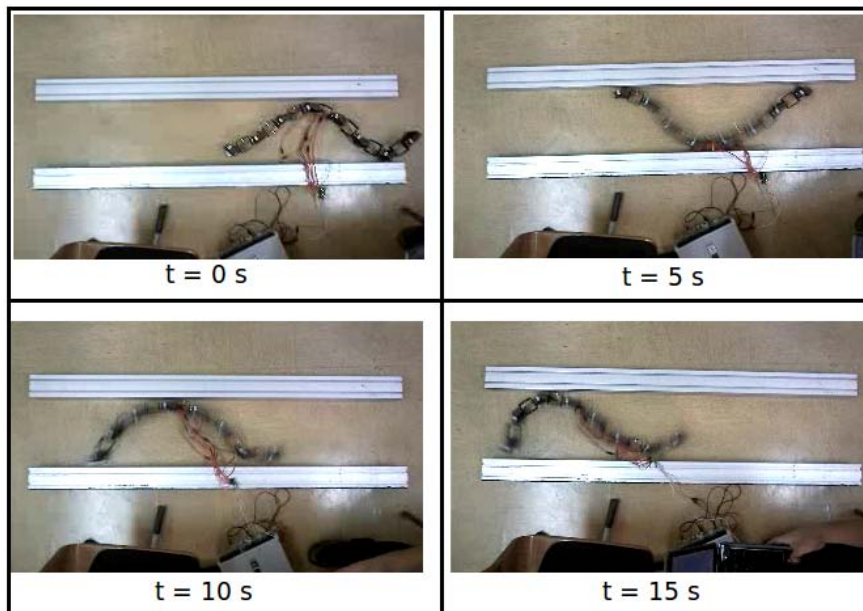
Las pruebas realizadas permitieron verificar la ejecución de la trayectoria serpentina en el robot diseñado. A partir del análisis del vídeo captado fue posible encontrar las variables cinemáticas independientes del movimiento real del robot y por consiguiente

## 7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE

---



**Figura 7.13: Posición Angular de las Articulaciones durante la trayectoria -** Se muestran las posiciones calculadas para cada segmento del robot serpiente durante un tiempo de tres segundos



**Figura 7.14: Pruebas del robot serpiente en un pasillo. -** Secuencia de imágenes que muestra el movimiento del robot serpiente sobre un pasillo, se utilizó para comprobar las características del movimiento serpentino

las demás variables cinemáticas.

- Largo de la zancada  $l = 0,063m$
- Tiempo de estancia  $t_s = 0,25s$
- Tiempo de progresión  $t_p = 0,89s$
- Velocidad de Avance  $v$

$$v = \frac{l}{t_p + t_s}; \quad v = \frac{0,063m}{0,25s + 0,89s}; \quad v = 55,45mm/s$$

- Frecuencia de Zancada  $f_z$

$$f_z = \frac{1}{t_p + t_s}; \quad f_z = \frac{1}{0,25s + 0,89s}; \quad f_z = 0,88Hz$$

- Velocidad de Progresión  $v_p$

$$v_p = \frac{l}{t_p}; \quad v_p = \frac{0,063m}{0,89s}; \quad v_p = 70,94mm/s$$

- Ciclo Útil  $DC$

$$DC = \frac{t_p}{t_p + t_s}; \quad DC = \frac{0,89s}{0,25s + 0,89s}; \quad DC = 78,1\%$$

## 7.6. Análisis de resultados

Fue posible comprobar experimentalmente la capacidad de los modos de marcha serpentina, logrando una velocidad de  $55,45mm/s$ , esta velocidad es mayor a la obtenida durante el modelado, debido a que al agregar las articulaciones pasivas a cada módulo su longitud se incrementó y por tanto permitió al robot alcanzar una velocidad mayor. Las demás variables cinemáticas guardan la relación similar a los resultados previstos en la simulación, el ciclo útil del movimiento real es un poco menor que en la simulación pero esta diferencia es mínima y puede deberse a errores en la medición. La amplitud y frecuencia del movimiento fueron las adecuadas y se comportaron de acuerdo a las predicciones.

## **7. DESARROLLO DE UN ROBOT SERPIENTE**

---

La dependencia que los modos de marcha ápodos, especialmente el modo de marcha serpentino, en un modelo específico de rozamiento se comprobó tanto teórica como experimentalmente, ya que no fue posible lograr un modo de marcha para el robot planar fuera del entorno específico. Se verificó la utilidad y versatilidad del diseño realizado, ya que se realizaron pruebas con diferentes configuraciones del robot en entornos variados.

## 8

# Conclusiones

Los métodos de locomoción desarrollados por los animales ápodos les han permitido poblar toda la superficie del planeta, por tanto su estudio e implementación en sistemas robóticos permite también desarrollar métodos de locomoción con los que se pueda ampliar la capacidad de adaptación de los robots a entornos menos estructurados.

El estudio realizado en el capítulo 2 dio como resultado la agrupación de los métodos de locomoción utilizados por distintas familias de animales ápodos en tres modos de marcha: Arrastre con dos puntos de Apoyo, Movimiento peristáltico y Ondulación Lateral. Las características de estos modos de marcha pueden ser analizadas desde diversas ópticas, en primera instancia el consumo energético de estos tiene dos componentes principales: uno es el necesario para vencer el rozamiento del robot con la superficie y mientras el segundo componente está determinado por la inercia del sistema. La velocidad a la que se realice el movimiento determina en gran medida cual de los dos componentes es más relevante, ya que a bajas velocidades la inercia puede ser despreciada mientras que el rozamiento es muy importante, por otro lado, un movimiento a alta velocidad conlleva fuerzas inerciales mayores. Otra manera de analizar los modos de marcha es de acuerdo a las características de fricción necesarias para poder generar el movimiento, desde este punto de vista, todos los métodos de locomoción ápoda son similares ya que tienen una alta dependencia en el modelo de fricción de la superficie, este aspecto se debe resaltar como uno de los mayores retos a resolver en la construcción de un robot ápodo.

La implementación de los tres modos de marcha en robots ápodos es un proceso que se ha venido desarrollando por diversos grupos de investigación alrededor del mundo,

## 8. CONCLUSIONES

---

se han logrado considerables avances y se están generando diferentes aplicaciones en las que los robots ápodos podrán jugar un papel importante, sin embargo quedan algunos aspectos por resolver, como el consumo energético y la consecuente autonomía de los robots, otro aspecto por mejorar es la capacidad de estos robots de transportar carga útil.

Por medio del estudio de los métodos de locomoción de los animales ápodos es posible evitar el cálculo del modelo cinemático inverso de un robot, ya que a partir de la síntesis de dichas formas de marcha en algoritmos, es posible determinar las posiciones y velocidades necesarias para que el robot siga una trayectoria determinada o se desplace a un punto en concreto, esto se refleja claramente en la ecuación 6.7 con la que es posible calcular de manera sencilla las posiciones angulares de cada una de las articulaciones de un robot serpiente para una trayectoria dada, sin importar el número de grados de libertad del mismo. De igual manera este tipo de expresiones facilitan el cálculo de los modelos dinámicos del robot.

La aplicación de los algoritmos desarrollados para controlar un robot ápodo fue realizada en primera instancia en un entorno simulado, de esta manera se comprobó como la variación en los modos de marcha permiten a un robot ápodo tener comportamientos diferentes, que se ven reflejados en las variables cinemáticas calculadas para cada modo de marcha. Los resultados de las simulaciones mostraron que los modos de marcha basados en el desplazamiento de ondas sinusoidales presentan mejores características en términos de velocidad y ciclo útil, mientras que los métodos basados en un punto de apoyo fijo presentan velocidades más bajas pero la eficiencia del movimiento más alta.

Finalmente, con el diseño y construcción de un robot serpiente modular reconfigurable, se comprobaron varios aspectos, en primera instancia las ventajas de un diseño de este tipo, ya que el robot puede ser reconfigurado o reparado de manera sencilla, por otro lado brinda la posibilidad de probar diferentes modos de marcha, finalmente se encontró que para que la implementación del método de marcha de ondulación lateral permitió al robot realizar trayectorias serpentinas de acuerdo a los parámetros establecidos.

# Referencias

- [1] SHIGEO HIROSE. Three basic types of locomotion in mobile robots. In *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on*, 1, pages 12–17, June 1991. 1, 30
- [2] Integrated Taxonomic Information System (ITIS), 2011. 7
- [3] S. BLAIR HEDGE. At the lower size limit in snakes: two new species of threadsnakes (Squamata: Leptotyphlopidae: Leptotyphlops) from the Lesser Antilles. *Zootaxa*, (1841):1–30, 2008. 7
- [4] ALBERTO BRUNETE GONZÁLEZ. *Design and Control of Intelligent Heterogeneous Multi-configurable Chained Microrobotic Modular Systems*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2010. 7
- [5] J. GRAY. The Mechanism of Locomotion in Snakes. *J Exp Biol*, 23(2):101–120, 1946. 7
- [6] CARL GANS. *Biomechanics: An Approach to Vertebrate Biology*. Lippincott, 1974. 8, 9, 11, 12
- [7] SAMANTHA A. HILBER. UF Vertebrate Zoology Lab - Snake Locomotion, 2007. [Online; accessed 9-August-2011]. 8
- [8] MICHAEL WALTON, BRUCE C. JAYNE, AND ALBERT F. BENNET. The Energetic Cost of Limbless Locomotion. *Science*, 249(4968):524–527, 1990. 10
- [9] C.K. BRAIN. Observations on the locomotion of the South West African adder, *Bitis perinqueyi* (Boulenger), with speculations on the origin of sidewinding. *Annals of the Transvaal Museum*, 24(1):19–24, April 1960. 11
- [10] H. W. LISSMANN. Rectilinear Locomotion in a Snake (*Boa Occidentalis*). *J Exp Biol*, 26(4):368–379, 1950. 12
- [11] DAVID CANNATELLA. Living Amphibians. Frogs and toads, salamanders and newts, and caecilians, 2008. 13
- [12] ANTHONY HERREL AND G. JOHN MEASEY. The kinematics of locomotion in caecilians: effects of substrate and body shape. *Journal of Experimental Zoology*, 313A:301–309, 3 2010. 12, 13
- [13] ADAM P. SUMMERS AND JAMES C. O'REILLY. A comparative study of locomotion in the caecilians *Dermophis mexicanus* and *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 121(1):65–76, 1997. 14
- [14] KJ QUILLIN. Kinematic scaling of locomotion by hydrostatic animals: ontogeny of peristaltic crawling by the earthworm *lumbricus terrestris*. *J Exp Biol*, 202(6):661–674, 1999. 14, 15
- [15] R. MCNEILL ALEXANDER. *Principles of Animal Locomotion*. Princeton University Press, 2003. 15, 17, 20, 26
- [16] The Soybean Cyst Nematode (*Heterodera glycines*), 2006. 16
- [17] H. W. LISSMANN. The Mechanism of Locomotion in Gastropod Molluscs: I. Kinematics. *J Exp Biol*, 21(1-2):58–69, 1945. 17
- [18] The biology of snails, 2006. 18
- [19] ERIC LAUGA AND A. E. HOSOI. Tuning gastropod locomotion: Modeling the influence of mucus rheology on the cost of crawling. *Physics of Fluids*, 18(11):113102, 2006. 17
- [20] J. GRAY, H. W. LISSMANN, AND R. J. PUMPHREY. The Mechanism of Locomotion in the Leech (*Hirudo Medicinalis* Ray). *J Exp Biol*, 15(3):408–430, 1938. 18
- [21] TIMOTHY W. CACCIATORE, ROMAN ROZENSHTEYN, AND WILLIAM B. KRISTAN. Kinematics and Modeling of Leech Crawling: Evidence for an Oscillatory Behavior Produced by Propagating Waves of Excitation. *The Journal of Neuroscience*, 20(4):1643–1655, 2000. 19
- [22] JINWAN LIM, HYUNJUN PARK, JAEMIN AN, YEH-SUN HONG, BYUNGKYU KIM, AND BYUNG-JU YI. % bf One pneumatic line based inchworm-like micro robot for half-inch pipe inspection. *Mechatronics*, 18(7):315–322, 2008. Special Section of Revised Papers from the 8th International IFAC Symposium on Robot Control, 8th International IFAC Symposium on Robot Control. 30, 34
- [23] BYUNGKYU KIM, SUNGHAK LEE, JONG HYEON PARK, AND JONG-OH PARK. Inchworm-Like Microrobot for Capsule Endoscope. In *Robotics and Biomimetics, 2004. ROBIO 2004. IEEE International Conference on*, pages 458–463, aug. 2004. 30
- [24] L. PHEE, A. MENCIASSI, S. GORINI, G. PERNORIO, A. ARENA, AND P. DARIO. An innovative locomotion principle for minirobots moving in the gastrointestinal tract. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, 2, pages 1125–1130, 2002. 30, 32
- [25] KEITH KOTAY AND DANIELA RUS. The Inchworm Robot: A Multi-Functional System. *Auton. Robots*, 8:53–69, January 2000. 31
- [26] JOSÉ EMILIO TORRES. *Diseño y construcción de un micro-robot modular y multiconfigurable*. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2006. 33

## REFERENCIAS

---

- [27] JE-SUNG KOH AND KYU-JIN CHO. **Omegabot : Biomimetic inchworm robot using SMA coil actuator and smart composite microstructures (SCM)**. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009 IEEE International Conference on*, pages 1154–1159, dec. 2009. 33
- [28] NORIHIKO SAGA AND TARO NAKAMURA. **Development of a peristaltic crawling robot using magnetic fluid on the basis of the locomotion mechanism of the earthworm**. *Smart Materials and Structures*, 13(3):566, 2004. 36
- [29] N. SAGA, T. NAKAMURA, AND S. UEDA. **Study on peristaltic crawling robot using artificial muscle actuator**. In *Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on*, 1, pages 679–684 vol.1, july 2003. 36
- [30] N. SAGA, T. NAKAMURA, J. UEHARA, AND T. IWADA. **Development of artificial muscle actuator reinforced by Kevlar fiber**. In *Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on*, 2, pages 950–954 vol.2, dec. 2002. 37
- [31] M. TAKAHASHI, I. HAYASHI, N. IWATSUKI, K. SUZUMORI, AND N. OHKI. **The development of an in-pipe microrobot applying the motion of an earthworm**. In *Micro Machine and Human Science, 1994. Proceedings., 1994 5th International Symposium on*, page 35, oct 1994. 37
- [32] HONGTAO GAO, JUAN DU, MO TANG, AND WEI SHI. **Research on a new type peristaltic micro in-pipe robot**. In *Complex Medical Engineering (CME), 2011 IEEE/ICME International Conference on*, pages 26–30, may 2011. 37
- [33] HAYATO OMORI, TARO NAKAMURA, AND TAKAYUKI YADA. **An underground explorer robot based on peristaltic crawling of earthworms**. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(4):358–364, 2009. 38
- [34] ARIANNA MENCIASSI AND PAOLO DARIO. **Bio-Inspired Solutions for Locomotion in the Gastrointestinal Tract: Background and Perspectives**Arianna Menciassi. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1811, Biologically Inspired Robotics):2287–2298, October 2003. 39
- [35] G. ROBINSON AND J.B.C. DAVIES. **Continuum robots - a state of the art**. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, 4, pages 2849–2854 vol.4, 1999. 41
- [36] G.S. CHIRIKJIAN AND J.W. BURDICK. **An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators**. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, pages 625–631 vol.1, may 1990. 42
- [37] G.S. CHIRIKJIAN AND J.W. BURDICK. **Design and experiments with a 30 DOF robot**. In *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*, pages 113–119 vol.3, may 1993. 42
- [38] R. WORST AND R. LINNEMANN. **Construction and operation of a snake-like robot**. In *Intelligence and Systems, 1996., IEEE International Joint Symposium on*, pages 164–169, nov 1996. 43
- [39] GAVIN S. P. MILLER. **Snake Robots for Search and Rescue**. In JOSEPH AYERS, JOEL L. DAVIS, AND ALAN RUDOLPH, editors, *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, pages 271–284. MIT Press, August 2002. 44
- [40] M. MORI AND S. HIROSE. **Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3**. In *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, 1, pages 829–834 vol.1, 2002. 45
- [41] M. HASHIMOTO, T. YAMADA, AND M. YAMAKITA. **Control of locomotion and head configuration for 3D snake robot**. In *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, 3, pages 1470–1475 vol.3, aug. 2002. 46
- [42] ALESSANDRO CRESPI, ANDRÉ BADERTSCHER, ANDRÉ GUIGNARD, AND AUKE JAN IJSPEERT. **AmphiBot I: an amphibious snake-like robot**. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4):163–175, 2005. Biomimetic Robotics. 46
- [43] A. CRESPI AND A. J. IJSPEERT. **AmphiBot II: An Amphibious Snake Robot that Crawls and Swims using a Central Pattern Generator**. In *Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2006)*, pages 19–27, September 2006. 46
- [44] H. YAMADA, CHIGISAKI S., M. MORI, K. TAKITA, K. OGAMI, AND S. HIROSE. **Development of Amphibious Snake-like Robot ACM-R5**. In *36th International Symposium on Robotics (ISR 2005), In Proceedings of*, 36, page 133, 2005. 46
- [45] C. WRIGHT, A. JOHNSON, A. PECK, Z. MCCORD, A. NAAKTGEBOREN, P. GIANFORTONI, M. GONZALEZ-RIVERO, R. HATTON, AND H. CHOSSET. **Design of a modular snake robot**. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2609–2614, 29 2007-nov. 2 2007. 47
- [46] G. MIGADIS AND K.J. KYRIAKOPOULOS. **Design and forward kinematic analysis of a robotic snake**. In *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, 4, pages 3493–3498 vol.4, apr 1997. 50
- [47] B. KLAASSEN AND K.L. PAAP. **GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control**. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, 4, pages 3014–3019 vol.4, 1999. 50
- [48] J. BORENSTEIN AND A. BORRELL. **The OmniTread OT-4 serpentine robot**. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 1766–1767, may 2008. 50
- [49] G. GRANOSIK AND J. BORENSTEIN. **The OmniTread serpentine robot with pneumatic joint actuation**. In *Robot Motion and Control, 2005. RoMoCo '05. Proceedings of the Fifth International Workshop on*, pages 105–110, june 2005. 51



- [50] JOSÉ L. PONS. *Emerging actuator technologies: a micromechatronic approach*. John Wiley & Sons, March 2005. 56, 63, 69, 70
- [51] JOHN M. HOLLERBACH, IAN W. HUNTER, AND JOHN BALLANTYNE. *A comparative analysis of actuator technologies for robotics*, pages 299–342. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992. 58, 66, 68
- [52] WIKIPEDIA. Electric motor — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2011. [Online; accessed 9-August-2011]. 59
- [53] R. H. MASKREY AND W. J. THAYER. A Brief History of Electrohydraulic Servomechanisms. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 100(2):110–116, 1978. 60
- [54] WIKIPEDIA. Hydraulic machinery — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2011. [Online; accessed 9-August-2011]. 60
- [55] P. LILJEBACK, O. STAVDAHL, AND A. BEITNES. Snake-Fighter - Development of a Water Hydraulic Fire Fighting Snake Robot. In *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV '06. 9th International Conference on*, pages 1–6, dec. 2006. 61
- [56] B. VERRELST, F. DAERDEN, D. LEFEBER, R. VAN HAM, AND T. FABRI. Introducing pleated pneumatic artificial muscles for the actuation of legged robots: a one-dimensional setup. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 583–590, October 2000. 62
- [57] R. WALKER. Design of a dextrous hand for advanced clawer applications. In *Conference Documentation of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003)*, July 2003. 62
- [58] Y. SABZEHEMIDANI, M. HUSSEIN, M. MAILAH, M.Z.M. ZAIN, AND MR ABDULLAH. Intelligent Hybrid Control of Piezoelectric Actuated Micro Robot. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMS APPLICATIONS, ENGINEERING & DEVELOPMENT*, 5(3):306–313, 2011. 63
- [59] J.W. PAQUETTE AND K.J. KIM. Ionomeric electroactive polymer artificial muscle for naval applications. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 29(3):729–737, july 2004. 64
- [60] S. MAEDA, Y. HARA, R. YOSHIDA, AND S. HASHIMOTO. Chemical robot-design of peristaltic polymer gel actuator-. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4325–4330, oct. 2009. 64
- [61] RON PELRINE, ROY KORNBLOH, QIBING PEI, AND JOSE JOSEPH. High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%. *Science*, 287(5454):836–839, 2000. 65
- [62] QIBING PEI, MARCUS ROSENTHAL, RON PELRINE, SCOTT STANFORD, AND ROY KORNBLOH. Multifunctional electroelastomer roll actuators and their application for biomimetic walking robots. Technical report, SRI International, 2003. 65
- [63] YOSEPH BAR-COHEN. Biologically Inspired Intelligent Robotics. In *SPIE Smart Structures Conference 2003, Proceedings of the*, March 2003. 65
- [64] CIMPRIC DARJAN. Shape memory alloys. Technical report, University of Ljubljana, January 2007. 66, 67
- [65] D. GRANT AND V. HAYWARD. Variable structure control of shape memory alloy actuators. *Control Systems, IEEE*, 17(3):80–88, jun 1997. 67
- [66] MURRAY R. ASCH. Initial Experience in Humans with a New Retrievable Inferior Vena Cava Filter. *Radiology*, 225(3):835–844, 2002. 67
- [67] CLAUDIO ROSSI, WILLIAM CORAL, JULIAN COLORADO, AND ANTONIO BARRIENTOS. Towards Motor-less and Gearless Robots: a bio-mimetic Fish Design. In *International Workshop on bio-inspired robots*, 2011. 67
- [68] HYUNWOO YUK, J.H. SHIN, AND SUNGHO JO. Design and control of thermal SMA based small crawling robot mimicking *C. elegans*. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 407–412, oct. 2010. 67
- [69] OLIVIER MICHEL. Cyberbotics Ltd. - Webots: Professional Mobile Robot Simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1(1):39–42, 2004. 84
- [70] SHIGEO HIROSE. *Biologically inspired robots : snake-like locomotors and manipulators*. Oxford University Press, Oxford ; New York :, 1993. 100
- [71] DYS. Dong Yang Servo Power Model Co.,Ltd - Servomotor S0213MG, 2011. [Online; accessed 9-August-2011]. 117
- [72] LYNXMOTION. Lynxmotion - C-87-standard-brackets, 2011. [Online; accessed 9-August-2011]. 117
- [73] PÅL LILJEBÄCK, ØYVIND STAVDAHL, AND KRISTIN Y. PETERSEN. Modular pneumatic snake robot: 3D modelling, implementation and control. In *16th IFAC World Congress. In Proceedings*, jul 2005. 121
- [74] MARÍA GALÁN. *Entorno de evaluación de técnicas de locomoción reptante para cadenas multicuerpo*. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2010. 125
- [75] JULIÁN COLORADO, ANTONIO BARRIENTOS, CLAUDIO ROSSI, MARIO GARZÓN, MARÍA GALÁN, AND JAIME DEL CERRO. Efficient Locomotion on non-wheeled Snake-like Robots. In *The 7th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics - ICINCO-2010*, jun 2010. 124