



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA  
EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

**U P I I T A**

**“DISEÑO PRELIMINAR DE UN MECANISMO  
PARA SIMULAR LA MARCHA  
DE UNA *Blaberus discoidalis*.”**

*Trabajo Terminal*

*Que para obtener el Titulo de*

***“Ingeniero en Biónica”***

**Presenta**

**Luis Alberto De León Melgarejo**

**Asesores**

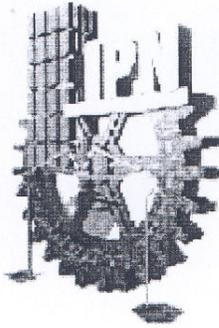
**Ing. Romy Pérez Moreno**

**M. en C. Víctor Hugo Ponce Ponce**

**Ing. Antonio García Bautista**

*México D.F. Junio del 2002*





# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA  
EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

## UPIITA

### *Trabajo Terminal*

### **"DISEÑO PRELIMINAR DE UN MECANISMO PARA SIMULAR LA MARCHA DE UNA *Blaberus discoidalis*."**

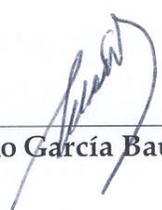
*Que para obtener el Título de*

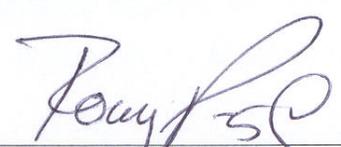
### ***"Ingeniero en Biónica"***

Presenta

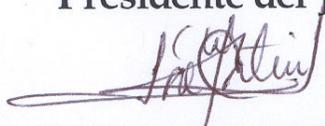
**Luis Alberto De León Melgarejo**

Asesores

  
Ing. Antonio García Bautista

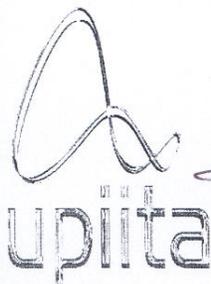
  
Ing. Romy Pérez Moreno

Presidente del Jurado

  
M en C. José Martín Segovia Cocom

Profesor Titular

  
M. en C. Rafael Santiago Godoy



México D.F. Junio del 2002

# DEDICATORIAS

A todas las personas que creyeron en mí y en este proyecto, a todos aquellos que me dieron su apoyo para lograr este trabajo, especialmente, a mis padres, que con sacrificios, cariño y apoyo incondicional han logrado que dé este nuevo paso para ser una persona mejor, por haber tolerado mis desvelos que también eran sus desvelos, pero sobre todo, por haberme ayudado en forma espiritual para que siguiera adelante.

Gracias a mis compañeros con quienes las desveladas y los sacrificios hechos parecían ser un juego por que hacían que todo fuera agradable, gracias por su compañía y por su amistad, especialmente a la familia del 43m, al H. club de modas, y a mis amigos Iván y Citlali.

Gracias a Dios por permitirme terminar bien sin tener que alejarme de las enseñanzas que cada semana obtenía, por permitirme llevar hasta su fin la escuela y seguir en las clases de la Escuela de Pastoral.

Por todo esto y mucho más...

Gracias

# 1. INDICE

<i>DEDICATORIAS</i> .....	3
<b>1. INDICE</b> .....	<b>4</b>
<b>2. RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>4. ANTECEDENTES</b> .....	<b>12</b>
<b>5. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>20</b>
<b>5.1 MORFOLOGÍA DE LA CUCARACHA</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2 MARCHA DE LA CUCARACHA</b> .....	<b>23</b>
5.2.1 MECÁNICA DE LAS EXTREMIDADES .....	23
5.2.2 COMPORTAMIENTO ANGULAR DE EXTREMIDADES EN LA MARCHA .....	25
5.2.3 RITMOS DE MOVIMIENTO DE LAS EXTREMIDADES .....	27
<b>5.3 DISEÑO DE MECANISMOS</b> .....	<b>32</b>
5.3.1 MECANISMO DE CUATRO BARRAS .....	32
5.3.2 GRADOS DE LIBERTAD .....	35
5.3.3 CRITERIOS DE GRASHOF .....	38
5.3.4 CINEMÁTICA DEL MECANISMO DE CUATRO BARRAS .....	41
5.3.5 SÍNTESIS DE LEVAS .....	45
<b>5.4 REDES NERVIOSAS</b> .....	<b>51</b>
5.4.1 CONCEPTO .....	51
5.4.2 VENTAJAS AL EMPLEAR REDES NERVIOSAS .....	52
5.4.3 CIRCUITOS BÁSICOS .....	53
5.4.4 FUNCIONAMIENTO .....	53
<b>6. PROCEDIMIENTO</b> .....	<b>56</b>
<b>6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.</b> .....	<b>57</b>
<b>6.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>57</b>

<b>6.3</b>	<b>HIPÓTESIS PROPUESTA.....</b>	<b>57</b>
<b>6.4</b>	<b>DESARROLLO.....</b>	<b>57</b>
<b>7.</b>	<b><i>RESULTADOS</i> .....</b>	<b>63</b>
<b>8.</b>	<b><i>CONCLUSIONES</i>.....</b>	<b>65</b>
<b>9.</b>	<b><i>RECOMENDACIONES</i>.....</b>	<b>67</b>
<b>10.</b>	<b><i>REFERENCIAS</i> .....</b>	<b>69</b>
<b>11.</b>	<b><i>APÉNDICE</i> .....</b>	<b>70</b>



## **2. RESUMEN**

En la actualidad, la mayoría de los vehículos terrestres se desplazan mediante ruedas, y algunos otros gracias a orugas. La tracción en estos medios de locomoción depende de muchos factores, como son: la fuerza de gravedad, el peso del cuerpo que cargan las orugas o las ruedas, la fricción de éstos con la superficie sobre la que se desplaza, etc.

El propósito de este trabajo es plantear el diseño preliminar de un mecanismo que sea capaz de desplazarse mediante 6 extremidades, tomando a la cucaracha como modelo biológico a imitar.

Existen estudios que analizan experimentalmente la cinemática y dinámica de la CUCARACHA *Blaberus discoidalis* [1, 2, 3, 4, 5, 6] en los que se ha podido observar que gracias a su postura posee una gran habilidad para alcanzar altas velocidades y mantener su estabilidad tanto en movimiento como en reposo.

Basado en estos estudios, en el presente trabajo se realiza el diseño preliminar de un mecanismo que genera un patrón de marcha similar al que tiene dicho insecto. Se escogió tomar a este animal como modelo debido a que posee características de estabilidad y rapidez que son deseables en un vehículo para terrenos de difícil acceso.

El diseño del modelo en su aspecto mecánico se realiza tomando en cuenta los estudios sobre cinemática y diseño de mecanismos buscando emplear únicamente cadenas cerradas.

Para el control del sistema se analiza la posibilidad de emplear redes nerviosas que se encarguen de coordinar el movimiento del mecanismo resultante del diseño preliminar.

Combinando los aspectos mecánicos y eléctricos para el diseño, se diseña un mecanismo de cuatro barras para cada extremidad. Llevando a cabo simulaciones mecánicas en 2D del diseño propuesto, se llega a la conclusión de que estas extremidades pueden lograr un patrón de tripié muy similar a la marcha de la cucaracha y cada extremidad puede ser controlada de una manera sencilla con un control de

encendido/apagado, siempre y cuando se haga un ajuste en la posición inicial de cada extremidad para que el mecanismo logre la sincronía necesaria, por lo que se descarta el empleo de redes nerviosas como sistema de control para la marcha de este prototipo.

# **3. INTRODUCCIÓN**

Este trabajo presenta el diseño preliminar propuesto para generar la marcha de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis* así como las modificaciones hechas a lo largo del desarrollo del trabajo, además de una breve explicación y fundamentos de las redes nerviosas, presentando los circuitos básicos que permiten su funcionamiento.

En el capítulo 4 se muestran algunos diseños hechos previamente por otras personas, el año en que fue hecho, y algunas características de los diseños.

En el capítulo 5 se presenta el marco teórico que hubo que considerar para la realización del trabajo, desde la biología de la cucaracha hasta métodos de diseño de mecanismos como es la construcción y trazado de levas así como análisis dinámico del mecanismo propuesto.

En el capítulo 6 se muestra el desarrollo del diseño, los aspectos que se tomaron en cuenta, los motivos y las razones del por que se pretende hacer este diseño.

Finalmente se muestra el diseño con que se logra una marcha muy similar a la que tiene la Cucaracha *Blaberus discoidalis*.

Al final de este trabajo, se hacen algunas recomendaciones que podrían mejorar el diseño preliminar que se planteó, así como sugerencias que podrían hacerse en futuros trabajos.

## **4. ANTECEDENTES**

Desde hace muchos siglos el hombre ha admirado la perfección de las obras de la naturaleza, y en su afán de crear, ha tratado de construir objetos animados procurando tomar como modelo a imitar las variadas formas de las distintas especies animales que lo rodean; al considerar que no pueden existir mejores modelos que los que el mismo medio ambiente ha forjado y seleccionado.

Uno de los registros más antiguos data del Siglo XVIII, de donde constan algunos dibujos originales de distintos mecanismos, tratando de aplicar algún modelo mecánico ya diseñado por la naturaleza como medio de locomoción.

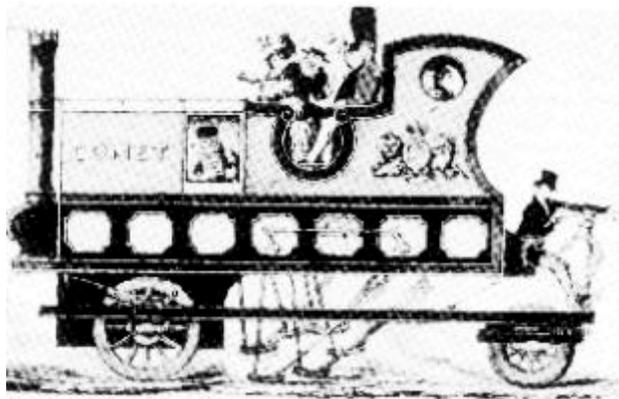


Fig. 3.1 Original de uno de los primeros vehículos con extremidades que data del Siglo XVIII.

El hombre mismo, debido a sus marcadas diferencias respecto a los demás seres vivos, siempre se ha considerado como la obra maestra de la naturaleza, razón por la cual ha tratado de fabricar máquinas que logren imitar al cuerpo humano en características como son la resistencia, adaptabilidad, equilibrio, pensamiento, etc.

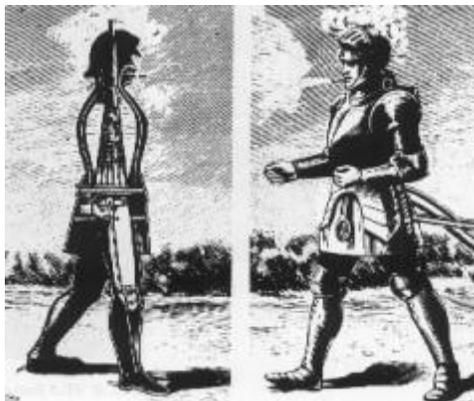


Fig. 3.2 La primera máquina bípeda: El hombre de vapor, por George Moore en 1893.

Para maquinaria en movimiento, el ser humano ha notado lo versátil y útil que es la postura bípeda que posee, y por esta razón ha tratado de imitarla en sus diseños, pero después de estudiar profundamente la marcha y observar todos los factores que en ella intervienen, el hombre se ha dado cuenta de lo complejo que es el caminar en dos pies. Es por esto que los modelos mecánicos a imitar han sido enfocados hacia criaturas consideradas más simples, como son los insectos, arácnidos, etc. Que aunque poseen una mayor cantidad de extremidades, requieren de un control más sencillo que el que podría emplearse en un modelo bípedo, además poseen la ventaja de agregar mayor estabilidad debido a los varios puntos de apoyo. Un ejemplo lo encontramos en el caballo mecánico, por L. A. Rygg, patentado el 14 de febrero de 1893, aunque la máquina nunca ha sido construida.



Fig. 3.3 Boceto de la primera máquina caminante cuadrúpeda.

Pero no solamente se ha pensado en imitar los modelos naturales aplicándolos a medios de transporte para fines pacíficos o de ayuda, sino que también se ha pensado en modelos aplicables con fines bélicos. Tal es el caso del vehículo de zancada del barón de Bechtolsheim, que aún no se ha sido construido; y el Millipede, vehículo que fue desarrollado durante la Primera Guerra Mundial.

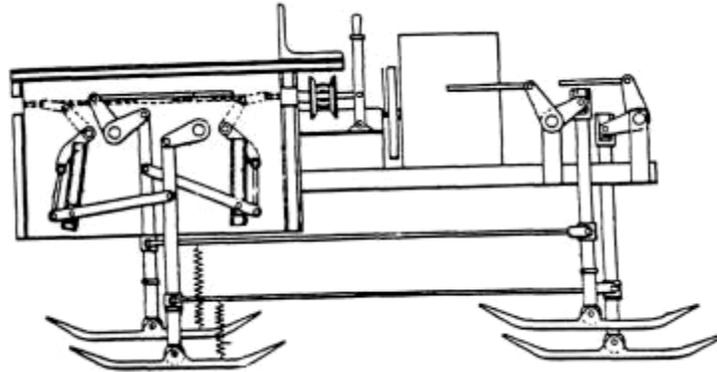


Fig. 3.4 Vehículo de zancada del barón de Bechtolsheim

Uno de los primeros mecanismos con piernas construido fue un tractor desarrollado por Thring durante la Primera Guerra Mundial, modelo que actualmente se encuentra en desuso.

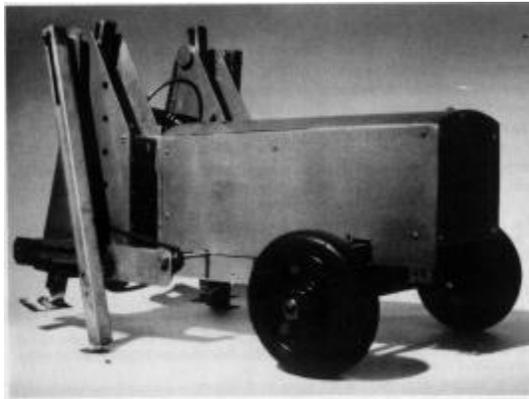


Fig. 3.5 Tractor con extremidades desarrollado durante la Primera Guerra Mundial

Con la aparición de las computadoras y las ventajas de control y velocidad de procesamiento que ésta traía consigo, en el año de 1966 se desarrolló la primera máquina caminadora controlada por computadora, cuyo nombre era Phoney Poney. Sus creadores fueron McGhee y Frank en la Universidad de Carolina del Sur. Esta máquina abrió un nuevo camino donde se relacionaban diseños mecánicos copiados de la naturaleza cuyo sistema de control estaba basado en la lógica de programación por computadora.

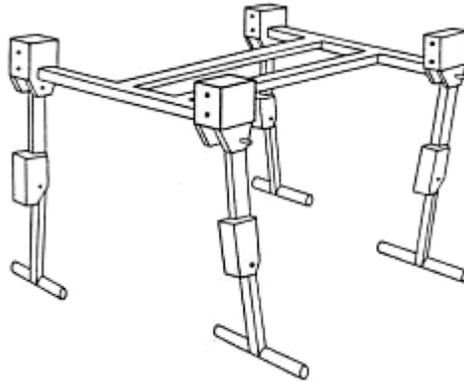


Fig. 3.6 Phoney Poney construido en 1966.

Al conjuntar la mecánica, la eléctrica y la hidráulica, en el año de 1968, se construyó el "cuadrúpedo G.E." .Este cuadrúpedo era un camión caminante diseñado por R. Mosher, el cual fue el primer camión caminante controlado manualmente. Este proyecto se terminó en 1968 y en la actualidad aún se conservan 3 de éstas máquinas. La aportación principal de este modelo fue la aplicación real de una máquina caminante como apoyo a las personas en su trabajo.

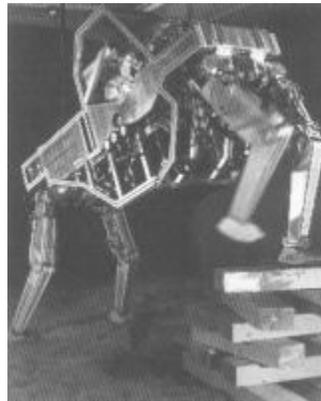
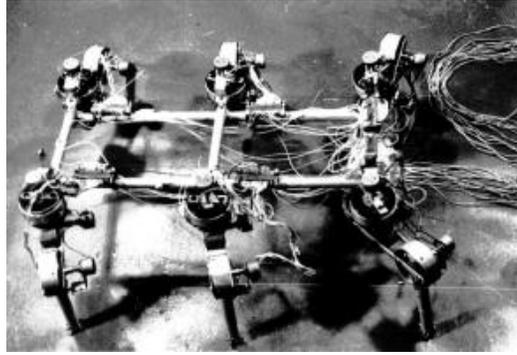
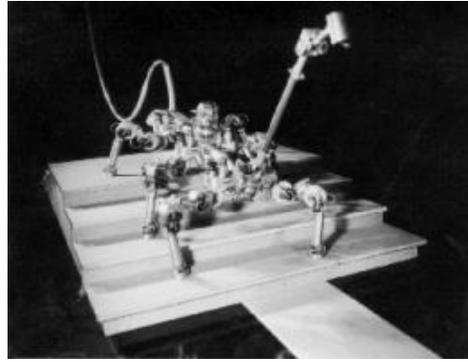


Fig. 3.7 Cuadrúpedo G.E.

Ya para el año de 1973, el Dr. Sc. prof. V. S. Gurfinkel, el Dr. sc. A. Yu. Schneider, el Dr. E.V. Gurfinkel y equipo, crearon un vehículo de seis extremidades (El Mascha) capaz de caminar, en el Departamento de Control de Movimiento en Sistemas Vivos y Robóticos del Instituto para Problemas de Información y Transmisión, Academia Rusa de Ciencia. Este vehículo era controlado por computadora. Este modelo fue modificado para el año de 1977 agregándole la capacidad de subir escaleras.



(A)



(B)

Fig. 3.8 Vehículo MASCHA. (A) Diseño de 1973. (B) Diseño de 1974.

En años más recientes, gracias a los grandes avances tecnológicos, para el año de 1984, se creó a TITAN III, cuyo nombre es un acrónimo del inglés Tokyo Institute of Technology, Aruku Norimono (vehículo caminante)". Los pies del TITAN III están equipados con sensores de contacto tipo pelo, y un sistema de procesamiento de señales construido de cables aliados con memoria de forma, cuya propiedad es la de tener superelasticidad, con lo que se determina automáticamente el estado de las extremidades con respecto a la tierra, es decir, si se encuentran apoyadas o no; además esta equipado con un sensor de postura y es controlado mediante un sistema inteligente llamado PEGASUS (del inglés Perspective Gate Supervisor System) que realiza la función de toma de decisiones acerca de la información obtenido y lleva a cabo la adaptación de la marcha de acuerdo al terreno. La longitud de las extremidades es de 1.2 m. y el peso es de 80 kg.

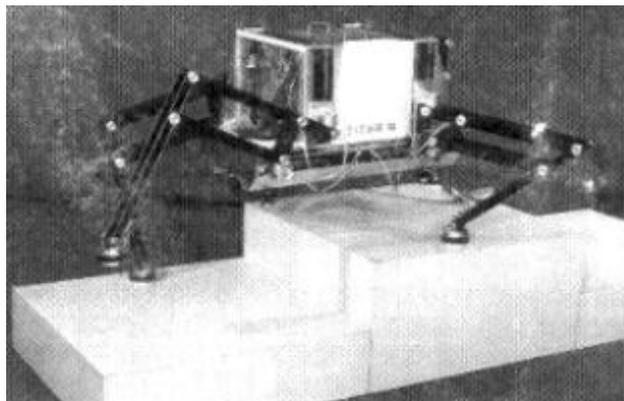


Fig. 3.9 TITAN III

El robot TITAN IV fue mostrado en el Pabellón Gubernamental en la Exhibición de Ciencia en Tsukuba, en el año de 1985, y durante el medio año que duró la exhibición, este robot caminó un total aproximado de 40 kilómetros e incluso logró pasar sobre un desnivel que tenía tres escalones. Posteriormente, le modificaron para que pudiese cambiar de marcha lenta a rápida automáticamente, cambiando de una postura alta a postura caída, con lo que podía también trotar. TITAN IV caminaba a una velocidad de 40 cm/sec. Cuando éste robot marchaba, tenía un movimiento de balance de izquierda a derecha. La longitud de la extremidad era de 1.2 m con un peso total de 160 kg. Tres prototipos de este modelo fueron fabricados en las Industrias Pesadas de Mitsubishi, y uno de estos prototipos es autónomo y contiene una batería y una computadora integrada.

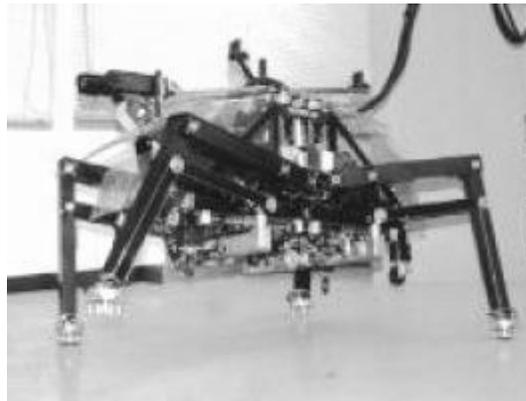


Fig. 3.10 TITAN IV

El año de 1992 fue el año en que Mark Tilden patentó y dio a conocer un nuevo sistema de control para robots, y otros mecanismos, dándole el nombre de Redes Nerviosas o VSPANS (de inglés Very Slow Propagation Artificial Neural System). En la patente que obtuvo, presentó un modelo mecánico al que llamó Spider I, que asombró a la comunidad científica por su forma de caminar tan similar a la de un insecto.

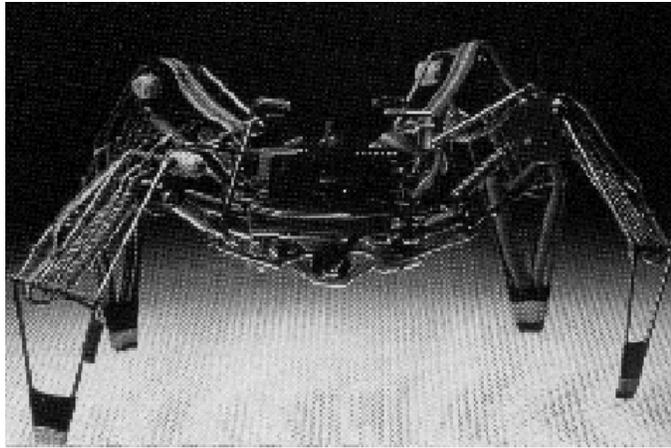


Fig. 3.11 Spider I

A estos, se une el más reciente prototipo del MIT aún en desarrollo, el Robot III, que pretende ser una copia fiel de su contraparte biológica, la *Blaberus discoidalis*. Este prototipo mide 76 cm y pesa 14 kilos, y hasta el momento, el robot tiene 24 GDL. Este prototipo ha sido financiado por la oficina de investigación naval, aportando un apoyo económico de 2 millones de dólares.

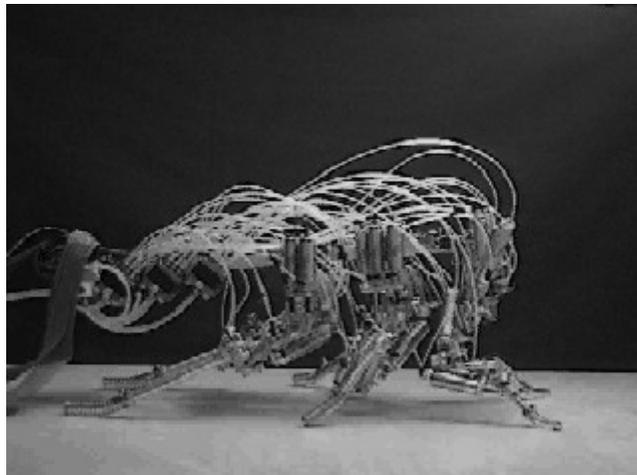


Fig. 3.12 Robot III

## **5. MARCO TEÓRICO**

## 5.1 MORFOLOGÍA DE LA CUCARACHA

El exoesqueleto de quitina que posee este animal le da un apoyo estructural fuerte y la vez muy ligero, el cual en términos de energía, es más económico y eficiente que el endoesqueleto para un animal de dimensiones semejantes. Al igual que las extremidades de animales más grandes, los segmentos proximales son anchos y los segmentos distales son mucho más delgados. El segmento distal (tarso) es ligero y fácilmente movido como en los mamíferos más veloces, tal es caso del caballo.

Cada extremidad se divide en cuatro segmentos principales. El primero y más proximal es el *coxis*, articulado con el tórax por una articulación dicondílica aunque en ocasiones solo se presenta una articulación pleural. El trocánter y el *fémur* forman el siguiente segmento, que frecuentemente es el más largo, y en su parte distal el fémur esta unido a la *tibia*. Ambas uniones son dicondílicas. Las articulaciones dicondílicas limitan el movimiento a un solo plano. De cualquier forma, las dos articulaciones más cercanas operan a ángulos rectos una de la otra. En consecuencia, por estar unidas de esta manera, permiten que las partes distales de la extremidad se muevan en todas direcciones con respecto a la articulación del cuerpo, lo que le permite una movilidad comparable con la de una articulación del tipo esférica.

El segmento terminal de la extremidad está formado por el *tarso* que posee mayor movilidad debido a la articulación monocondílica con la tibia. Este tipo de articulación una vez más es comparable en movilidad con una articulación del tipo esférica.

En contraste, la mayoría de los vertebrados poseen solo tres segmentos que conforman sus extremidades, mientras que la cucaracha tiene un segmento extra que le permite tener una mayor extensión en la extremidad.

Como muchos de los artrópodos, el cuerpo de la cucaracha “cuelga” de las piernas y esto mantiene el centro de gravedad abajo y en consecuencia, se incrementa la estabilidad.



Fig. 4 Segmento en sección transversal de una tijereta mostrando la suspensión del cuerpo en las piernas.

En la cucaracha, todos los músculos son estriados y cruzados, lo que permite a las extremidades ser capaces de contraerse rápidamente en fase una con la otra.

Una de las características más representativas de muchos animales que dan la impresión de ser veloces, es su habilidad para acelerar rápidamente en distancias cortas, así como cambiar de dirección en un breve instante de tiempo.

En las siguientes tablas se muestran las dimensiones, masas e inercias promedio de cada segmento de las extremidades de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis*. [7]

Segmento	Longitud (m)	Mass (kg)	Momento de inercia (kg·m <sup>2</sup> )
Extremidad frontal			
Coxis	$7.20 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.24 \times 10^{-3}$ )	$2.0 \times 10^{-5}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-5}$ )	$8.8 \times 10^{-11}$ ( $\pm 1.0 \times 10^{-11}$ )
Fémur	$7.65 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.20 \times 10^{-3}$ )	$7.9 \times 10^{-6}$ ( $\pm 0.4 \times 10^{-6}$ )	$3.9 \times 10^{-11}$ ( $\pm 0.3 \times 10^{-11}$ )
Tibia	$4.18 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.23 \times 10^{-3}$ )	$2.9 \times 10^{-6}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-6}$ )	$4.1 \times 10^{-12}$ ( $\pm 0.4 \times 10^{-12}$ )
Tarso y Pretarso	$5.39 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.14 \times 10^{-3}$ )	$1.6 \times 10^{-6}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-6}$ )	$3.5 \times 10^{-12}$ ( $\pm 0.3 \times 10^{-12}$ )

TABLA. 1 Dimensiones, masas e inercias promedio de la extremidad anterior de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis*

Segmento	Longitud (m)	Mass (kg)	Momento de inercia (kg·m <sup>2</sup> )
Extremidad media			
Coxis	$5.77 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.16 \times 10^{-3}$ )	$3.8 \times 10^{-5}$ ( $\pm 0.3 \times 10^{-5}$ )	$5.8 \times 10^{-11}$ ( $\pm 0.4 \times 10^{-11}$ )
Fémur	$9.86 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.35 \times 10^{-3}$ )	$1.4 \times 10^{-5}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-5}$ )	$1.2 \times 10^{-10}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-10}$ )
Tibia	$7.70 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.47 \times 10^{-3}$ )	$6.6 \times 10^{-6}$ ( $\pm 0.3 \times 10^{-6}$ )	$3.4 \times 10^{-11}$ ( $\pm 0.4 \times 10^{-11}$ )
Tarso y Pretarso	$6.58 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.27 \times 10^{-3}$ )	$2.1 \times 10^{-6}$ ( $\pm 0.3 \times 10^{-6}$ )	$7.5 \times 10^{-12}$ ( $\pm 0.9 \times 10^{-12}$ )

TABLA. 2 Dimensiones, masas e inercias promedio de la extremidad media de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis*

Segmento	Longitud (m)	Mass (kg)	Momento de inercia (kg·m <sup>2</sup> )
Extremidad trasera			
Coxis	$6.08 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.30 \times 10^{-3}$ )	$4.8 \times 10^{-5}$ ( $\pm 0.3 \times 10^{-5}$ )	$8.1 \times 10^{-11}$ ( $\pm 0.4 \times 10^{-11}$ )
Fémur	$1.06 \times 10^{-2}$ ( $\pm 0.03 \times 10^{-2}$ )	$1.8 \times 10^{-5}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-5}$ )	$1.7 \times 10^{-10}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-10}$ )
Tibia	$1.28 \times 10^{-2}$ ( $\pm 0.04 \times 10^{-2}$ )	$1.1 \times 10^{-5}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-5}$ )	$1.5 \times 10^{-10}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-10}$ )
Tarso y Pretarso	$8.02 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.38 \times 10^{-3}$ )	$2.6 \times 10^{-6}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-6}$ )	$1.4 \times 10^{-11}$ ( $\pm 0.1 \times 10^{-11}$ )

TABLA. 3 Dimensiones, masas e inercias promedio de la extremidad trasera de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis*

Segmento	Longitud (m)	Mass (kg)	Momento de inercia (kg·m <sup>2</sup> )
Cuerpo (no incluye las piernas)	$4.41 \times 10^{-2}$ ( $\pm 0.11 \times 10^{-2}$ )	$2.25 \times 10^{-3}$ ( $\pm 0.03 \times 10^{-3}$ )	$1.86 \times 10^{-7}$ Pitch $2.04 \times 10^{-7}$ Yaw ( $\pm 0.04 \times 10^{-7}$ ) $1.93 \times 10^{-8}$ Roll ( $\pm 0.37 \times 10^{-8}$ )

TABLA. 4 Dimensiones, masas e inercias promedio del cuerpo de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis*

## 5.2 MARCHA DE LA CUCARACHA

### 5.2.1 MECÁNICA DE LAS EXTREMIDADES

La función de todas las extremidades es doble, sirven para mantener el cuerpo por encima de la tierra y para ejercer fuerzas de propulsión en el cuerpo iguales y contrarias a

aquellas de la tierra. En la práctica, es imposible separar estas dos funciones que en conjunto deben ser consideradas mecánicamente en su capacidad para funcionar como *fulcro y palanca* (Gray, 1994,1968).

Como fulcro se debe considerar toda la extremidad como un único segmento unido al cuerpo y fijo a la tierra debido a la fricción del tarso. Si tal extremidad se encuentra verticalmente debajo del punto de unión con el cuerpo, entonces todas las fuerzas axiales son verticales y colaboran con el soporte del cuerpo, por lo que no existe componente para la propulsión. Si de cualquier forma el fulcro está inclinado, no existe solo una componente de soporte para el cuerpo, si no que también hay una componente de propulsión y otra de frenado. Bajo estas condiciones, incluso al considerar a la extremidad como un fulcro, esta tiene una acción de propulsión, solo que el centro de gravedad debe caer si es que ésta va a ocurrir.

Por lo anterior, el apoyo en la tierra tendrá componentes tanto horizontal como vertical, donde la componente vertical es responsable del apoyo, y la componente horizontal ayuda en la propulsión y el balance de fuerzas iguales y contrarias ejercidas por las otras extremidades.

Las extremidades también pueden ser consideradas como palancas; una vez más es simple de entender si se considera como una sola estructura. Cuando tensiones diferenciales son ejercidas por músculos extrínsecos entre el tórax y los puntos de inserciones musculares de la extremidad, estos músculos ejercen una fuerza con ángulos rectos respecto a los ejes de la extremidad en su punto de contacto con la tierra, y otra fuerza igual y contraria en el cuerpo. Esta acción de palanca tiene componentes verticales y horizontales.

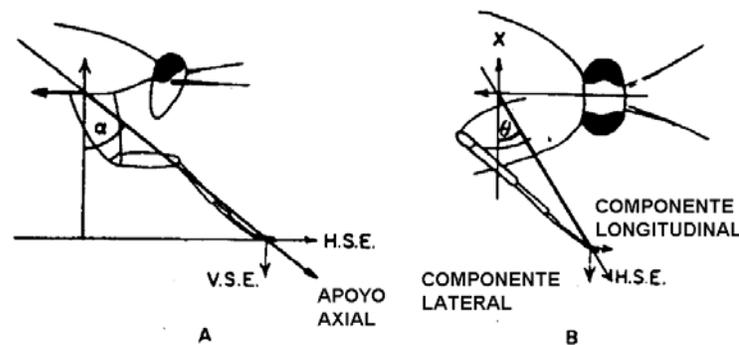


Fig. 4.2 Fuerzas operantes en el tarso cuando la extremidad delantera de un insecto esta funcionando como un fulcro inclinado. (A) Vista ventral; (B) Vista lateral, mostrando la inclinación de los ejes de la extremidad

delantera. La fuerza del tarso puede descomponerse en su efecto horizontal (H. S. E.) y vertical (V. S. E). (Hughes, 1952)

La funcionalidad de los pares de extremidades medias y traseras en la cucaracha es casi completamente como fulcros extensibles, debido al diminuto movimiento angular del coxis. En estas extremidades, existe un decremento progresivo en la acción como palanca pero un incremento en la acción como fulcro en las extremidades frontales a las traseras.

Las patas o extremidades traseras normalmente son las más largas en los insectos y llevan a cabo el mayor cambio de longitud durante el ciclo locomotor. Durante la extensión, ejercen un empuje axial contra el cuerpo y la tierra, lo que impulsa al cuerpo hacia delante. Debido a que estas extremidades están orientadas a un ángulo muy agudo respecto al eje horizontal del cuerpo, existe una relativamente pequeña componente vertical y consecuentemente el abdomen es frecuentemente arrastrado en la tierra. Parece una desventaja, pero esta característica de su cuerpo les permite vivir en grietas.

## 5.2.2 COMPORTAMIENTO ANGULAR DE LAS EXTREMIDADES EN LA MARCHA

Los movimientos de las extremidades en un insecto dado están determinados por la estructura en sí de las extremidades y particularmente por la naturaleza de la articulación entre coxis y tórax. En la cucaracha existen diferencias entre los tres pares de extremidades, como es el ejemplo de las extremidades anteriores que tienen un movimiento angular mucho más amplio que las extremidades medias, las cuales, en el giro, tiene un mayor movimiento angular que las extremidades traseras.



Fig. 4.3 Rango de movimientos angulares de los tres coxis durante la marcha normal de la cucaracha. (Hughes, 1952)

En la cucaracha, el coxis frontal se mueve con un arco cercano a los  $70^\circ$  en el plano vertical, y el tarso se colocado sobre la tierra justo en frente de la articulación con el tórax. Esto significa que la acción de fulcro de la extremidad delantera tendrá una componente horizontal que retarda la progresión, pero este es raramente el caso para las extremidades

meso torácicas, debido a que la punta de la extremidad es apenas colocada en la tierra frente a la articulación coxal con el cuerpo.

No existe componente en el caso de las extremidades meta torácicas (posteriores) por que siempre se encuentran colocadas sobre la tierra por detrás de la articulación coxal durante la marcha normal.

Un indicador de la dirección aproximada considerando la acción de las extremidades como fulcro, es dado por la orientación del tarso que probablemente es colocado para dar la máxima resistencia aumentando la fricción. En la cucaracha, los tarsos de la extremidad anterior son orientados a casi 45° en una dirección hacia delante, los tarsos traseros son colocados con el mismo ángulo pero en una dirección contraria mientras que los tarsos de las extremidades medias están casi a ángulos rectos con respecto al eje antero posterior del animal

Ángulo en las articulaciones (grados)	Extremidad trasera (Pro torácica)	Extremidad media (Meso torácica)	Extremidad frontal (Meta torácica)
<b>Cuerpo-Coxis</b>			
Inicial	26.6 ( $\pm 4.7$ )	40.9 ( $\pm 6.7$ )	69.2 ( $\pm 13.7$ )
Final	18.5 ( $\pm 1.3$ )	27.8 ( $\pm 3.3$ )	35.3 ( $\pm 10.0$ )
Rango	-8.1 ( $\pm 4.5$ )	-13.1 ( $\pm 4.3$ )	-33.9 ( $\pm 6.5$ )
<b>Coxis-Fémur</b>			
Inicial	35.7 ( $\pm 10.1$ )	43.5 ( $\pm 10.1$ )	62.4 ( $\pm 8.6$ )
Final	105.9 ( $\pm 11.6$ )	86.5 ( $\pm 7.7$ )	71.1 ( $\pm 10.4$ )
Rango	+70.2 ( $\pm 3.6$ )	+43.0 ( $\pm 7.5$ )	+8.6 ( $\pm 14.2$ )
<b>Fémur-Tibia</b>			
Inicial	52.2 ( $\pm 4.5$ )	81.3 ( $\pm 9.9$ )	114.6 ( $\pm 4.7$ )
Final	120.2 ( $\pm 8.7$ )	107.5 ( $\pm 2.6$ )	90.7 ( $\pm 16.9$ )
Rango	+67.9 ( $\pm 5.6$ )	+26.2 ( $\pm 11.1$ )	-23.8 ( $\pm 18.2$ )

El ángulo cuerpo-coxis es el ángulo proyectado en plano y,z (sagital).

Los valores tienen ( $\pm$ S.D)(N=5).

Un rango negativo indica flexión y un positivo indica extensión.

Tabla 5. Cambio de ángulos en las articulaciones durante la fase de contacto con el suelo. [7]

### 5.2.3 RITMOS DE MOVIMIENTO DE LAS EXTREMIDADES

En todos los insectos, las extremidades son levantadas en una secuencia ordenada que se mantiene relativamente constante aún a distintas velocidades, de hecho, las variaciones ocurren ciertamente en el ritmo cuando el insecto se mueve más rápido así como según la especie a la que pertenezca.

En el año de 1680, Borelli [8] sugirió que la forma más ventajosa de caminar de los insectos era levantar una extremidad trasera seguida de la extremidad ipsilateral media y finalmente la extremidad delantera también del mismo lado.

Demoor en el año de 1890 [9] sostuvo que la extremidad delantera de un lado era levantada simultáneamente con la extremidad media del lado contrario, mientras que la extremidad trasera ipsilateral era levantada un poco después, pero las tres extremidades del triángulo eran colocadas en la tierra al mismo instante.

Paul Bert en 1866 consideró que las extremidades de los insectos eran levantadas en el orden: L3 y R2; R1; L2 y R3; L1; L3 y L2; etc. Donde L significa izquierda y R derecha; y el orden 1, 2, 3 refieren a las extremidades delantera, media y trasera respectivamente. Este ritmo concuerda con el principio de Borelli, pero un estudio más detallado de la marcha de los insectos ha mostrado que hay un pequeño pero definitivo retraso entre el levantamiento de la extremidad media y la contralateral trasera.

De lo que estaban todos de acuerdo, era la consideración de que las extremidades delanteras tenían una función de tracción, que el par trasero tenía una función de empuje mientras que las piernas medias actuaban como fulcro.

Para el año de 1935, Von Holst formuló las siguientes reglas en base a los análisis y observaciones que había hecho:

- a) *Las extremidades adyacentes de un lado se van alternando;*
- b) *Las extremidades en diagonal trabajan sincrónicamente.*

Al analizar las grabaciones de la marcha de los insectos y observar detalladamente las imágenes tomadas se ha mostrado que estas reglas no son del todo correctas.

La primera regla es verdadera en principio, pero una relación aún más importante es la de que la onda de protracción se dirige hacia delante a través de las extremidades de cada lado, y en los insectos, ninguna extremidad es protaída hasta que la extremidad trasera haya tomado su posición de apoyo.

La segunda regla es completamente falsa, al menos para los insectos y los arácnidos. Así es que Huges, en el año de 1965 concluyó en las siguientes reglas que obedece la marcha de la cucaracha:

- i. *Ninguna extremidad delantera o media es protáida hasta que la extremidad trasera haya tomado su posición de apoyo. En otras palabras, existe una onda de protracciones posterior-anterior en cada lado.*
- ii. *Cada extremidad se alterna con la extremidad contralateral del mismo segmento, con un valor de fase resultante igual a 0.5; donde un segmento es la parte del cuerpo que une a un par de extremidades delanteras, traseras o medias.*

Aún a pesar de la formulación de estas reglas, no parecía que fuera suficiente para explicar los muy variados tipos de marcha que poseen los hexápodos en general.

Wilson, en 1966 tomó el trabajo de Huges, y usando sus reglas, formuló otros tres criterios que produjeran un modelo suficientemente capaz de explicar las distintas marchas mostradas por los insectos. Estos criterios adicionales fueron:

- iii. *El tiempo de protracción permanece constante a todas las frecuencias de paso.*
- iv. *El tiempo de retracción decrece con el incremento en la frecuencia de paso.*
- v. *El intervalo de paso entre la extremidad trasera y media, y entre la media y la anterior de cada lado, permanecen constantes a todas las frecuencias, mientras que el intervalo entre la extremidad delantera y trasera decrece con el incremento en la frecuencia.*

De la regla (iii) se puede decir que en las cucarachas, el aumento de velocidad se debe más a la disminución en el tiempo de retracción que por la disminución en el tiempo de protracción.

Todos estos ritmos pueden ser obtenidos al unir las reglas anteriores, y en todos los casos la razón dada entre el tiempo de proyección y el tiempo de retracción ( $p/r$ ) es variado, según sea el patrón que este llevando el insecto en ese instante.

Durante la marcha de los insectos, ( $p+r$ ) tiende a decrecer con un incremento en velocidad, y esto no altera el efecto de incremento en  $p/r$ . De hecho, es posible observar que con un incremento en la velocidad, la razón ( $p/r$ ) tiende a la unidad, que es cuando ocurre una alternación de los tripiés como puntos de apoyo, pero como un pequeño retardo se mantiene entre las proyecciones de las tres extremidades en turno aún cuando el insecto se está moviendo muy rápido, entonces, la razón ( $p/r$ ) es difícilmente cercana a la unidad.

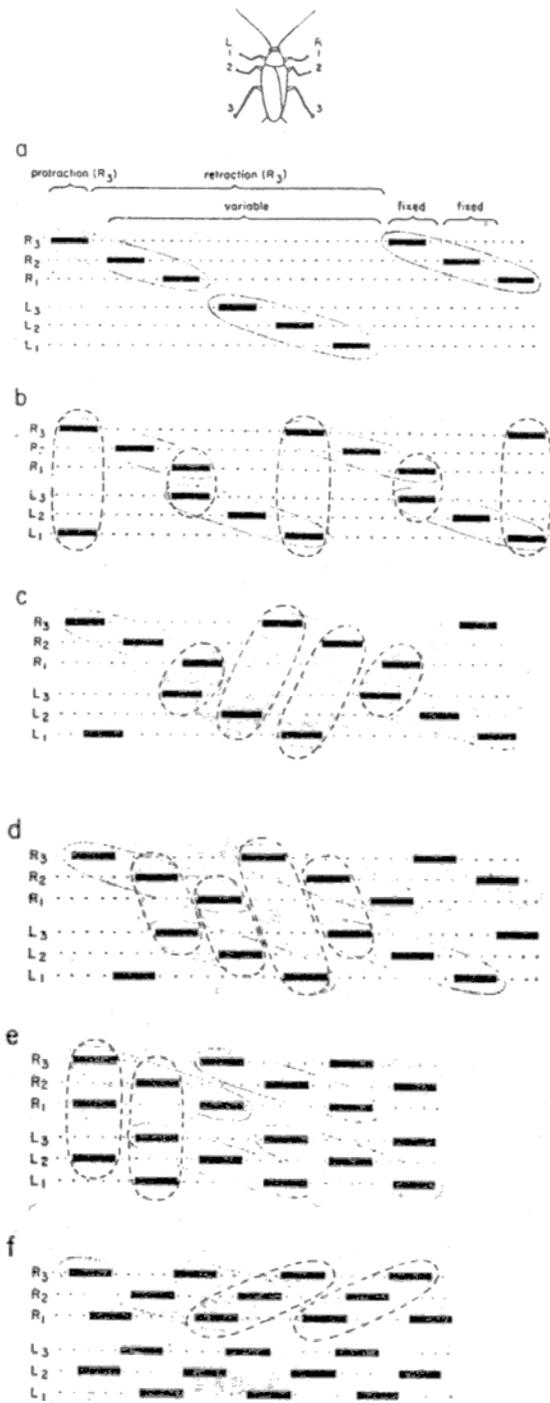


Fig. 4.4 Diagrama ilustrando una hipótesis relativa a los distintos modos de caminar de los insectos. El eje horizontal representa el tiempo. Las barras sólidas representan protracción (extremidad levantada del suelo). (a) A la frecuencia más baja, con cada paso tomando su turno; (b) - (f) muestran el incremento en los grados de solapamiento hasta llegar al tripié alternado que se muestra en (e). Note el aparente cambio de dirección de la secuencia de pasos en (f), producida cuando una segunda secuencia de paso se comienza antes de que la previa haya finalizado (Wilson, 1966).

De la figura anterior podemos decir que a la frecuencia de paso más baja (figura 4.4a) la secuencia de paso es:

R3, R2, R1, L3, L2, L1

Y mientras la frecuencia de paso se incrementa, los traslapes entre extremidades en ambos lados comienzan a producir marchas con la de la figura 4.4b

R3      R1      R3  
 ,R2,      ,L2,  
 L1      L3      L1

Conforme va ocurriendo el incremento en la frecuencia, más traslapes comienzan a ocurrir, hasta llegar al tripié que se presenta en la figura 4.4e

R3      R2      R3      R2  
 R1,      L3,      R1,      L3  
 L2      L1      L2      L1

A frecuencias que exceden el ritmo anterior, el traslape es tal que antes de que la secuencia de pasos 3, 2, 1 de un lado haya sido completada, la siguiente secuencia del mismo lado ha comenzado. Esto produce un revés aparente en la secuencia que a primera vista, parece romper con la regla 1, pero tomando esta marcha desde otra perspectiva, tendríamos la secuencia 3, 1, 2, 3, 1, 2 en cada lado, lo cual sí cumple con la regla.

Una forma alternativa de representar y producir los mismos cambios en los patrones de marcha, fue propuesta por Hughes en 1952, mostrando que las variaciones en la relación de protracción/retracción automáticamente conllevarían a los cambios en el ritmo de los movimientos de las extremidades. Obedeciendo las reglas 1 y 2, que son las reglas básicas, a continuación se muestran las gráficas de protracción/retracción propuestas por Hughes y que son equivalentes a las gráficas de la figura. 4.4

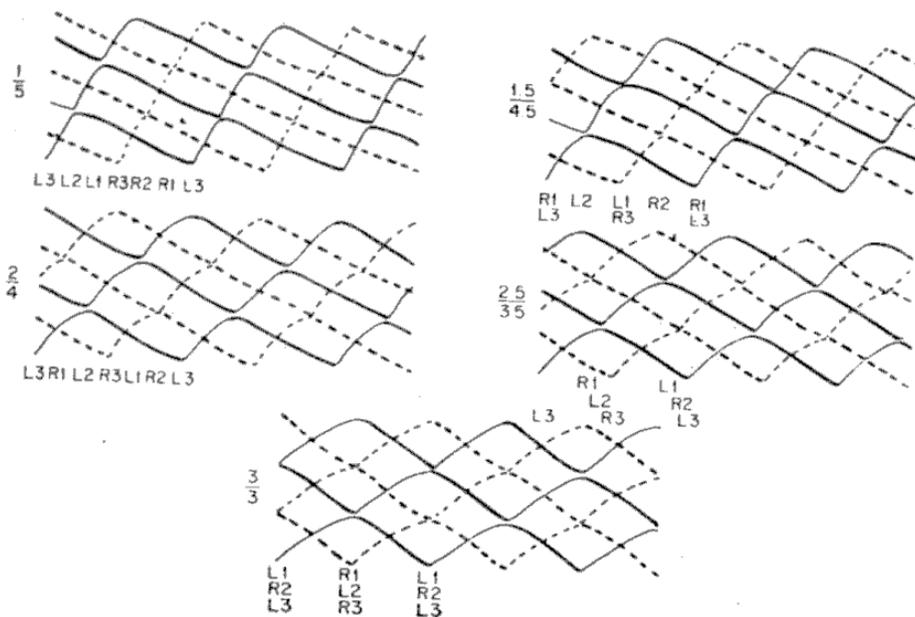


Fig. 4.5 Curvas que muestran el efecto de variación en la razón “tiempo de protracción/tiempo de retracción” (p/r). La suma del tiempo de protracción y el tiempo de retracción permanece constante en estos diagramas. Estos patrones son tomados de la marcha de un insecto que cumple con las dos reglas básicas de marcha. (Alter Hughes, 1952).

## 5.3 DISEÑO DE MECANISMOS

### 5.3.1 MECANISMO DE CUATRO BARRAS

Los mecanismos se usan en una gran variedad de máquinas y dispositivos. El eslabonamiento de lazo cerrado más simple es el de cuatro barras, que tiene tres eslabones móviles, uno fijo, cuatro juntas de revoluta, de pivote o de pasador (figura 4.6). El eslabón conectado a la fuente de potencia se llama eslabón de entrada (punto  $A_0A$ ). El eslabón seguidor conecta el pivote móvil B al pivote  $B_0$  de tierra. El eslabón acoplador o flotante conecta los dos pivotes móviles, A y B, “acoplando” el eslabón de entrada con el eslabón de salida. [11]

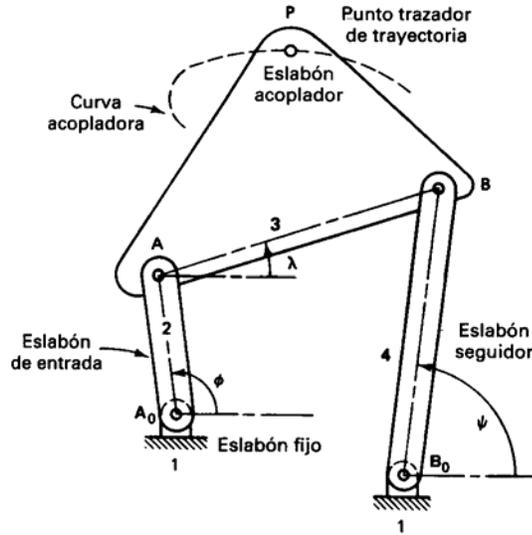


Fig. 4.6 Notación para un eslabonamiento de cuatro barras.

Puntos sobre el eslabón acoplador (llamados puntos trazadores de trayectorias) trazan en general curvas acopladoras algebraicas de sexto orden. La siguiente figura muestra a distintas curvas acopladoras (líneas de raya) muy diferentes que pueden ser generadas usando diferentes puntos trazadores de trayectoria (círculos sólidos pequeños).

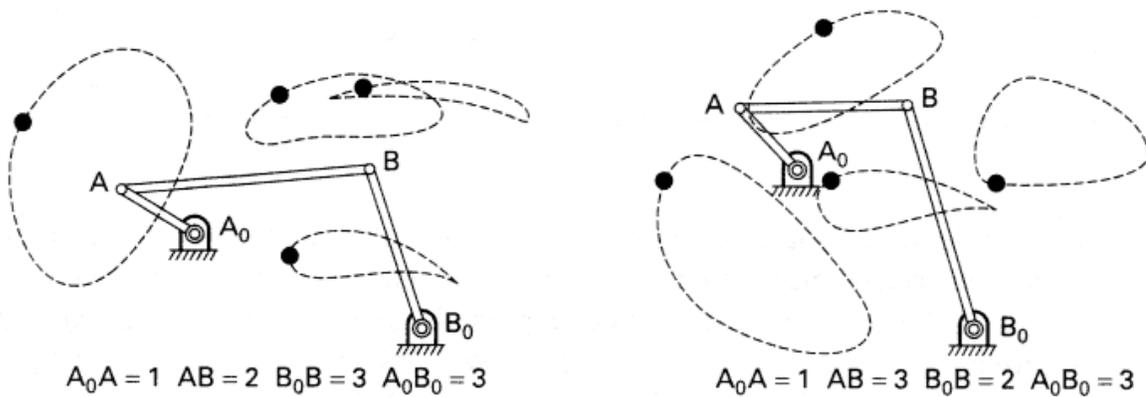


Fig. 4.7 Diagramas de muestra del atlas de curvas acopladoras de cuatro barras por Hrones y Nelson; las longitudes de las rayas de las curvas indican incremento de  $10^\circ$  en las rotaciones de la manivela. Aquí las longitudes de las rayas no están a escala. Los círculos sólidos son puntos trazadores de trayectorias diferentes.

El eslabonamiento de cuatro barras es la cadena básica de eslabones conectados por pasadores que permite movimiento relativo entre los eslabones. No obstante que se trata de un mecanismo sencillo, las cuatro barras forman un mecanismo muy versátil usado en miles

de aplicaciones y aunque estas aplicaciones son bastantes diferentes, los mecanismos pueden clasificarse en tres categorías dependiendo de las tareas que realizan: *generación de función*, *generación de trayectoria* y *generación de movimiento*.

Un *generador de función* es un eslabonamiento en el que el movimiento relativo (o fuerzas) entre eslabones conectados a tierra es de interés. En la generación de función, la tarea no requiere un punto trazador de trayectoria sobre el eslabón acoplador.

En la *generación de trayectoria* nos interesa sólo la trayectoria de un punto trazador y no la rotación del eslabón acoplador.

En la *generación de movimiento* es de interés el movimiento total del eslabón acoplador: las coordenadas  $x$ ,  $y$  del punto trazador de trayectoria y la orientación angular del eslabón acoplador.

En la siguiente figura se muestra un eslabonamiento diferente de cuatro barras que ha sido usado para efectuar cada tarea. La grúa de amortillado a nivel en la figura 4.8a es un mecanismo de cuatro barras de tipo especial que genera aproximadamente un movimiento en línea recta del punto trazador de trayectoria (punto P). Como se tiene un gancho en el punto trazador de trayectoria que sostiene una cuerda de alambre (que siempre cuelga verticalmente), la orientación del eslabón acoplador no es importante. Se tiene aquí una obvia tarea de generación de trayectoria.

La figura 4.8b es un mecanismo impulso para un aspersor rotativo para césped que es ajustable para obtener rangos diferentes de oscilación en la cabeza del aspersor. Este eslabonamiento ajustable puede usarse para variar el ángulo de rotación de la cabeza del aspersor usando el tornillo de apriete para cambiar el punto de unión de los eslabones acoplador y seguidor. Las rotaciones relativas entre los eslabones de entrada y seguidor en este mecanismo cumplen la tarea deseada de generación de función.

La figura 4.8c muestra el diseño de un eslabonamiento de cuatro barras para la cubierta del motor de un auto. El eslabonamiento controla la orientación relativa entre la cubierta del motor y el bastidor. La cubierta del motor no debe interferir con el bastidor al abrir y debe quedar ajustada al ras en la cavidad del vehículo en la posición cerrada. Las posiciones  $x$ ,  $y$  de un punto trazador de trayectoria en el extremo de la cubierta así como el ángulo de ésta con respecto al auto son críticos. Se trata en este caso de una generación de movimiento.

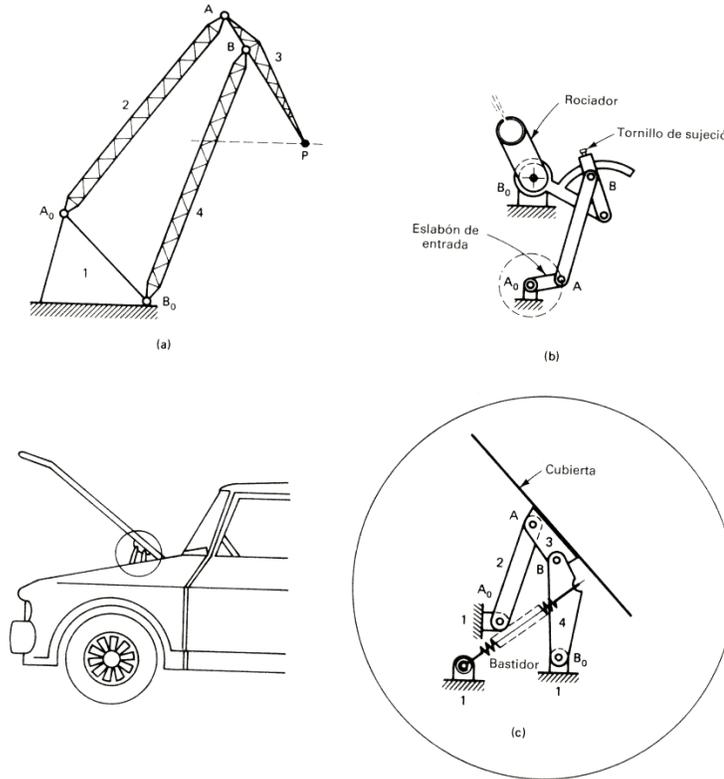


Fig. 4.8 Tareas de mecanismos de cuatro barras.

### 5.3.2 GRADOS DE LIBERTAD

Para realizar un análisis o un diseño cinemático de mecanismos, después de tener un bosquejo del mecanismo existente o propuesto, se debe determinar el número de grados de libertad del mecanismo.

Por *grado de libertad* de un mecanismo se entiende el número de entradas independientes requeridas para determinar la posición de todos los eslabones del mecanismo respecto a tierra.

Suponiendo que se requiere la posición exacta del eslabón rígido K en el sistema coordenado XY, como se muestra en la figura 4.9. ¿Cuántas variables independientes especificarán por completo la posición de este eslabón? La posición del punto A puede alcanzarse, digamos, desde el origen, moviéndose primero a lo largo del eje X una distancia  $x_A$  y luego una distancia  $y_A$  en la dirección del eje Y. Así, esas dos coordenadas, que representan dos traslaciones, localizan el punto A. Sin embargo se requiere más información para definir completamente la posición del eslabón K. Si se conoce el ángulo que forma la línea que une A con B con respecto al eje X, la posición del eslabón K está

especificada en el plano XY. Se tienen entonces tres variables independientes:  $x_A$ ,  $y_A$  y  $\theta$  (dos traslaciones y una rotación, o bien tres coordenadas independientes) asociadas con la posición de un eslabón en el plano. En otras palabras, un eslabón rígido no restringido en el plano tiene tres grados de libertad.

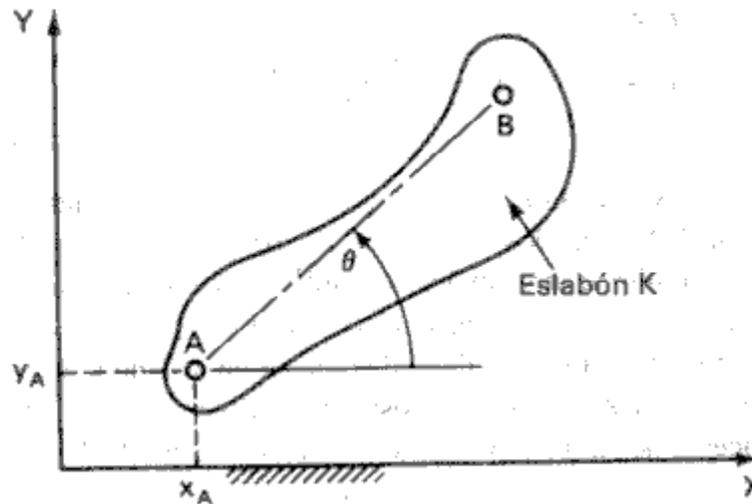


Fig. 4.9 Un eslabón solo localizado en un plano XY.

Si se tiene un ensamble de  $n$  eslabones, ellos tendrán un total de  $3n$  grados de libertad antes de que se unan para formar un sistema eslabonado. Las conexiones entre eslabones tienen como consecuencia la pérdida de grados de libertad del sistema total de eslabones. Una junta de pasador (revoluta) o articulación se llama conector de par inferior; éste se definía en textos antiguos como un conector con contacto superficial entre sus elementos, tal como el que existe entre el pasador y el casquillo. ¿Cuántos grados de libertad elimina una junta de pasador de los eslabones previamente no restringidos la juntarse éstos? Si el punto A sobre el eslabón en la figura 4.9 es una junta de pasador entre el eslabón K y la tierra, entonces, dos variables independientes  $x_A$  y  $y_A$ , quedan fijas, dejando a  $\theta$  como el solo grado de libertad restante en el eslabón K.

En un conjunto de eslabones, cada conexión por pasador eliminará dos grados de libertad de movimiento relativo entre eslabones sucesivos. Esta observación sugiere una ecuación que determinará los grados de libertad de una cadena de  $n$  eslabones conectados por  $f_l$  juntas de pasador, con la tierra (el eslabón fijo) considerado como uno de los eslabones:

$$\text{Grados de libertad} = F = 3(n - 1) - 2f_l$$

La ecuación anterior se conoce como *ecuación de Gruebler*. El número de eslabones móviles es  $(n-1)$ . La junta de pasador permite un grado de libertad relativo entre dos eslabones, de ahí la notación  $f_l$ . Esta ecuación es una de las ecuaciones de movilidad más popular usada en la práctica.

La mayoría de las tareas de los mecanismos requieren que una sola entrada sea transmitida a una sola salida. Por esto, los mecanismos de un solo grado de libertad, es decir, aquellos que tiene un movimiento restringido, son los tipos más frecuentemente usados. Por ejemplo, un mecanismo de cuatro barras como el presentado en la figura 4.6, intuitivamente podemos decir que es un mecanismo de un solo grado de libertad. En forma más analítica, podemos decir que una vez especificada la variable independiente  $\phi$ , la posición del punto A es conocida con respecto a  $A_0$  y  $B_0$ ; como las longitudes de la base del acoplador AB y del eslabón de salida  $B_0B$  son conocidas,  $B_0AB$  es un triángulo sin movilidad adicional (cero grados de libertad) y la posición del resto del eslabonamiento queda determinada.

Usando la ecuación de Gruebler para determinar el número de grados de libertad del mecanismo de cuatro barras, tenemos:

$$\begin{aligned}n &= 4, \quad f_l = 4 \\F &= 3(4 - 1) - 2(4) = +1\end{aligned}$$

El +1 indica un solo grado de libertad para el eslabonamiento.

¿Existen otros tipos de juntas además de los pasadores y los deslizadores que puedan usarse para conectar los miembros de mecanismos en movimiento plano? Sí, y son conocidas como juntas de pares superiores.

En tanto que las juntas de pasadores y deslizantes (pares inferiores) permiten sólo un grado de libertad de movimiento relativo, las juntas de pares superiores (definidas como juntas que tienen sólo contacto puntual o lineal) pueden permitir un número superior (dos o tres) de grados de libertad de movimiento relativo. Cada una tiene un par inferior equivalente, que consiste en tantos pares inferiores como el número de grados de libertad de movimiento relativo permitido por la junta de par superior.

El contacto de rodamiento sin deslizamiento permite sólo un grado de libertad de movimiento relativo, debido a la ausencia de deslizamiento, lo que deja sólo la rotación relativa  $\theta$ . La junta de rodamiento puro puede entonces incluirse como una junta tipo  $f_1$ . Esta junta, esencialmente de par superior, permite sólo un grado de libertad debido a la restricción adicional contra deslizamiento.

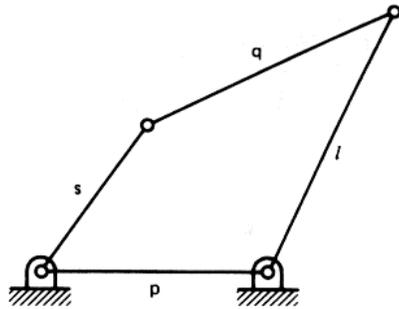
El contacto de rodamiento con deslizamiento restringe sólo un grado de libertad. Consideremos este punto como una combinación de deslizador y junta de pasador. Ésta permite dos grados de libertad ( $n = 3, f_1 = 2$ ) de movimiento relativo. Los grados de libertad de la junta de rodamiento y deslizamiento pueden verificarse por medio de una ecuación de Gruebler ampliada para incluir juntas de rodamiento y deslizamiento:

$$F = 3(n - 1) - 2f_1 - 1f_2$$

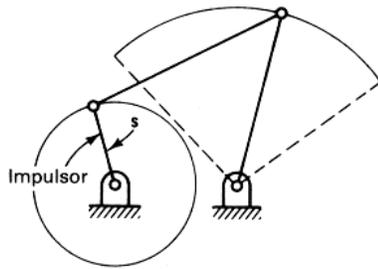
Donde  $f_2$  es el número de juntas de contacto de rodamiento con deslizamiento (aquellas que permiten dos grados de movimiento relativo a través de la junta).

### **5.3.3 CRITERIOS DE GRASHOF**

El mecanismo de cuatro barras puede adoptar la funcionalidad de un eslabonamiento manivela-oscilador, doble oscilador o manivela doble (eslabón de arrastre), dependiendo del rango de movimiento de los dos eslabones conectados a tierra. En la figura 4.10 se ilustran algunas de las diferentes posibilidades.

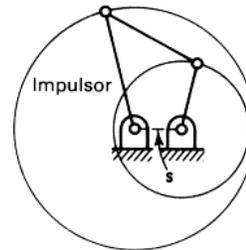


Eslabonamiento de cuatro barras:  
 $s$ , eslabón más corto;  $l$ , eslabón más largo;  $p$   
 y  $q$ , eslabones de longitud intermedia.



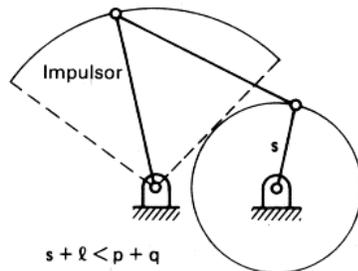
$$s + l < p + q$$

(a) Manivela-oscilador



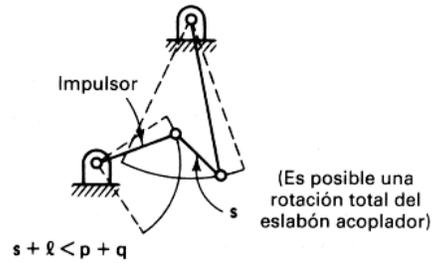
$$s + l < p + q$$

(b) Manivela doble



$$s + l < p + q$$

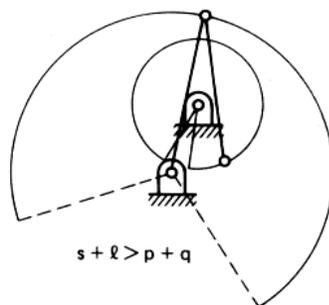
(c) Oscilador-manivela



$$s + l < p + q$$

(d) Oscilador-oscilador Grashof

(Es posible una  
 rotación total del  
 eslabón acoplador)



$$s + l > p + q$$

(e) Oscilador-oscilador no-Grashof  
 (Oscilador triple)



$$s + l = p + q$$

(f) Mecanismo con punto de cambio  
 en configuración acodada

Fig. 4.10 Tipos de mecanismos Grashof y no Grashof de cuatro barras

El eslabón de entrada de tipo manivela-oscilador puede girar  $360^\circ$  continuamente mientras el eslabón de salida sólo "se mece" (u oscila). Tanto el eslabón de entrada como el

de salida en el tipo manivela-doble o eslabonamiento de arrastre efectúan revoluciones completas, en tanto que el doble oscilador tiene rotaciones limitadas de los eslabones de entrada y salida. En el eslabonamiento en paralelogramo, donde la longitud del eslabón de entrada es igual a la del eslabón de salida y las longitudes de los eslabones acoplador y tierra son también iguales, los eslabones de entrada y salida pueden girar  $360^\circ$  o cambiar a una configuración cruzada llamada eslabonamiento de antiparalelogramo. Podría intuirse que un mecanismo particular de cuatro barras debe corresponder a uno de estos tipos, dependiendo de alguna relación entre las longitudes de sus eslabones. Los *criterios de Grashof* proporcionan esta relación. La ley de Grashof establece que *la suma de los eslabones más corto y más largo de un mecanismo plano de cuatro barras no puede ser mayor que la suma de los dos restantes eslabones para que se tenga una rotación relativa continua entre dos eslabones*. Si identificamos el eslabón más largo con  $l$ , el más corto con  $s$  y los dos restantes con  $p$  y  $q$ , son válidas las siguientes relaciones:

1. Si  $l + s < p + q$ , se tienen cuatro tipos posibles de mecanismo Grashof.
  - a. Se obtiene un mecanismo de manivela-oscilador cuando el eslabón más corto es la manivela, y la tierra cualquiera de los eslabones adyacentes.
  - b. Se obtiene un mecanismo de manivela doble (eslabonamiento de arrastre) cuando el eslabón más corto es la tierra.
  - c. Se forma un mecanismo de oscilador-manivela cuando el eslabón más corto es el seguidor.
  - d. Se obtiene un mecanismo de oscilador doble cuando el eslabón opuesto al más corto es la tierra.
2. Si  $l + s > p + q$ , resultan cuatro mecanismos de oscilador triple tipo no-Grashof, dependiendo de cuál eslabón es la tierra. Un movimiento relativo continuo no es posible para este caso.
3. Si  $l + s = p + q$ , los cuatro posibles mecanismos son los del caso 1, pero todos ellos sufren de la condición de punto de cambio: las líneas centrales de todos los eslabones resultantes colineales, creándose también una condición acodada (que ocurre cuando el de entrada y el acoplador están alineados). Los acodamientos son deseables, por ejemplo, para obtener una alta ventaja mecánica.

4. El eslabonamiento de paralelogramo es un caso especiales del inciso 3; en donde  $l = q$  y  $s = p$  y los eslabones cortos están separados por un eslabón largo. Los cuatro eslabonamientos son de manivela doble si son controlables a través de los puntos de cambio. Éste es el único mecanismo de cuatro barras capaz de producir movimiento paralelo del acoplador, pero todas las trayectorias son arcos circulares.

### 5.3.4 CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL MECANISMO DE CUATRO BARRAS

La cinemática es la rama de la mecánica de sólidos que trata del estudio del movimiento relativo entre cuerpos.

Para este estudio es necesario tener una expresión analítica que relacione las posiciones angulares de los eslabones de un mecanismo; en este caso, de cuatro barras. Para ello, la forma mas usada para obtener esta expresión analítica es con números complejos.

Cuando un par ordenado de números, escrito  $(a,b)$  define un tercer número  $c=(a,b)$ ,  $c$  se llama número complejo. El número  $c = a + ib$  se llama número complejo y es bidimensional, ya que implica tanto a  $a$  como a  $ib$ . Los números  $a$  y  $b$  son reales; el número  $a$  se llama parte real e  $ib$ , parte imaginaria.

Ahora, supongamos que  $c$  está representado por una distancia  $r$  trazada a partir de  $O$ , como se muestra en la figura 4.11.

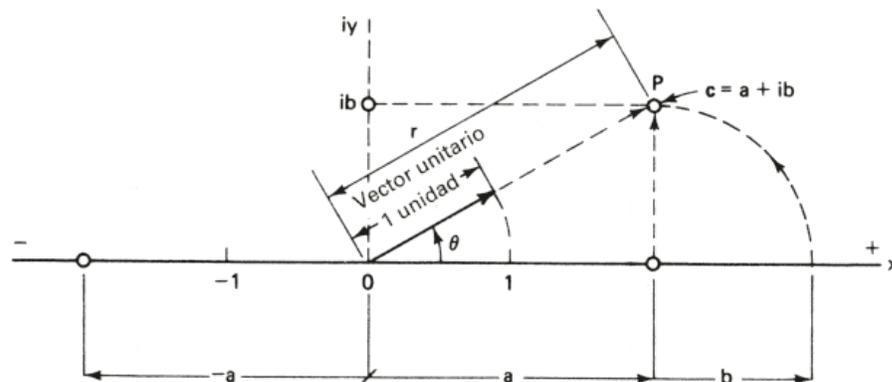


Fig. 4.11 El número complejo  $c = a + ib$  es bidimensional y consiste en las partes real e imaginaria  $a$  e  $ib$ , respectivamente.

La doble flecha indica que  $r$  no es un segmento de línea dirigido sino, más bien, un "valor absoluto", siempre positivo. Geométricamente,  $c$  es un radio vector:  $r$  veces la

longitud de un vector de longitud unitaria. Se puede describir la posición del punto extremo  $P$  del radio vector de dos maneras usando pares de números. La forma polar incluye la magnitud de radio  $r$  y el ángulo  $\theta$  del radio vector medido desde el eje real positivo horizontal. La forma cartesiana (rectangular) especifica la parte real  $a$  del radio vector y la parte imaginaria  $ib$ . Las formas polar y cartesiana están relacionadas por medio de la ecuación de Euler:

$$c = a + ib = r(\cos \theta + i \sin \theta) = re^{i\theta}.$$

Donde:

$$r = |c| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \arg c = \arg(a + ib)$$

La figura 4.11 es una representación del número complejo  $c$  mostrado en lo que se llama el plano complejo de Gauss-Argand. Cualquier punto en este plano representa un número complejo. El valor absoluto del número complejo es  $r$ , llamado también módulo;  $\theta$  se llama argumento o ángulo, y siempre se mide desde el eje real positivo así como positivo en sentido antihorario. Al tomar el argumento del número complejo  $a + ib$  no es suficiente tomar el arco tangente de la razón  $b/a$ . Esto se debe a que el arco tangente es multivaluado. Por eso, los programadores han introducido la función  $\text{ATAN2}(y,x)$  para evitar la ambigüedad del arco tangente; esta función con  $y$  y  $x$  reales con signo da el argumento de  $x + iy$ . De esta forma, un eslabón puede representarse como un número complejo en representación de Euler, por lo que se resolverá de esa manera.

Si aplicamos las ecuaciones de Euler a cada eslabón en el mecanismo de cuatro barras se forma un sistema de ecuaciones que resolvemos para  $\theta_3$  y  $\theta_4$ . Se obtienen los siguientes resultados:

$$\theta_4 = 2a \tan \left( \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C - A} \right)$$

$$\theta_3 = 2a \tan \left( \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - F^2 + D^2}}{F - D} \right)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
A &= 2r_4(r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos \theta_2) \\
B &= 2r_4(r_1 \sin \theta_1 - r_2 \sin \theta_2) \\
C &= r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 + r_4^2 - 2r_1r_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\
D &= 2r_3(r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1) \\
E &= 2r_3(r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1) \\
F &= r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - r_4^2 - 2r_1r_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)
\end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores, las constantes  $r_n$ ,  $\theta_2$ , y  $\theta_1$  son conocidas ya que representan las longitudes de los eslabones, el ángulo de entrada y el ángulo del eslabón fijo, respectivamente.

La velocidad expresa la rapidez de cambio en la posición de un cuerpo. La aceleración expresa una variación análoga respecto a la velocidad. Al derivar las expresiones que representan la posición de los eslabones tres y cuatro, se obtienen las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}
\omega_4 &= \frac{\omega_2 r_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)}{r_4 \sin(\theta_4 - \theta_3)} \\
\omega_3 &= \frac{\omega_2 r_2 \sin(\theta_4 - \theta_2)}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \\
\alpha_4 &= \frac{\omega_3^2 r_3 + \omega_2^2 r_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) + \alpha_2 r_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) - \omega_4^2 r_4 \cos(\theta_4 - \theta_3)}{r_4 \sin(\theta_4 - \theta_3)} \\
\alpha_3 &= \frac{\omega_4^2 r_4 - \omega_2^2 r_2 \cos(\theta_2 - \theta_4) - \alpha_2 r_2 \sin(\theta_2 - \theta_4) - \omega_3^2 r_3 \cos(\theta_3 - \theta_4)}{r_3 \sin(\theta_3 - \theta_4)}
\end{aligned}$$

Que son las ecuaciones para el mecanismo de cuatro barras en un instante dado.

La dinámica es la rama de la mecánica de sólidos que combina la cinética y la cinemática, es decir, combina las fuerzas y momentos sobre los cuerpos así como sus movimientos relativos.

Para el mecanismo de cuatro barras, como el mostrado en la figura 4.12, se tiene el siguiente análisis.

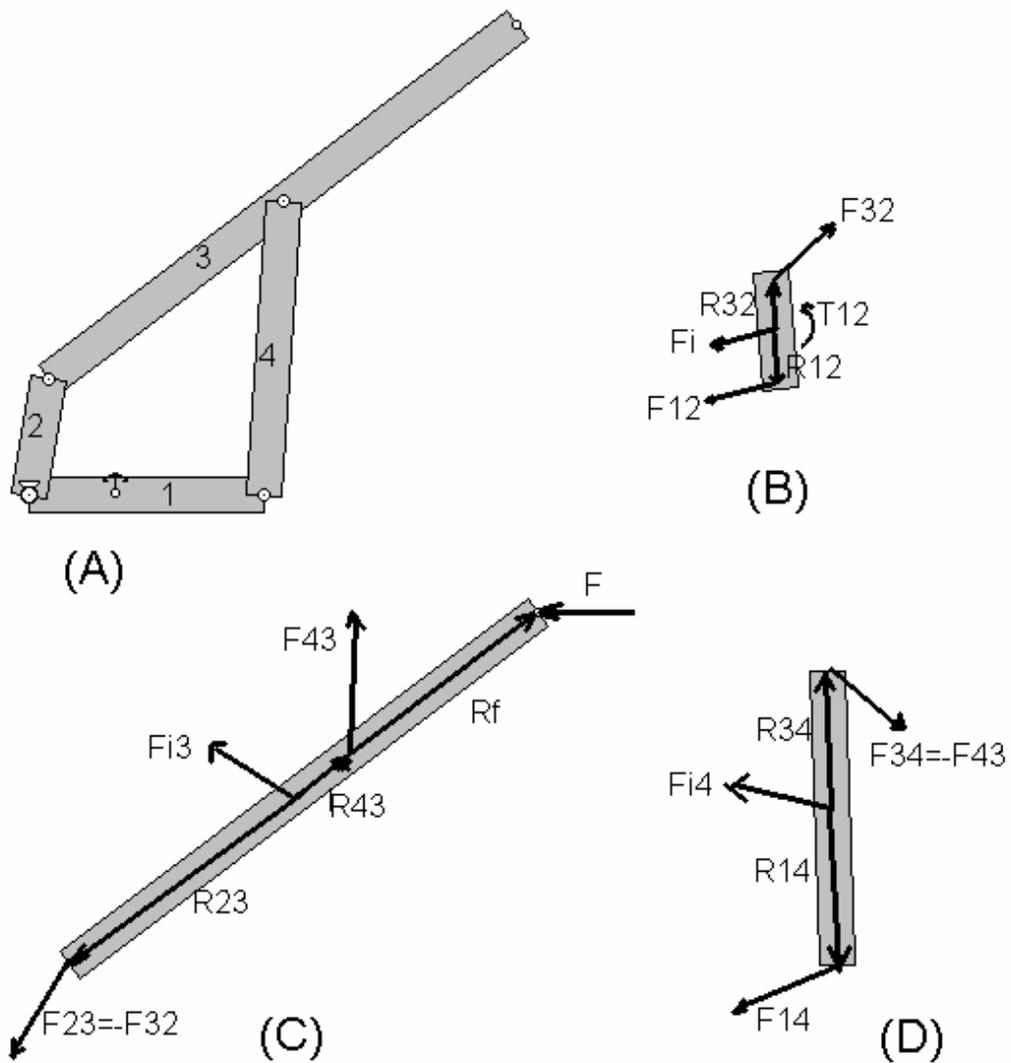


Fig. 4.12 (A) Mecanismo de cuatro; (B) Análisis de fuerzas para la manivela; (C) Análisis de fuerzas para el acoplador; (D) Análisis de fuerzas para el seguidor.

Descomponiendo el mecanismo en sus distintos eslabones y realizando el análisis dinámico, tenemos las siguientes ecuaciones. Para la manivela, se obtienen las primeras tres ecuaciones, para el acoplador las siguientes y para el seguidor las últimas tres:

$$F_{32x} + F_{12x} = m_2 A_{2x} \dots\dots\dots(1)$$

$$F_{32y} + F_{12y} = m_2 A_{2y} \dots\dots\dots(2)$$

$$R_{12} \times F_{12} + R_{32} \times F_{32} + T_2 = I_2 \alpha_2 \dots\dots\dots(3)$$

$$-F_{32x} + F_{43x} + F_x = m_3 A_{3x} \dots\dots\dots(4)$$

$$-F_{32y} + F_{43y} = m_3 A_{3y} \dots\dots\dots(5)$$

$$-R_{23} \times F_{32} + R_{43} \times F_{43} + R_f \times F = I_3 \alpha_3 \dots\dots\dots(6)$$

$$F_{14x} - F_{43x} = m_4 A_{4x} \dots\dots\dots(7)$$

$$F_{14y} - F_{43y} = m_4 A_{4y} \dots\dots\dots(8)$$

$$R_{14} \times F_{14} - R_{34} \times F_{43} = I_4 \alpha_4 \dots\dots\dots(9)$$

Donde las incógnitas son:

$$F_{32x}, F_{12x}, F_{32y}, F_{12y}, T_2, F_{43x}, F_{43y}, F_{14x}, F_{14y}$$

Y colocando estas ecuaciones en forma matricial, se llega a:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{12y}(t) & R_{12x}(t) & -R_{32y}(t) & R_{32x}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{23y}(t) & -R_{23x}(t) & -R_{43y}(t) & R_{43x}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{34y}(t) & -r_{34x}(t) & -r_{14y}(t) & r_{14x}(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ F_{32x} \\ F_{32y} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{14x} \\ F_{14y} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 A_2(t) \cos(\theta_2(t)) \\ m_2 A_2(t) \sin(\theta_2(t)) \\ I_2 \alpha_2(t) \\ m_3 A_3(t) \cos(\theta_3(t)) - F_x \\ m_3 A_3(t) \sin(\theta_3(t)) \\ I_3 \alpha_3(t) + R_{fy}(t) F_y \\ m_4 A_4(t) \cos(\theta_4(t)) \\ m_4 A_4(t) \sin(\theta_4(t)) \\ I_4 \alpha_4(t) \end{bmatrix}$$

La matriz anterior se puede resolver empleando un software de procesamiento matemático como esl MatLab.

### 5.3.5 SÍNTESIS DE LEVAS

Una leva es un dispositivo adecuado para transformar un movimiento en otro. Este elemento de máquina tiene una superficie curva o ranurada que casa con un seguidor y le imprime movimiento. El movimiento de la leva (usualmente rotatorio) se transforma en oscilación, traslación o ambos, del seguidor. Debido a las varias geometrías de las levas y al gran número de combinaciones de leva y seguidor, la leva es un elemento mecánico sumamente versátil. Aunque la leva y el seguidor pueden diseñarse para la generación de movimiento, trayectoria o función, la mayoría de las aplicaciones usan la leva y seguidor para la generación de función.

Los tipos más comunes de levas de acuerdo con la forma de éstas son las de placa o disco, las de traslación (bidimensionales o planas) y las cilíndricas (tridimensionales o espaciales). La figura 4.13 muestra ejemplos de cada uno de esos tipos, así como de otras levas tridimensionales: las cónicas y las globoides.

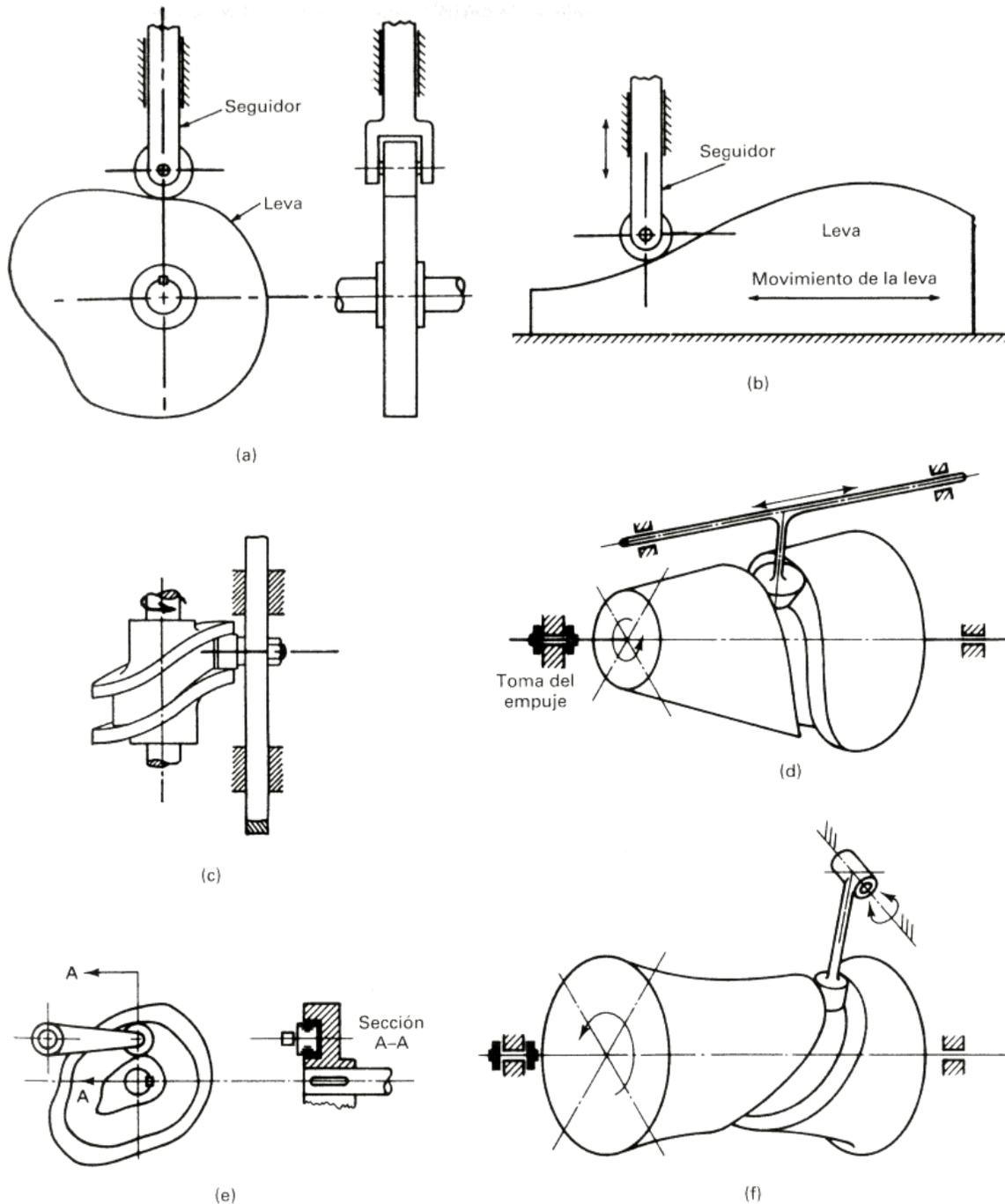


Fig. 4.13 Tipos de levas: (a) leva de placa o disco con seguidor de rodillo en traslación; (b) leva de traslación o cuña con seguidor de rodillo en traslación; (c) leva cilíndrica con seguidor de rodillo en traslación; (d) leva cónica con seguidor en traslación; (e) leva de cara con seguidor oscilante; (f) leva globoidal con seguidor

oscilante.

Los seguidores pueden clasificarse de varias maneras: según el movimiento, como de traslación u oscilación; según que el movimiento del seguidor traslacional (en línea recta) sea radial o excéntrico, respecto al centro del eje de la leva, y según sea la forma de la superficie de contacto del seguidor (por ejemplo, de cara plana, de rodillo, puntual, esférica, de curva plana o de superficie espacial curva). La figura 4.14 ilustra algunas de esas clasificaciones.

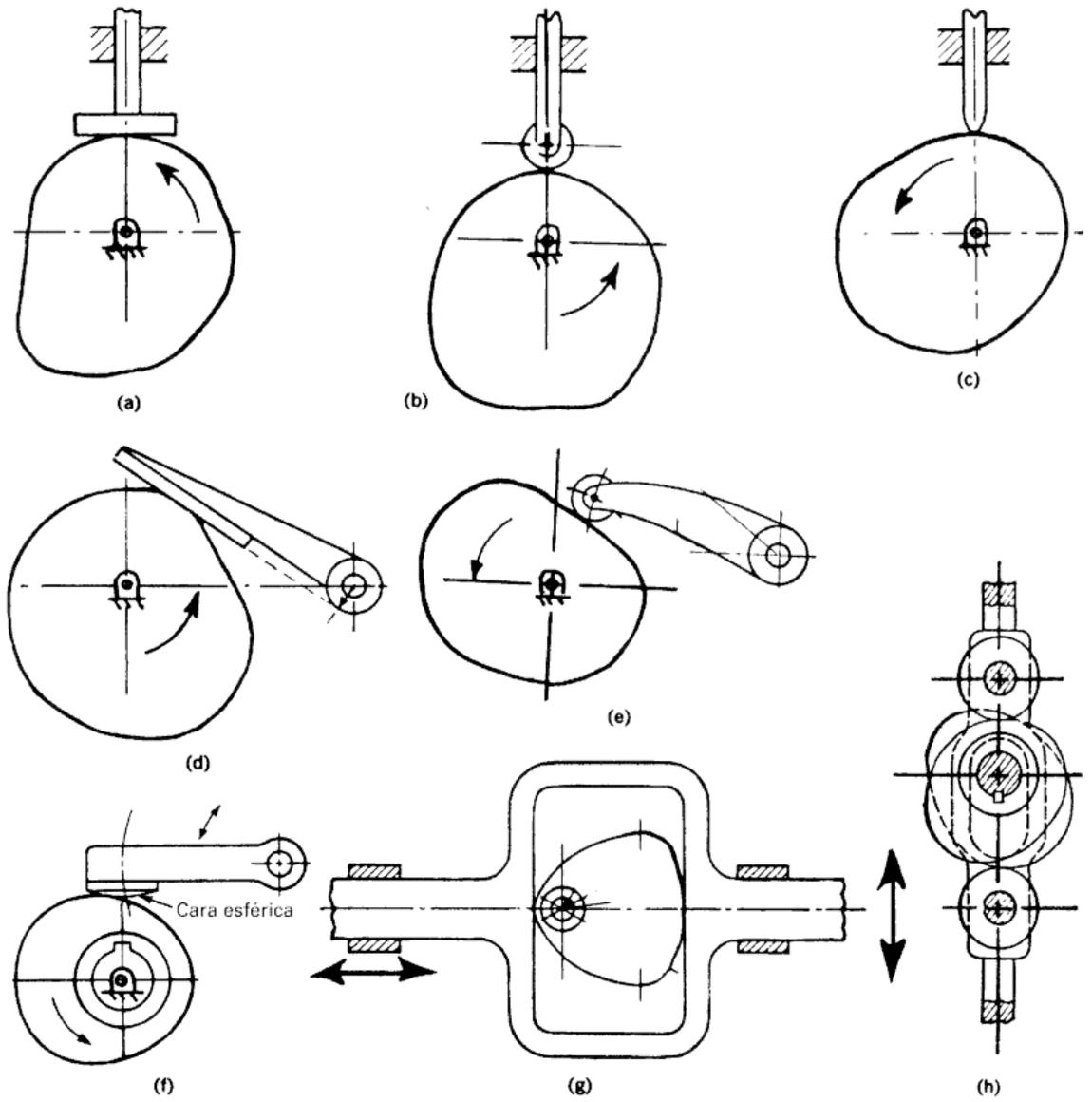


Fig. 4.14 Tipos de seguidores: (a) seguidor de cara plana en traslación; (b) seguidor de rodillo en traslación (radial); (c) seguidor de punto en traslación (radial); (d) seguidor de cara plana oscilante; (e) seguidor de rodillo oscilante; (f) seguidor de cara esférica oscilante; (g) seguidor de retorno positivo en traslación con leva

de diámetro constante; (h) seguidor de doble rodillo en traslación y leva de doble lóbulo.

Una aplicación típica de una leva requiere un desplazamiento del seguidor como el mostrado en la figura 4.15. En este ejemplo, una revolución completa de la leva (con la longitud desarrollada de la circunferencia del círculo primario) está representada sobre el eje de las abscisas y el desplazamiento del seguidor sobre el eje de las ordenadas. Se requiere que el punto trazador del seguidor se eleve del círculo primario una elevación  $L$ , para permanecer por un momento (o "alojarse") a la altura  $L$ , regresarse al círculo primario y permanecer en reposo en una segunda detención o alojamiento, antes de repetirse el ciclo.

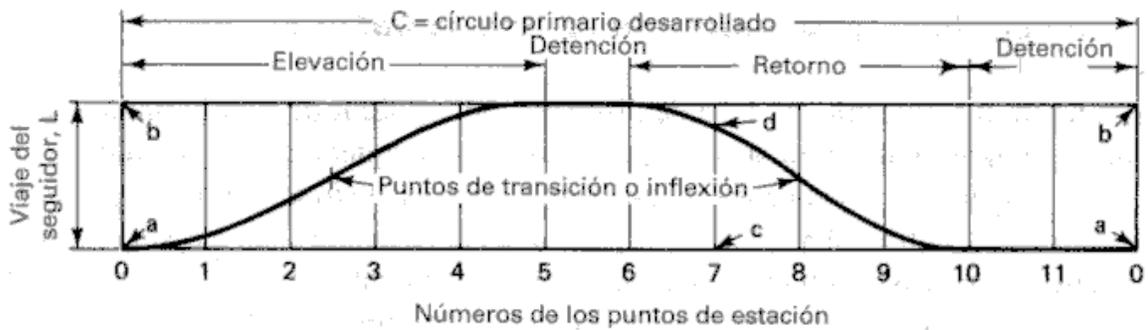


Fig. 4.15 Perfil de desplazamiento del seguidor. La distancia  $c-d$  es la elevación del seguidor en la posición 7. El viaje máximo  $L$  del seguidor representa movimiento del punto  $a$  sobre el círculo primario al punto  $b$  en las estaciones 5 y 6.

Para el diseño de una leva, el primer paso a dar es el de prescribir un perfil de desplazamiento de seguidor. El perfil de desplazamiento más simple es una línea recta entre el desplazamiento cero del seguidor y el final de la elevación. La desventaja de este perfil es la aceleración infinita al principio y final de la elevación. Las grandes fuerzas de inercia asociadas con esos puntos en el ciclo de la leva descalifican a este perfil para cualquier aplicación que requiera una velocidad moderada o alta de la leva. Las altas fuerzas de inercia pueden también inducir vibraciones, ruido, altos niveles de esfuerzos y desgaste.

Para corregir la deficiencia antes mencionada, se procura un perfil de aceleración constante, por lo que aunque no se tenga un valor infinito para la aceleración del seguidor, el perfil de la sobreaceleración tiene tres picos infinitos indeseables debido a los cambios escalonados en el nivel de la aceleración. Así, donde no puede tolerarse vibraciones, ruido y/o desgaste, este perfil de diseño no sería una selección apropiada.

Otra representación algebraica de una curva de aceleración, que por su nombre podría sugerir derivadas continuas, es el movimiento armónico simple. En este perfil se observa que aunque la forma de la aceleración es de naturaleza armónica, en  $\phi = 0$  y  $\phi = \theta$  hay cambios finitos en la aceleración que ocasionan dos picos teóricamente infinitos en el perfil de la sobreaceleración. A pesar de esta deficiencia, este perfil tiene cierta popularidad. Una razón para su uso en aplicaciones de baja velocidad es que es fácil de fabricar.

Finalmente, también se puede tener un perfil de desplazamiento cicloidal. En este perfil, la curva de sobreaceleración tiene magnitud finita en todo el ciclo. Aunque la aceleración máxima se ve más alta que en los perfiles anteriores, la sobreaceleración finita hace que el perfil cicloidal sea el mejor hasta ahora para aplicaciones de alta velocidad. La siguiente figura resume las características de los movimientos de velocidad constante, aceleración constante, armónico simple y cicloidal. Para las mismas condiciones de entrada están rotulados los valores máximos para la velocidad, aceleración y sobreaceleración. El perfil cicloidal tiene las mejores características de conjunto para las tres derivadas. Sin embargo, nótese que se tiene un importante incremento en la magnitud máxima de la aceleración sobre el perfil armónico.

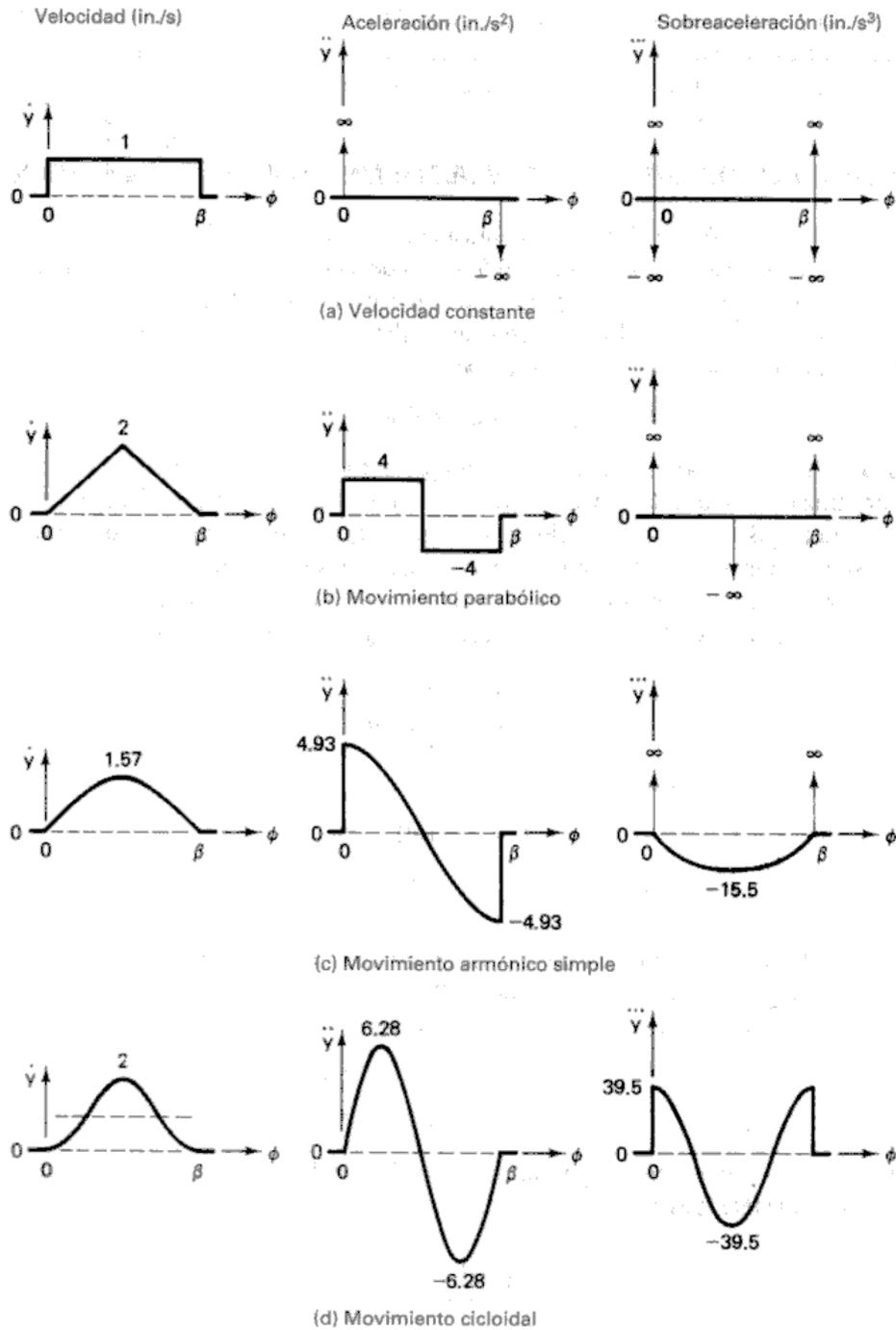


Fig. 4.16 Comparación de las características cinemáticas de cuatro movimientos básicos por velocidad angular  $\omega(\text{grados/s}) = \beta^\circ/\text{s}$  y elevación  $L = 1$  in. Para estos valores las dimensiones son:  $(\dot{y}) = \text{in./s}^2$ ,  $(\ddot{y}) = \text{in./s}^2$  y  $(\dddot{y}) = \text{in./s}^3$ . (a) Movimiento con velocidad constante; (b) movimiento parabólico; (c) movimiento armónico simple; (d) movimiento cicloidal.

Como la leva con perfil armónico simple es la más común, una de las más sencillas de fabricar, y se utiliza para bajas velocidades, a continuación se explicará como se lleva a cabo el trazado o construcción gráfica de este perfil.

Se traza un semicírculo de diámetro igual a la elevación  $L$  que se divide en el mismo número de incrementos angulares iguales que las divisiones lineales iguales de las abscisas. Las líneas horizontales por las marcas circunferenciales que intersectan las líneas verticales correspondientes, son puntos sobre la curva armónica.

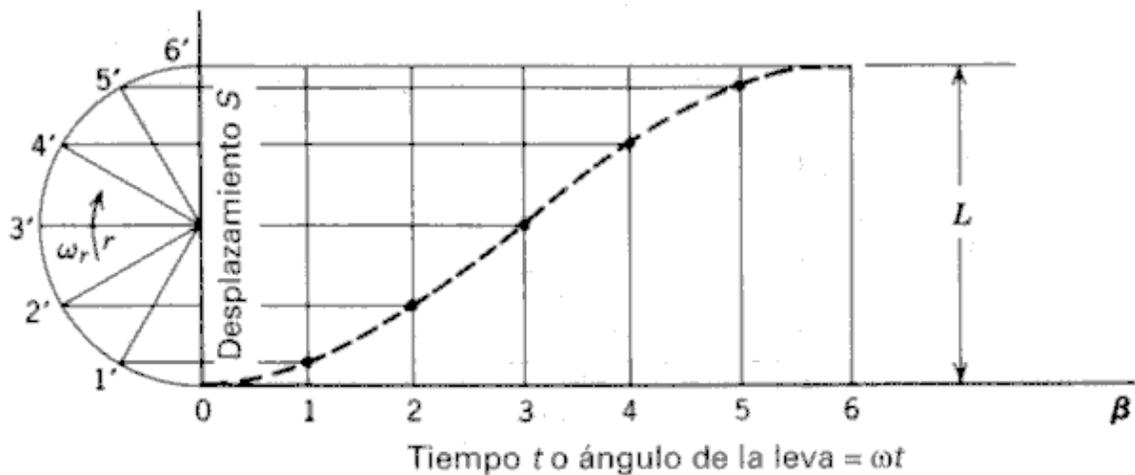


Fig. 4.17 Movimiento armónico simple.

## 5.4 REDES NERVIOSAS

### 5.4.1 CONCEPTO

Las REDES NERVIOSAS o VSPANS (del inglés Very Slow Propagation Artificial Neural System) son un sistema de control analógico y no lineal capaz de resolver en tiempo real problemas que serían un tanto difíciles de resolver con métodos digitales. Estos circuitos fueron patentados por Mark Tilden en el año de 1994, “Una forma de control de sistemas utilizando circuitos de retardo de pulso en lazo cerrado para manejar las extremidades de un robot con patas [...] El circuito de retardo de pulso actúa como una neurona artificial, la cual controla motores de acuerdo a una secuencia. Esta secuencia puede ser reconfigurable según las señales que pueda recibir de algún sensor al que se encuentre conectada.” (US PATENT & TRADEMARK OFFICE, 1994).

## 5.4.2 VENTAJAS AL EMPLEAR REDES NERVIOSAS

Las redes nerviosas dan a una máquina la capacidad de interactuar con el ambiente en una forma dinámica. La tecnología de las redes nerviosas surge de la idea de que en un ser vivo, un cerebro no es nada sin una espina dorsal. De hecho, una red nerviosa funciona como una espina dorsal de silicio. Observando a nuestros alrededores, podemos darnos cuenta de que en los distintos tipos de vida en el planeta casi un 80% de los seres vivos no tiene un cerebro.

Usando lógica TTL, una espina de silicio puede ser construida para obtener comportamientos que con otro tipo de lógica o programación pueden resultar muy complejos. Incluso se ha demostrado que un robot que usa estos sistemas y se retroalimenta en estos circuitos en lugar de retroalimentar a una computadora, pueden mimetizar muchas de las actividades que realiza un organismo vivo de bajo nivel.

Las redes nerviosas se han aplicado a mecanismos robóticos con extremidades y se ha demostrado que pueden interactuar con terrenos que serían inaccesibles para vehículos con ruedas u orugas.

Desde el inicio de la investigación en el invierno de 1994, el desarrollo de ésta tecnología ha avanzado para solucionar diversos problemas. Se espera que en los próximos años, las redes nerviosas puedan aplicarse en sistemas de visión que puedan controlar vehículos autónomos, y con esto, reducir los costos y complejidad de los actuales sistemas de control.

El control con redes nerviosas ha sido aplicado a robots autónomos debido al alto grado de dificultad que representa el poder interactuar con el medio ambiente si se tiene un sistema de control convencional. [12]

Existen numerosas aplicaciones en las que se pueden emplear las redes nerviosas, tales como el control de robots para la localización y limpieza de minas explosivas, para seguridad, mantenimiento, así como para aplicaciones médicas y protésicas (como puede ser una silla de ruedas caminante) además de carros con un tablero que posea instinto de supervivencia que trate de rescatarse a sí mismo y a sus pasajeros de las posibles lesiones por un accidente.

### 5.4.3 CIRCUITOS BÁSICOS

Las redes nerviosas se componen de dos circuitos básicos: *la neurona Nv* y *la neurona Nu*. [13, 14, 15]

La **neurona Nv** es un circuito diferenciador. En su forma simple, una neurona Nv esta formada por un capacitor, un resistor y un inversor (normalmente un inversor de Schmitt).

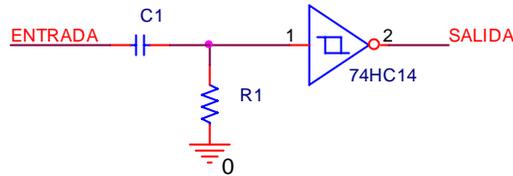


Fig 4.18 Neurona Nv

La **neurona Nu** es un circuito integrador. En su forma simple, una neurona Nu esta formada por un capacitor, un resistor y un inversor.

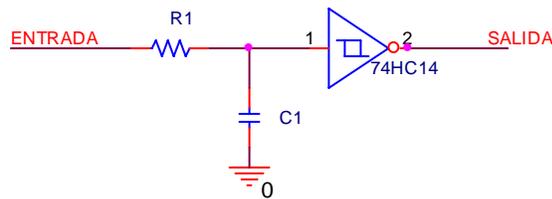


Fig. 4.19 Neurona Nu

La unión en lazo cerrado o abierto de dos o más de estos circuitos, forman una red nerviosa. De acuerdo a la cantidad de estos elementos la red recibe su nombre, escribiendo primero un prefijo que denota dicha cantidad seguida del sufijo “core”. De esta manera, si se tiene dos neuronas, a esta red se le denominará bicore, si tiene tres, tricore, etc. La excepción a esta regla se encuentra en la palabra monocore, que en realidad se aplica a una bicore que tiene una configuración especial.

### 5.4.4 FUNCIONAMIENTO

La neurona Nv mostrada en la figura 4.18 es un elemento diferenciador, y como tiene un capacitor acoplado en la entrada, la Nv responde a cambios de voltaje en la entrada más que al voltaje en sí.

Con un voltaje  $V_{cc}=5\text{ V}$ , el voltaje de estado estacionario en la salida del inversor es de  $5\text{ V}$ . Si se cambia el estado de la entrada de  $0$  a  $5\text{ V}$ , una transición con aumento de voltaje positivo es aplicada a la entrada del capacitor de la  $Nv$ . Con esto, el voltaje en el otro lado del capacitor, el voltaje a través del resistor y a la entrada del inversor, cambiarán instantáneamente a  $5\text{ V}$ . Con la entrada del inversor a  $5\text{ V}$ , la salida del inversor cae a  $0\text{ V}$  en tan solo unos nanosegundos. Si la entrada de capacitor permanece en alto, el voltaje en la entrada del inversor comenzará inmediatamente a caer en forma exponencial hasta  $0\text{ V}$ , esto mientras el capacitor se carga. Durante este tiempo el voltaje a través del capacitor aumenta mientras que el voltaje a través del resistor decae. En algún momento durante el transcurso de este período, el voltaje a la entrada del inversor cruzará el voltaje de disparo, entonces la  $Nv$  se desactiva y la salida del inversor cambia nuevamente a  $5\text{ V}$ , generando así una transición de voltaje positiva. En la figura 4.20 se muestra una señal de entrada  $A$ , el voltaje en el capacitor  $B$ , y la salida del inversor  $C$ . En esta figura se puede ver el comportamiento de la  $Nv$  ante pulsos de distinto ancho.

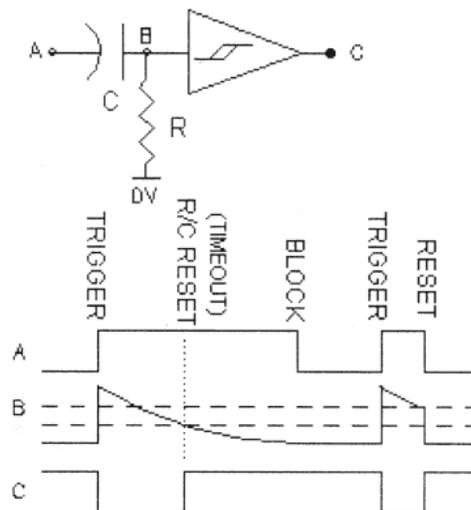


Fig. 4.20 Respuesta a pulsos de entrada de una  $Nv$

Cuando dos o más  $Nv$  son conectadas en una red, se puede crear un generador de patrones auto sostenido, tal como lo muestra la siguiente figura.

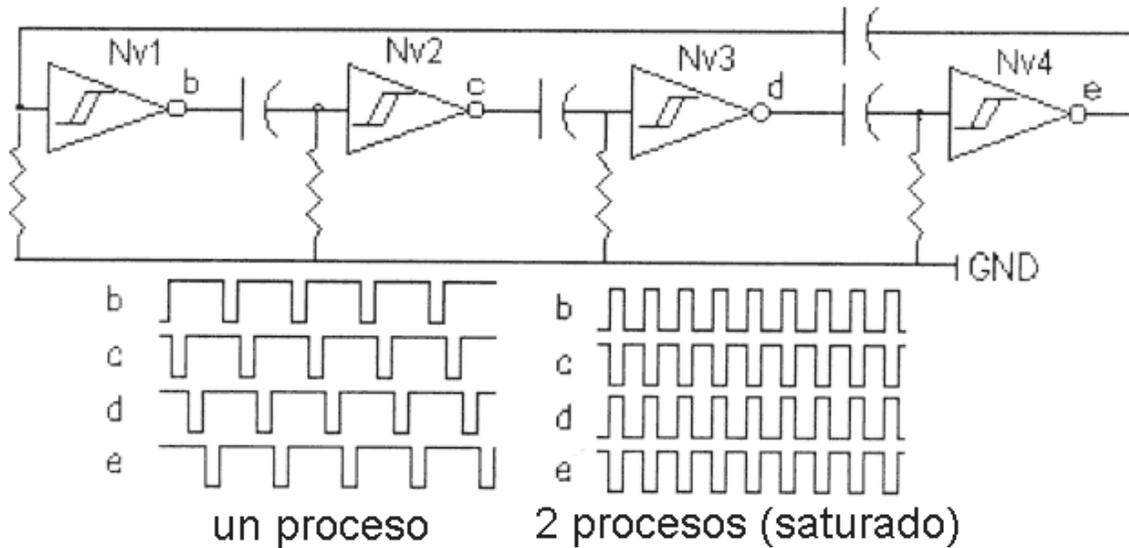


Fig. 4.21 red quadcore.

En la figura anterior se puede ver como un proceso viaja a través de toda la red, manteniéndola funcionando continuamente.

Un proceso es un pulso viajando a través de una red nerviosa el cual activa cada neurona que pasa. Cabe mencionar que la lógica que utilizan las redes nerviosas es lógica negativa, es decir, que un voltaje bajo es considerado un “1” lógico, mientras que un voltaje alto es usado como “0” lógico.

En una red nerviosa, solo se pueden tener  $n/2$  procesos activos para  $n$  neuronas que componen la red si  $n$  es un número par de éstas; y  $(n/2)-1$  procesos si  $n$  es impar.

## **6. PROCEDIMIENTO**

## **6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.**

En la actualidad, la mayoría de los vehículos se desplazan mediante ruedas y/u orugas, y pocas veces se ha considerado la posibilidad de crear un vehículo que se desplaza mediante patas, lo que haría la vehículo más adaptable que uno que se desplace mediante ruedas o uno que se desplace mediante orugas. En un mecanismo de patas, la fuerza de tracción para el movimiento de este no depende de la fuerza con que la gravedad le atraiga, como es el caso de un vehículo con ruedas. Por esto, en el presente trabajo se diseña un mecanismo que se desplaza con extremidades tratando de imitar uno de los patrones de marcha de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis*, tomando a este insecto como modelo debido a sus capacidades comprobadas de estabilidad estática y dinámica.

## **6.2 OBJETIVOS**

Con el presente trabajo, se quieren alcanzar los siguientes objetivos:

- Diseño preliminar del mecanismo en base a cadenas cinemáticas cerradas.
- Análisis de la viabilidad del uso de redes nerviosas para controlar los movimientos del mecanismo.
- Simulación del mecanismo diseñado.

## **6.3 HIPÓTESIS PROPUESTA**

Los mecanismos actualmente construidos se han realizado en base a cadenas cinemáticas abiertas empleando robótica, lo cual hace el diseño, construcción y control una tarea muy compleja. Se pretende plantear el diseño preliminar de un mecanismo que funcione con cadenas cinemáticas cerradas, tratando de imitar la marcha de la CUCARACHA *Blaberus Discoidalis* con la menor cantidad posible de grados de libertad.

## **6.4 DESARROLLO**

Para este trabajo, lo primero que se hizo fue la recopilación de fuentes de información que mostraran algunos de los mecanismos actualmente construidos o en proceso de desarrollo. Principalmente se observó que los diseños son netamente robóticos con cadenas cinemáticas abiertas, y que solo uno o dos de éstos emplean cadenas cinemáticas cerradas,

como es el mecanismo de pantógrafo. Al observar la movilidad y versatilidad que tiene un mecanismo de pantógrafo, se planteó a éste mecanismo como primera opción para el diseño del mecanismo de seis extremidades, esto, si no se encontraba algo mejor.

El mecanismo de pantógrafo tiene algunas características importantes, como son los 2 grados de libertad que posee, uno que permite hacer el levantamiento del mecanismo y otro que permite la extensión del mecanismo. Si se pensaba hacer un mecanismo de 6 extremidades, donde cada extremidad era un mecanismo de pantógrafo, entonces se requerirían 12 GDL para controlar a todo el mecanismo.

Aunque el mecanismo de pantógrafo tiene una forma similar a la de una extremidad de los insectos, posee muchos grados de libertad que hacen su control más complejo.

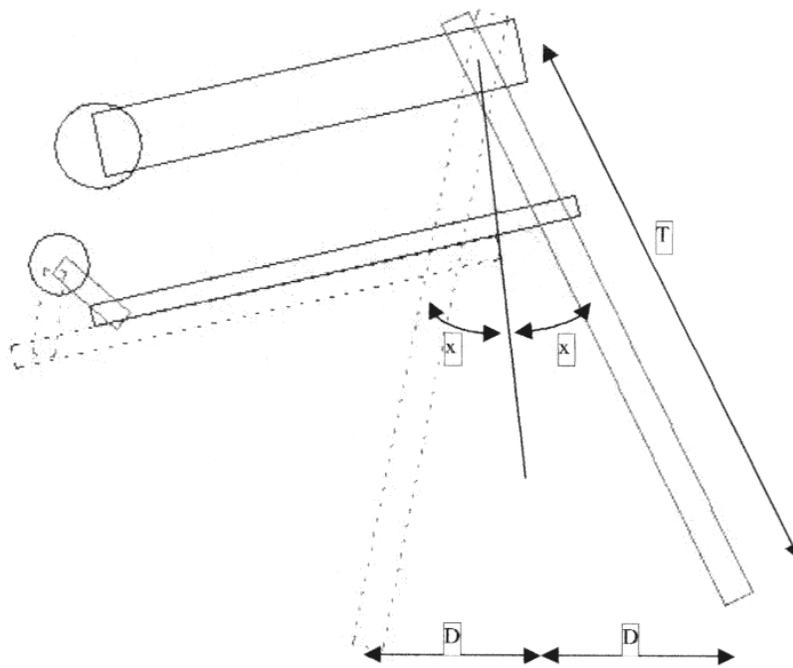


Fig. 5.1 Mecanismo de pantógrafo

Por las razones anteriores, se abandonó a este mecanismo como mecanismo base, y se buscaron otras mejores opciones.

Para mejorar la opción, se observó el espacio que recorre cada una de las extremidades de la cucaracha. Este espacio se muestra en la figura 5.2

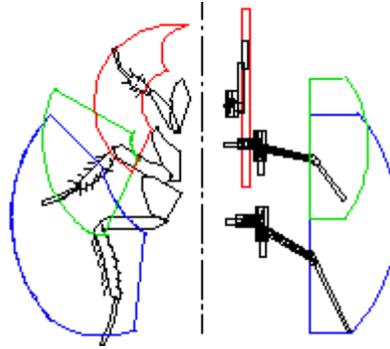


Fig. 5.2 Espacio que recorre cada extremidad en la marcha de la cucaracha.

Además, considerando las tablas presentadas en el capítulo 4, podemos observar los siguientes requisitos para las extremidades.

Durante la marcha, la pata trasera se mueve principalmente en el plano horizontal y así contribuye al empuje del cuerpo hacia delante. La pata media tiene un movimiento similar al de la pata trasera, por lo que también actúa en el plano horizontal contribuyendo al empuje del cuerpo. En cambio, la pata delantera se mueve principalmente en el plano sagital y no ejerce fuerzas laterales importantes durante su marcha.

Observando algunos trabajos donde se muestra la forma de caminar de una cucaracha, se observó que esta desplaza sus patas primero en línea recta y al momento de elevarlas, realiza una pequeña curva. Así, buscando más información se encontró el siguiente mecanismo:

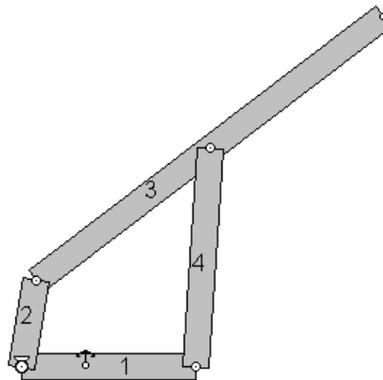


Fig. 5.3 Mecanismo de cuatro barras trazador de línea recta

Este mecanismo puede llevar a cabo la función de marcha en línea recta para medio ciclo de giro de la manivela y hacer un levantamiento de la pata en el otro medio ciclo. Esta característica era muy interesante, por lo que se cambió a este modelo como base para las extremidades. Además, este mecanismo tiene solo 1 GDL por lo que si se hacen 6 extremidades, se tendrán 6 GDL.

Este mecanismo presenta movimiento en un solo plano (XY) y para imitar la marcha, es necesario que eleve su trayectoria sobre el eje Z durante la trayectoria curva. Entonces, habrá que acoplarlo a otro mecanismo que lo mantenga dentro del plano XY durante la trayectoria recta y lo eleve el otro medio ciclo.

Por esto, si colocamos la figura anterior en el plano XY, entonces, habría que proyectar al mecanismo sobre el eje Z. Al realizar esta modificación, se debe tener en cuenta que las extremidades deben darle al mecanismo una postura caída, como la que presenta la cucaracha.

Al realizar esta modificación, algunos eslabones chocaban entre sí, por lo que se les tuvo que hacer algunas reducciones para evitar las interferencias entre ellos. Al final el mecanismo ya poseía la forma que daba la postura caída al cuerpo que unía todas las extremidades. A continuación se muestran los planos de los eslabones de éste mecanismo.

Para poder hacer que la extremidad se levantara, se diseñó una leva de perfil armónico, debido a que se va a trabajar a bajas velocidades. A continuación se muestran los planos para la leva propuesta. Esta leva y el mecanismo se unen mediante unas bisagras para que puedan subir y bajar, con lo que se logra el efecto de protracción y retracción deseada.

El mecanismo completamente unido queda de la siguiente manera:

Para conocer el torque del motor que debe mover a cada una de las manivelas, se hizo un programa en MATLAB que calcula las posiciones, velocidades, aceleraciones y el torque requerido. Cabe mencionar que este programa es paramétrico, por lo que si se deseara hacer este mecanismo en un tamaño mayor, solo habría que cambiar los valores indicados y automáticamente se resuelven las ecuaciones.

Este mecanismo se trató de simular en Working Model 3D, pero por ser un paquete de diseño y análisis, tiene problemas con el contacto entre cuerpos, por lo que el choque de la leva con la bisagra causaba error al tratar de analizar, así que se optó por utilizar en Working Model 2D para analizar el mecanismo, simulando una vista superior del mecanismo.

Como vimos también en la sección 4 las distintas marchas que tiene el mecanismo, se debía escoger una a la que había que tratar de imitar. La marcha que se eligió era la del tripié que se hace entre las patas trasera y delantera de un lado, y la extremidad media contralateral. Observando detenidamente la marcha, podemos ver que la protracción se realiza en la mitad de tiempo que se hace la retracción, pero el mecanismo diseñado ocupa medio ciclo de giro de la manivela para la protracción y otro para la retracción. Si se tiene una velocidad constante no se pueden reproducir correctamente todos los tiempos del patrón de marcha, pero esta es la mejor aproximación que se puede lograr con el diseño propuesto debido a los criterios planteados en un inicio. De hecho, para que esta marcha pueda ser imitada, es necesario colocar las extremidades en una posición específica y dejar que todas las manivelas giren simultáneamente.

Como las manivelas giran al mismo tiempo y todas a la vez, entonces el empleo de redes nerviosas resulta innecesario, ya que las redes nerviosas funcionan con retardos de pulsos y el diseño propuesto no necesita ningún retardo.

# **7. RESULTADOS**

En primer término, se cumplieron los objetivos planteados. Se obtuvo el diseño preliminar de un mecanismo que genera un patrón de marcha similar al de una *Blaberus Discoidales*, pero es necesario colocar cada extremidad del mecanismo en una posición determinada antes de inicio para que pueda generar el patrón deseado.

Aún así, el patrón de marcha es solo similar y no idéntico debido a que en el insecto realiza la protracción y la retracción de su pata en períodos de tiempo distinto. En cambio, el mecanismo realiza las dos tareas anteriores en un mismo período.

Como las manivelas de todas las extremidades giran continuamente, no hay retraso de una con respecto a la otra, entonces el empleo de redes nerviosas resulta inoperable, ya que este mecanismo no requiere de retardos en tiempo entre las extremidades.

Se simuló el mecanismo en 2D y se logra observar que este funciona correctamente, realizando las protracciones y retracciones de las extremidades en forma sincronizada y de acuerdo a lo esperado.

## **8. CONCLUSIONES**

La imitación o diseño de un mecanismo basado en la naturaleza es algo muy complejo, ya que cada cuerpo posee características que difícilmente se pueden copiar con la tecnología con que actualmente se cuenta.

Se mostró que con mecanismos sencillos es posible hacer una aproximación mecánica de un ser vivo, pero no una igualación de éste.

Los diseños de mecanismos con cadenas cinemáticas abiertas son mecanismos que pueden ser controlados mediante redes nerviosas. El mecanismo propuesto contiene solo un GDL, lo que le limita mucho en su movimiento, por eso lo inoperante del empleo de redes nerviosas. Si el mecanismo contara con 2 GDL como el mecanismo de pantógrafo, tal vez sería aplicable el uso de las redes nerviosas ya que permitirían el retraso en el movimiento de los distintos eslabones.

Una investigación como esta requiere de mucho más tiempo para obtener más información y poder hacer pruebas que permitan ver los errores.

## **9. RECOMENDACIONES**

El mecanismo diseñado no es capaz de dar vuelta, sería un buen trabajo el tratar de investigar la forma en que la cucaracha da vuelta para tratar de aplicarla a este mecanismo o a otro similar.

Podría hacerse una modificación al mecanismo agregando GDL, con lo que la aplicación de redes nerviosas para ver su funcionamiento sería otro trabajo de relevancia.

Actualmente el mecanismo realiza las proyecciones y las retracciones con un mismo período; si se logran aplicar servomotores o algún tipo de control que permita que un motor gire a una velocidad durante medio ciclo y a otra distinta durante la parte restante del ciclo, tal vez este mecanismo pueda imitar a la perfección los distintos patrones de marcha que tiene la cucaracha.

Más información sobre redes nerviosas y videos donde se muestren lentamente los patrones de marcha de la cucaracha, son materiales que permitirían hacer un mejor análisis e imitación de la cucaracha.

# 10. REFERENCIAS

- [1]. The Journal of Experimental Biology, pp. 2441-2451(1995); Maximum single leg force production.
- [2]. The Journal of Experimental Biology, pp. 89-101(1993); Drag and lift on running insects.
- [3]. The Journal of Experimental Biology, pp. 1603-1623(1995); Many-legged maneuverability
- [4]. The Journal of Experimental Biology, pp. 3325-3332(1999); Templates and anchors.
- [5]. The Journal of Experimental Biology, pp. 251-269(1994); Dynamic and static stability in hexapedal runners.
- [6]. Publication to the EANN'95 Conference Proceedings "Special Track on Robotics", Mark W. Tilden.
- [7]. The Journal of Experimental Biology, pp. 1919-1929(1997); Three dimensional kinematics and limb kinetic energy of running cockroaches.
- [8]. *De motu animalium*, Borelli, A. 1680, Roma.
- [9]. Arch. Biol., Paris, 10, 567. Recherches sur la marche des insectes et des arachnides. Étude expérimentale d' anatomie et de physiologie comparées, Demoor J. 1890
- [10]. J. Exp. Biol. (In the press) and unpublished observations, Huges, G.M., 1950
- [11]. Diseño de Mecanismos, análisis y síntesis. Arthur G Erdman, George N. Sandor, 3ª edición, Prentice Hall, 1997.
- [12]. US PATENT & TRADEMARK OFFICE, # 5, 325, 031; Junio 28, 1994. Mark Tilden
- [13]. Nervous Neurons, <http://www.solarbotics.net/wilf/NewNvCircuits.htm>, 011201.
- [14]. Nv neurons and Nv nets, [http://www.bftgu.solarbotics.net/starting\\_nvnet.html](http://www.bftgu.solarbotics.net/starting_nvnet.html), 011201.
- [15]. Biomorphic Robotics and Nervous Net Research, <http://people.ne.mediaone.net/bushbo/beam/Biomorphic.html>, 040901.



```

rf3 = abs(r3-rg3); % m (distancia del cm al apoyo donde aplica F)
tf3 = g2r(0);%por estar sobre la barra

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%SOLUCION CINEMÁTICA DEL MECANISMO %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%% COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES SOLUCIÓN %%%%%
A=2*r4*(r1*cos(t1)-r2*cos(t2));
B=2*r4*(r1*sin(t1)-r2*sin(t2));
C=r1^2+r2^2-r3c^2+r4^2-2*r1*r2*cos(t1-t2);
D=2*r3c*(r2*cos(t2)-r1*cos(t1));
E=2*r3c*(r2*sin(t2)-r1*sin(t1));
F=r1^2+r2^2+r3c^2-r4^2-2*r1*r2*cos(t2-t1);

t3=2*atan((-E+sqrt(E.^2-F.^2+D.^2))./(F-D));%en radianes
t4=2*atan((-B-sqrt(B.^2-C.^2+A.^2))./(C-A));%en radianes

t=[t2;t3;t4];
fprintf(1,'Theta 2 = %.4f°,   Theta 3 = %.4f°,   Theta 4 =
%.4f°\n',r2g(t));

clear A B C D E F t;

%%%%%%%%% SOLUCIÓN PARA VELOCIDADES ANGULARES %%%%%%%%%
w2=rev2rad(rpms); %cambia rpm->rad/s
w2=w2*ones(1,length(t2)); % en matrices
w3=(w2.*r2.*sin(t4-t2))./(r3c.*sin(t3-t4)); %en rad/s
w4=(w2.*r2.*sin(t2-t3))./(r4.*sin(t4-t3)); %en rad/s
w=[w2;w3;w4];
fprintf(1,'Omega 2 = %.4f rad/s,   Omega 3 = %.4f rad/s,   Omega 4 =
%.4f rad/s\n',w);

clear w;

%%%%%%%%% SOLUCIÓN PARA ACELERACIONES ANGULARES %%%%%%%%%
a2=0*ones(1,length(t2)); %rad/s^2, aceleración inicial
a3=(w4.^2.*r4-w2.^2.*r2.*cos(t2-t4)-a2.*r2.*sin(t2-t4)-
w3.^2.*r3c*cos(t3-t4))./(r3c.*sin(t3-t4));%rad/s^2
a4=(w3.^2.*r3c+w2.^2.*r2.*cos(t2-t3)+a2.*r2.*sin(t2-t3)-
w4.^2.*r4.*cos(t4-t3))./(r4.*sin(t4-t3));%rad/s^2
a=[a2;a3;a4];
fprintf(1,'Alfa 2 = %.4f rad/s^2,   Alfa 3 = %.4f rad/s^2,   Alfa 4 =
%.4f rad/s^2\n',a);

clear a;

%%%%%%%%% POSICIÓN DEL PUNTO DE APOYO DE LA PATA %%%%%%%%%
px=r1*cos(t1)+r4*cos(t4)+r3c*cos(t3);%m
py=r1*sin(t1)+r4*sin(t4)+r3c*sin(t3);%m

%%%%%%%%% VELOCIDAD LINEAL DEL PUNTO DE APOYO %%%%%%%%%
vx=-w4.*r4.*sin(t4)-w3.*r3c.*sin(t3); %m/s
vy=w4.*r4.*cos(t4)+w3.*r3c.*cos(t3); %m/s
v=sqrt((vx).^2+(vy).^2); %m/s

```

```

%%%%%%%% ACCELERACIÓN LINEAL DEL PUNTO DE APOYO %%%%%%%%%
ax=-a4.*r4.*sin(t4)-w4.^2.*r4.*cos(t4)-a3.*r3c.*sin(t3)-
w3.^2.*r3c.*cos(t3); %m/s^2
ay=a4.*r4.*cos(t4)-w4.^2.*r4.*sin(t4)+a3.*r3c.*cos(t3)-
w3.^2.*r3c.*sin(t3); %m/s^2
a=sqrt((ax).^2+(ay).^2); %m/s^2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CINETOESTÁTICA%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%% SOLUCIÓN PARA EL CENTRO DE GRAVEDAD DOS %%%%%%%%%

Anr1 = w2.*w2.*rg2; %|An| para eslabón 2
Ant1 = t2 + b2 + pi; %|thetaAn| para eslabón 2
Atr2 = abs(a2).*rg2;%|At| para eslabón 2
Att2 = t2 + b2 + sign(a2).*pi/2;%|thetaAt| para eslabón 2
At=[Ant1' Att2']; %unión de ambos ángulos
Ar=[Anr1' Atr2']; %unión de ambas magnitudes
[x y]=pol2cart(At, Ar);%obtención de vector resultante de suma de At, y
An
x = sum(x,2);
y = sum(y,2);
[A22 A21] = cart2pol(x, y);%se obtiene R<theta, de A2 y theta2
A=[A21' r2g(A22')];
fprintf(1,'Acel CG 2, %.4f m/s^2< %.4f°\n',A);

clear A;

%%%%%%%% SOLUCIÓN PARA EL CENTRO DE GRAVEDAD TRES %%%%%%%%%
clear At Ar
Anr1 = w2.*w2.*r2;
Ant1 = t2 + pi;
Atr2 = abs(a2).*r2;
Att2 = t2 + sign(a2).*pi/2;

Anr3 = w3.*w3.*rg3;
Ant3 = t3 + b3 + pi;
Atr4 = abs(a3).*rg3;
Att4 = t3 + b3 + sign(a3).*pi/2;
At=[Ant1' Att2' Ant3' Att4']; %unión de ambos ángulos
Ar=[Anr1' Atr2' Anr3' Atr4']; %unión de ambas magnitudes
[x y]=pol2cart(At, Ar);
x = sum(x,2);
y = sum(y,2);
[A32 A31] = cart2pol(x, y);
A=[A31' r2g(A32')];
fprintf(1,'Acel CG 3, %.4f m/s^2< %.4f°\n',A);

clear A;

%%%%%%%% SOLUCIÓN PARA EL CENTRO DE GRAVEDAD CUATRO %%%%%%%%%
clear At Ar
Anr1 = w4.*w4.*rg4;
Ant1 = t4 + b4 + pi;

```

```

Atr2 = abs(a4).*rg4;
Att2 = t4 + b4 + sign(a4).*pi/2;
At=[Ant1' Att2']; %unión de ambos ángulos
Ar=[Anr1' Atr2']; %unión de ambas magnitudes
[x y]=pol2cart(At, Ar);
x = sum(x,2);
y = sum(y,2);
[A42 A41] = cart2pol(x, y);
A=[A41'; r2g(A42')];
fprintf(1,'Acel CG 4, %.4f m/s²< %.4f°\n',A);

clear A;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% ANALISIS DE FUERZAS DINAMICAS EN EL MECANISMO%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% CÁLCULO DE BRAZOS DE PALANCA DESDE SUS CM%%%%%%%%

%% PARA ESLABÓN 2 %%%

[r12x, r12y, r32x, r32y]=dina(rg2,r2,b2,t2);

%% PARA ESLABÓN 3 %%%

[r23x, r23y, r43x, r43y]=dina(rg3,r3,b3,t3);

%% PARA ESLABÓN 4 %%%

[r14x, r14y, r34x, r34y]=dina(rg4,r4,b4,t4);

%% PARA CÁLCULO DE LA COMPONENTE DE FUERZA DE EMPUJE EN PUNTO DE APOYO

rf3x = rf3*cos(t3+tf3);
rf3y = rf3*sin(t3+tf3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% MATRIZ DE FUERZAS DESCONOCIDAS %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for t=1:length(t2);

% f12x f12y f32x f32y f43x f43y f14x f14y t12
a=[ 1 0 1 0 0 0 0 0 0;
0 1 0 1 0 0 0 0 0;
-r12y(t) r12x(t) -r32y(t) r32x(t) 0 0 0 0 1;
0 0 -1 0 1 0 0 0 0;
0 0 0 -1 0 1 0 0 0;
0 0 r23y(t) -r23x(t) -r43y(t) r43x(t) 0 0 0;
0 0 0 0 -1 0 1 0 0;
0 0 0 0 0 -1 0 1 0;
0 0 0 0 r34y(t) -r34x(t) -r14y(t) r14x(t) 0];

c = [m2.*A21(t).*cos(A22(t));
m2.*A21(t).*sin(A22(t));
i2.*a2(t);
m3.*A31(t).*cos(A32(t))-f3;
m3.*A31(t).*sin(A32(t));
i3.*a3(t)+rf3y(t).*f3;
m4.*A41(t).*cos(A42(t));
m4.*A41(t).*sin(A42(t));
i4.*a4(t)];

```

