



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA**

**“ DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN
INSECTO ROBOT ”**

**T E S I S M U L T I D I S C I P L I N A R I A
Q U E P A R A O B T E N E R E L T Í T U L O**

P R E S E N T A N :

**A N G É L I C A L . T O R R E S Z Ú Ñ I G A ,
L I C E N C I A D O E N S I S T E M A S C O M P U T A C I O N A L E S**

**A D R I Á N R O M E R O V A R G A S ,
I N G E N I E R O E N E L E C T R Ó N I C A Y T E L E C O M U N I C A C I O N E S**

**G E R A R D O D . O L V E R A V I L L A ,
I N G E N I E R O E N E L E C T R Ó N I C A Y T E L E C O M U N I C A C I O N E S**

ASESOR: DR. LUIS ENRIQUE RAMOS VELASCO

PACHUCA DE SOTO, HIDALGO. FEBRERO DEL 2006

Resumen

El trabajo presentado aquí es el desarrollo del diseño, construcción y control de un robot hexápodo basado en algunos trabajos que analizan la locomoción de insectos reales. Este insecto robot, se diseñó tomando en cuenta la flexibilidad de trabajo de distintos materiales de construcción, hardware y software de control que pueda mejorarse en el futuro. El insecto robot se podrá usar con fines didácticos para experimentar con algoritmos de computación inteligente y técnicas de control avanzadas.

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Objetivo de la Tesis	2
1.4. Justificación	2
1.5. Cuerpo de la Tesis	2
2. Antecedentes Históricos	5
2.1. El Control del Caminar	5
2.2. Maquinas que Caminan	23
2.3. Comentarios y Referencias	38
3. Herramientas Básicas de Teoría de Control	39
3.1. Introducción	39
3.2. Sistemas de Control en Tiempo Continuo	40
3.2.1. Controlador Proporcional	40
3.2.2. Controlador Integral	41
3.2.3. Controlador Proporcional-Integral	42
3.2.4. Controlador Proporcional-Derivativo	43
3.2.5. Controlador Proporcional-Integral-Derivarivo	44
3.3. Sistemas de Control en Tiempo Discreto	44
3.3.1. Sistemas Discretos	45
3.3.2. Controlador PID Digital	48
3.4. Reglas de Sintonización para Controladores PID	52
3.4.1. Reglas de Ziegler-Nichols para Sintonizar Controladores PID	52
3.5. Ejemplo: Diseño de un Controlador Clásico para la Posición de un Motor de C.D.	56
3.6. Comentarios	63
4. Entomología	65
4.1. Introducción	65
4.2. Tagmata	66
4.2.1. Abdomen	66
4.2.2. Cabeza	67

4.2.3.	Tórax	67
4.3.	Las Patas	68
4.3.1.	Estructura Básica de las Patas	68
4.3.2.	Músculos de las Patas	71
4.3.3.	Sistema Sensorial de las Patas	71
4.3.4.	Postura	71
4.3.5.	Locomoción	75
4.4.	Sistema Nervioso	79
4.4.1.	Componentes Básicos del Sistema Nervioso	79
4.4.2.	Anatomía del Sistema Nervioso	79
5.	Diseño y Construcción	83
5.1.	Introducción	83
5.2.	Materiales de construcción	84
5.3.	Piezas del Robot	84
5.4.	Rangos de Movimiento	89
6.	Controladores	97
6.1.	Introducción	97
6.1.1.	Actuadores	97
6.1.2.	Servomotores	99
6.2.	Sistema Electrónico de Control	101
6.2.1.	Diagrama a Bloques del Sistema de Control	102
6.3.	Diseño de las Unidades Electrónicas de Control	103
6.3.1.	Ganglios Electrónicos	103
6.3.2.	Interfaz Serial	110
6.3.3.	Sistema Sensorial	111
7.	Software de Control	115
7.1.	Introducción	115
7.1.1.	Software	115
7.1.2.	Programación	116
7.1.3.	Lenguaje de Programación	116
7.2.	Software de control del Insecto Robot	116
7.2.1.	Visual Basic	117
7.2.2.	Software de Control	117
7.2.3.	Programación del Software de Control	118
7.3.	Algoritmo de la Secuencia para Caminar	120
7.4.	Conclusiones y Comentarios	121
8.	Conclusiones y Trabajo Futuro	123
8.1.	Conclusiones	123
8.2.	Trabajo Futuro	124

A. Piezas Mecánicas	125
B. Códigos de los Programas de los Microcontroladores	133
B.1. Programa de los Microcontroladores 1, 2 y 3	133
B.2. Programa del Microcontrolador 4	141
C. Código del Software de Control	143
Bibliografía	155

Índice de Figuras

2.1. Primeros estudios de los movimientos al caminar y correr de un caballo hechos por el fotógrafo del siglo XIX, Eadweard Muybridge.	6
2.2. Arreglo experimental realizado en un laboratorio de la Universidad de Alberta para analizar el control nervioso de un gato cuando camina.	7
2.3. La médula espinal y la parte baja del cerebro se aíslan de los hemisferios en el gato.	8
2.4. Actividad eléctrica en la pata de una cucaracha caminando libremente.	9
2.5. Las señales recíprocas de actividad eléctrica son grabadas en los músculos flexores y en los músculos extensores durante la fase de oscilación (parte blanca) y la fase de la postura (parte negra).	11
2.6. Patrones de pasos del gato y la cucaracha. De izquierda a derecha cada barra horizontal representa el tiempo en que una pata esta despegada del piso (partes blancas de la barra) y el tiempo en que una pata esta en el piso(partes negras de la barra).	12
2.7. La duración de la fase de oscilación de un paso (cuando la pata esta despegada del piso) se mantiene constante en comparación a la duración de la fase de postura (cuando la pata esta en el piso) en la mayoría de los animales.	13
2.8. Comprobación de la existencia de un generador de ritmo central.	14
2.9. Organización de el generador central de ritmo en cada pata de la cucaracha.	16
2.10. Modelo del Centro-Medio para explicar la generación central de una actividad reciproca ritmica en las neuronas motrices de las patas traseras del gato.	18
2.11. Caminos de reflejos en las patas de la cucaracha.	19
2.12. En las seis patas de una cucaracha los pasos son coordinados por caminos nerviosos que interconectan a los generadores de señales rítmicas.	22
2.13. Paso del Trípode Alterno.	24
2.14. Los pasos de los insectos ofrecen las bases para diseñar un sistema capaz de desplazarse por medio de seis patas.	26
2.15. Secuencia de pasos del caballo. A: caminar; B: trote; C: galope.	28
2.16. Maquina caminadora de seis patas.	29
2.17. Maquina de locomoción por saltos en un solo plano dotada de una pata.	30
2.18. Maquina de locomoción por saltos en movimiento.	31
2.19. Maquina avanzada de locomoción por saltos.	32
2.20. Simulación de la maquina avanzada de locomoción por saltos.	34
2.21. Simulación de la maquina avanzada de locomoción por saltos.	34

2.22.	Simulación de la maquina avanzada de locomoción por saltos.	35
2.23.	Caballo mecánico.	37
3.1.	Diagrama de bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición).	41
3.2.	Diagrama de bloques de un controlador proporcional.	41
3.3.	Diagrama de bloques de un controlador integral.	42
3.4.	(a)Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada escalón unitario y la salida del controlador.	43
3.5.	(a)Diagrama de bloques de un controlador proporcional-derivativo; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.	44
3.6.	(a)Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral-derivativo; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.	45
3.7.	a) Señal analógica en tiempo continuo; b) Señal cuantificada en tiempo continuo; c) Señal de datos muestreados; d) Señal digital.	46
3.8.	Diagrama de bloques de un sistema de control digital.	46
3.9.	Diagrama de bloques de un sistema de control digital que muestra las señales en forma binaria o gráfica.	47
3.10.	Diagrama que muestra la función $f(hT)$	49
3.11.	Diagrama de bloques de la realización del esquema de control PID en la forma de velocidad.	51
3.12.	Control PID de una planta.	52
3.13.	Curva de respuesta a un escalón unitario que muestra un sobrepaso máximo de 25 %	53
3.14.	Respuesta de escalón unitario de una planta.	54
3.15.	Curva de respuesta con forma de S.	55
3.16.	Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.	56
3.17.	Oscilación sostenida con un periodo P_{cr}	57
3.18.	Circuito eléctrico de la armadura y diagrama de cuerpo libre del rotor.	57
3.19.	Respuesta del modelo a una función escalón unitario.	59
3.20.	Diagrama a bloques que muestra el arreglo de un controlador y una planta.	60
3.21.	Respuesta del sistema con un controlador proporcional con ganancia $\mathbf{K_P} = 1.7$ a una función escalón unitario.	61
3.22.	Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral con ganancias $\mathbf{K_P} = 1.7$ y $\mathbf{K_I} = 20$ a una función escalón unitario.	62
3.23.	Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral con ganancias $\mathbf{K_P} = 17$ y $\mathbf{K_I} = 200$ a una función escalón unitario.	62
3.24.	Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral-derivativo con ganancias $\mathbf{K_P} = 17$, $\mathbf{K_I} = 200$ y $\mathbf{K_D} = 0.15$ a una función escalón unitario.	63
3.25.	Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral-derivativo con ganancias $\mathbf{K_P} = 17$, $\mathbf{K_I} = 600$ y $\mathbf{K_D} = 0.15$ a una función escalón unitario.	64
4.1.	Estructura general de un insecto.	66
4.2.	Cavidad pre-oral y musculatura de la cabeza de un insecto.	68

4.3.	Patas y articulaciones. (a)Pata de insecto típica. (b)Articulación dicondíllica del trochanter con la coxa. (c), (d)Articulación dicondíllica de tibia y fémur, (c)vista lateral, (d)vista final. (e)Articulación monocondíllica del tarsus con tibia.	69
4.4.	Coxa, vista lateral oblicua. (a)Insecto típico. (b)Coxa con meron largo.	70
4.5.	Músculos de las patas. (a)Músculos extrínsecos de coxa. (b)Músculos intrínsecos.	72
4.6.	Sistema sensorial de la pata.	73
4.7.	Función de los sensores campaniformes en la postura de un insecto.	74
4.8.	Funcionamiento mecánico de una pata.	77
4.9.	Estabilidad en tres patas.	78
4.10.	Anatomía del sistema nervioso.	80
5.1.	Vista frontal del diseño en AutoCAD del prototipo.	83
5.2.	Vista en perspectiva del prototipo en AutoCAD.	86
5.3.	Soporte principal.	87
5.4.	Pata del insecto robot.	87
5.5.	Primer eslabón. Primer motor que actúa en eslabón y segundo motor que es soportado por el primer eslabón.	88
5.6.	Segundo eslabón. Segundo y tercer motor que actúan en él.	88
5.7.	Tercer Eslabón. Tercer motor que es soportado por este.	89
5.8.	Vista lateral. Rango de movimiento del efector final.	90
5.9.	Vista tridimensional. Rango de movimiento del efector final en el primer plano.	90
5.10.	Vista tridimensional. Rango de movimiento del efector final en el primer plano.	91
5.11.	Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata central en el segundo plano.	92
5.12.	Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata central en el segundo plano.	93
5.13.	Vista tridimensional. Rango de movimiento de la pata central en el segundo plano.	93
5.14.	Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.	94
5.15.	Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.	94
5.16.	Vista tridimensional. Rango de movimiento de la pata en el segundo plano.	95
5.17.	Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.	95
5.18.	Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.	96
5.19.	Vista tridimensional. Rango de movimiento de la pata central en el segundo plano.	96
6.1.	Diagrama a bloques de un servomotor.	99
6.2.	Servomotor estándar.	100
6.3.	Señal de set point de los servomotores.	101
6.4.	Diagrama a bloques de los sistemas electrónicos del insecto robot.	104
6.5.	Circuito electrónico de un ganglio.	105
6.6.	Diagrama de flujo del algoritmo de recepción de los ganglios.	107
6.7.	Diagrama de flujo del algoritmo de selección de motor.	108
6.8.	Diagrama de flujo del algoritmo de para generar un canal de PWM.	109
6.9.	Multiplexaje de los primeros tres canales de PWM.	110

6.10.	Códigos seriales. a)Código NRZ del puerto serial de una PC. b) Código del puerto serial de un microcontrolador Microchop.	111
6.11.	Circuito electrónico de la interfaz serial.	112
6.12.	Circuito electrónico del sistema sensorial.	113
A.1.	Vista tridimensional. Pata insecto robot.	125
A.2.	a)Vista lateral. Distancias entre ejes rotatorios	126
A.3.	b)Vista superior. Distancias entre ejes rotatorios.	126
A.4.	1a)Vista superior. Pieza de soporte.	127
A.5.	1b)Vista tridimensional. Pieza de soporte.	127
A.6.	2a)Vista superior. Pieza soporte central.	128
A.7.	2b)Vista tridimensional. Pieza soporte central	128
A.8.	3a)Vista superior. Eslabón uno.	129
A.9.	3b)Vista lateral. Eslabón uno.	129
A.10.	3c)Vista tridimensional. Eslabón uno.	130
A.11.	4a)Vista superior. Eslabón dos.	130
A.12.	4b)Vista tridimensional. Eslabón dos.	131
A.13.	5a)Vista superior. Eslabón tres.	131
A.14.	5b)Vista lateral. Eslabón tres.	132
A.15.	5c)Vista tridimensional. Eslabón tres.	132
C.1.	Formulario del programa principal.	144

Índice de Tablas

3.1. Valores de K_p , T_i y T_d que sugirieron Ziegler y Nichols.	54
3.2. Valores de K_p , T_i y T_d que sugirieron Ziegler y Nichols.	56
3.3. Valores de K_p , T_i y T_d que sugirieron Ziegler y Nichols.	58
5.1. Relación de densidad, flexibilidad y facilidad, precio de trabajo de materiales de construcción de robots.	85
6.1. Ventajas y desventajas de los actuadores propuestos.	99
6.2. Posición de la flecha del servomotor para diferentes señales de S.P.	102

Resumen

El trabajo presentado aquí es el desarrollo del diseño, construcción y control de un robot hexápodo basado en algunos trabajos que analizan la locomoción de insectos reales. Este insecto robot, se diseñó tomando en cuenta la flexibilidad de trabajo de distintos materiales de construcción, hardware y software de control que pueda mejorarse en el futuro. El insecto robot se podrá usar con fines didácticos para experimentar con algoritmos de computación inteligente y técnicas de control avanzadas.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

En la actualidad existen diversos tipos de robots, de estos, los mas comunes son los robots tipo brazo, que son muy empleados en la industria y en laboratorios de experimentación, durante las ultimas décadas se ha visto el rápido desarrollo de la tecnología de microprocesadores, así como los precios cada vez mas accesibles de estos, con ello el desarrollo de la computación y la mejora siempre continua de software que ha llevado en la actualidad al desarrollo mas rápido de las diversas teorías de control y que en un pasado no eran posibles; así también, el desarrollo en la capacidad de implementación de control en diferentes sistemas dinámicos en los que no era fácil la ejecución de acciones de control, ya sea en tiempo real o en la dificultad de construcción de controladores. Muchos de los robots de investigación son posibles gracias a la implementación de las actuales teorías de control en software, procesadas por los microprocesadores y ejecutadas por las interfaces de estos para comandar distintos actuadores, de forma que, robots que imitan en gran similitud a los movimientos de seres vivos son posibles de realizar así como experimentar con diversas teorías de control actuales para su mejor funcionamiento. Los robots modernos de interés actual incluyen robots móviles de acción caminante, que vienen a resolver diversos problemas que tienen los robots móviles de acción rotacional, como el desplazamiento de estos en terrenos irregulares. La experimentación con robots caminantes puede servir como base para el desarrollo de robots que realicen multiples tareas y las ejecuten en una amplia zona de trabajo, así como la flexibilidad de distribuirlos en diferentes zonas de trabajo. Dentro del desarrollo de robots caminantes, los robots hexápodos tipo insecto, como los que se han desarrollado en diferentes partes del mundo, ayudan también a entender los diversos procesos del caminar.

1.2. Planteamiento del Problema

Los diversos experimentos de implementación de las teorías de control de actual interés, requieren gran flexibilidad de soporte en cuanto a agregar y/o modificación de hardware, software, construcción, así como un diseño práctico y de implementaciones futuras, pretende este prototipo cumplir con estas necesidades para cualquier trabajo futuro en este.

1.3. Objetivo de la Tesis

Esta tesis tiene como objetivo diseñar, construir y controlar un prototipo de robot móvil hexápodo el cual tenga características que permitan su uso con fines didácticos.

1.4. Justificación

Muchas de las aplicaciones de la teoría de control requieren la experimentación física, así como considerar elementos o variables que difícilmente se puedan apreciar en las simulaciones de propósito general, así este trabajo pretende ser una plataforma de desarrollo de la teoría de control para usos futuros.

1.5. Cuerpo de la Tesis

En el Capítulo 2 se conocen los antecedentes históricos sobre el estudio y análisis del caminar, además se presentan algunas maquinas caminantes desarrolladas anteriormente. En el Capítulo 3 se da un repaso a las herramientas de control clásicas que son básicas para el mejor entendimiento de los sistemas dinámicos y así de los robots usan control clásico.

El diseño de robots caminantes radica en el análisis de los diversos seres vivos caminantes, así un robot hexápodo es a un insecto que contiene seis patas si su distribución de extremidades es simétrica, es decir tres patas de un lado y tres en el otro, si el robot cumple con lo anterior lo llamamos insecto robot. En el Capítulo 4 se analiza la anatomía de los insectos haciendo énfasis en sus sistema de locomoción, esto será de ayuda en el diseño de las piezas mecánicas del insecto robot.

Para la construcción de un robot es necesario conocer las propiedades físicas y di-

mensionales de los actuadores, sensores, materiales de construcción y de materiales para hardware, así como la dificultad para trabajar con ellos. En el Capítulo 5 se desarrolla el proceso de diseño de las piezas y la elección de los materiales de construcción, así como los diferentes movimientos del insecto robot.

En el control del insecto robot, se determina que arquitectura de construcción de hardware es la mas adecuada para el control de los actuadores de las patas del insecto robot, el sistema sensorial de las patas, la comunicación con la computadora-microcontroladores. Así también el sistema de software y su flexibilidad para que sea este fácil de agregar funciones o modificarlas. En el Capítulo 6 se desarrolla la arquitectura en hardware de los controladores de los actuadores que tiene el insecto robot, así como la elección mas optima de controlador-actuador. Para el Capítulo 7 se dan los conceptos de programación y la elección de el lenguaje de programación para la interfaz del hardware del robot y la computadora.

Capítulo 2

Antecedentes Históricos

2.1. El Control del Caminar

El “análisis” científico del caminar empezó hace mas de 100 años como el resultado de una disputa prolongada de tiempos ancestrales, acerca de si las cuatro patas de un caballo galopando están despegadas del suelo al mismo tiempo. En un esfuerzo de resolver este asunto, el fotógrafo pionero Eadweard Muybridge en 1872 colocó una serie de cámaras disparadas eléctricamente y obtuvo una rápida secuencia de fotografías de un caballo galopando en una pista en California, como se muestra en la Figura 2.1. La reproducción de las fotografías mostraron que las cuatro patas del caballo se encuentran despegadas del suelo, dicha información apareció en muchas publicaciones, incluyendo el número de Scientific American (19-Oct-1878). La claridad de estas fotografías pronto le dieron a Muybridge la oportunidad de darse cuenta de que esta técnica fotográfica podría aplicarse para analizar en detalle el movimiento del caminar de muchos tipos de animales. Él subsecuentemente fotografió una multitud de animales corriendo y caminando, incluyendo gatos, perros, monos, camellos, elefantes, mapaches, cerdos, canguros y pájaros. Su remarcable colección de fotografías fue finalmente publicada en 1887 en un monumental volumen de 11 tomos titulado Animal Locomotion.

Una de las preguntas que surgió fue: ¿Como genera el sistema nervioso de un animal el movimiento rítmico de una pata al caminar, que fue tan ampliamente documentado por Muybridge? El esfuerzo de contestar esta pregunta comenzó tempranamente en el siglo pasado por 2 psicólogos Británicos, C.S. Sherrington y T. Graham Brown. Sherrington primero demostró que los movimientos rítmicos podrían ser sacados de las patas traseras de gatos y perros algunas semanas después de que su médula espinal hubiera sido seccionada. Puesto que la operación ha aislado del resto del sistema nervioso los centros nerviosos que controlan el movimiento de las patas traseras, él determino que las partes principales del sistema nervioso no son necesarias para la organización de los movimientos

que las patas realizan al caminar.

Otro descubrimiento notable de este período, aunque no fue reconocido generalmente como tal hasta hace poco, era la demostración de Graham en 1911 que los músculos rítmicos de las contracciones, similares a los que ocurren durante el caminar, podrían ser inducidos inmediatamente después de una disección en la médula espinal incluso en los animales en los cuales toda la entrada de los nervios sensoriales en las patas había sido eliminada. Este descubrimiento condujo a Graham Brown a proponer que los mecanismos situados enteramente dentro de la médula espinal son responsables de generar el ritmo básico para caminar en cada pata. Tiempo después Sherrington enfatizó la importancia de la entrada sensorial de receptores nerviosos periféricos para iniciar y coordinar tales movimientos; él explicó la generación de los movimientos rítmicos de la pata como una serie de 'reflejos de cadena' (un reflejo que es un movimiento estereotipado obtenido por la simulación de un grupo específico de receptores sensoriales). Así él concibió que la entrada sensorial generada durante cualquier parte del ciclo de caminar conduce a la parte siguiente del ciclo por una acción reflejada, produciendo alternadamente otra señal sensorial, que conduce a la parte siguiente del ciclo, etcétera.

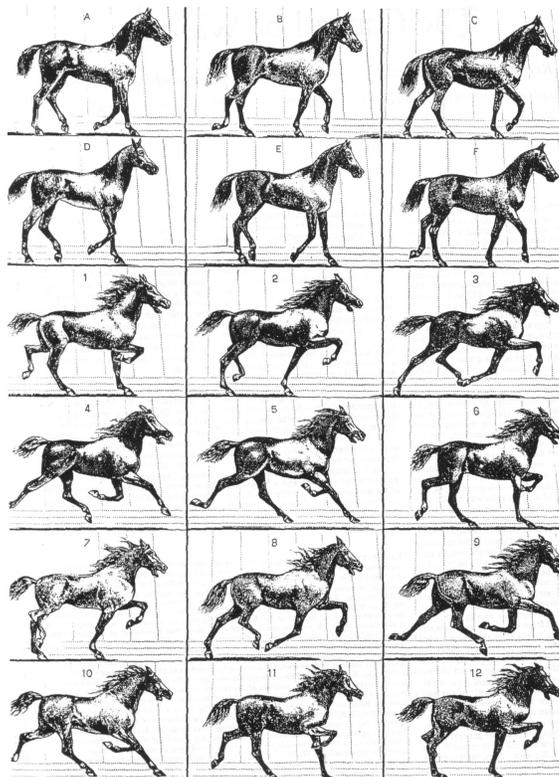


Figura 2.1: Primeros estudios de los movimientos al caminar y correr de un caballo hechos por el fotógrafo del siglo XIX, Eadweard Muybridge.

Los dos conceptos de un generador de ritmo espinal para cada pata y la activación de

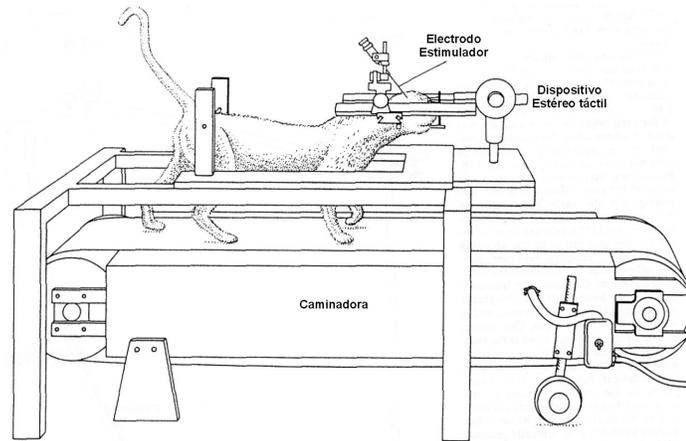


Figura 2.2: Arreglo experimental realizado en un laboratorio de la Universidad de Alberta para analizar el control nervioso de un gato cuando camina.

los movimientos de la pata por las señales del sensor no son incompatibles. De hecho, Graham Brown consideraba que los reflejos reforzaban el ritmo centralmente generado, un punto de vista que Sherrington iba a compartir. En 1924, Sherrington escribió: 'de las observaciones del Profesor Graham Brown, una actividad intrínseca en la espina central parece responsable del mecanismo nervioso central del caminar inconsciente, una actividad central comparable con la del centro respiratorio en el bulbo (el tallo del cerebro), y como el último, altamente regulable por la acción reflexiva'. Experimentos recientes en numerosos laboratorios han producido resultados que respaldan fuertemente este punto de vista dual de los mecanismos nerviosos involucrados en caminar.

Por más de 40 años las investigaciones de Sherrington y Graham no tuvieron avances significativos en el entendimiento de cómo el sistema nervioso controla el caminar. En este intermedio se le dio un mayor énfasis a la investigación para determinar la organización y las características de los reflejos espinales. En general, un pequeño esfuerzo fue hecho para relacionar estos descubrimientos al comportamiento normal de un animal. Investigaciones contemporáneas acerca del sistema de control nervioso del caminar, empezaron en 1960 con la grabación de patrones de actividad muscular de un gato caminando libremente por Ingmar Engberg y Anders Lundberg en Suecia.

Entonces, en 1965 un emocionante descubrimiento fue hecho por los trabajadores rusos M.L. Shik, F.V. Severin y G.N. Orlovskii, que los gatos carentes de las partes superiores del sistema nervioso (el hemisferio cerebral y el tallo superior del cerebro) podían caminar de manera controlada en una caminadora, como se muestra en la Figura 2.3, en la sección B-B' de la médula espinal. Después de que el tallo superior del cerebro del gato es cortado y el forebrain removido, una estimulación eléctrica de la región locomotora en el cerebro restante causa que el animal camine cuando esta sobre una caminadora. Los movimientos de los pasos sobre la caminadora son similares en todos los aspectos a aquellos observados

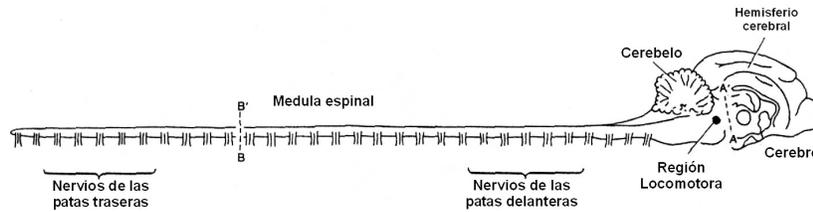


Figura 2.3: La médula espinal y la parte baja del cerebro se aíslan de los hemisferios en el gato.

durante un caminar normal; el paso que adopta un animal depende de la velocidad de la caminadora y de la fuerza de estimulación. Con una velocidad baja y un débil estímulo, el animal caminara. Un incremento de la velocidad de la caminadora y la fuerza del estímulo, causara que el animal trote y con una velocidad alta y una fuerte estimulación el animal va a galopar. Por lo tanto el comportamiento al caminar de un animal puede ser totalmente controlado por el experimentador. El gran avance de este arreglo experimental es que permite hacer grabaciones eléctricas de las células del sistema nervioso mientras el animal esta caminando, desde que se encuentre en una superficie.

En el siglo pasado, hubo numerosos estudios del control nervioso del caminar en anfibios (como sapos y tritones) y artrópodos (insectos, cangrejos y cangrejos de río). Muchos de estos trabajos tempranos en estos animales fueron hechos en el momento justo cuando el concepto dominante en neuropsicología, originado con el trabajo de Sherrington y Graham, era que los reflejos eran básicamente unidades de comportamiento. Por lo tanto no es de sorprenderse que la temprana hipótesis acerca del control del caminar de los anfibios e insectos sostuviera que los reflejos eran esenciales para la generación de los pasos rítmicos. Después, sin embargo, evidencia substancial acumulo demostraciones que esta noción era incorrecta y que el ritmo básico es generado dentro del sistema nervioso y es modificado por la entrada sensorial. Una consecuencia de esta demostración es el hecho de que el paso básico mecanizado de una cucaracha, es por decir, similar al de un gato. De hecho, la relativa simplicidad del caminar de una cucaracha ha provisto mucha información acerca de los mecanismos por los cuales la actividad reflexiva modula el ritmo centralmente generado, que ha conducido a los conceptos que pueden llevar al posible aumento de una comprensión de los sistemas más complejos.

La mayoría de la investigación sobre el caminar se ha dirigido hacia cuatro objetivos:

1. obtener una descripción precisa de los movimientos de una pata y determinar que músculos producen este movimiento
2. establecer que los mecanismos dentro del sistema nervioso central generan el ritmo básico para caminar
3. determinar la función de la entrada sensorial de los receptores de la pata y

4. determinar los mecanismos nerviosos para la coordinación de las diferentes patas durante el caminar. Los 2 animales más intensamente estudiados han sido el gato y la cucaracha. Aquí se resumirán algunos de los principales descubrimientos de algunos experimentos que involucran estos 2 animales, enfatizando aquellas similitudes que sugieran los principios acerca del control del caminar.

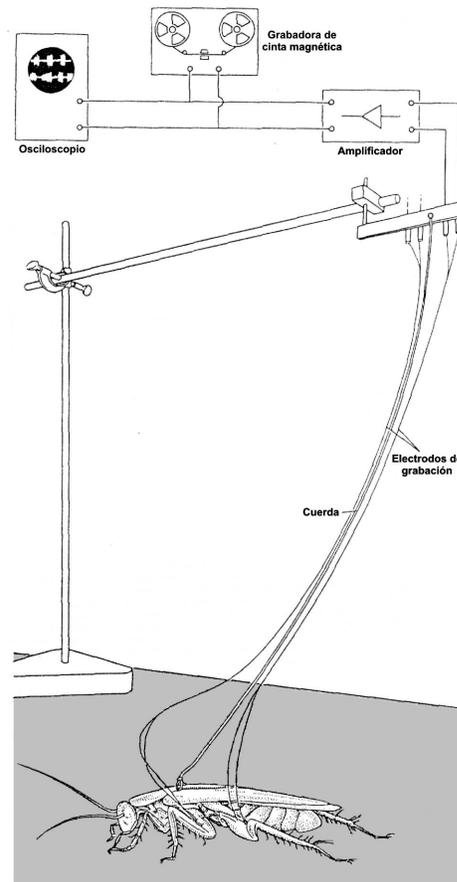


Figura 2.4: Actividad eléctrica en la pata de una cucaracha caminando libremente.

En el gato hay cuatro pasos básicos: el **caminar**, **trotar**, **correr** y **galopar**. Durante el caminar, trotar y correr los movimientos de las pisadas de las patas traseras se alternan una con otras, así como el movimiento de las patas delanteras también se alterna.

La diferencia entre estos tres tipos de pasos reside en la sincronización de los pasos de las dos patas de un solo lado del animal. Durante un caminar lento la pata delantera izquierda, por ejemplo, da un paso corto después de la pata trasera izquierda y antes de la pata trasera derecha. Así que la secuencia de pasos es trasera izquierda, delantera izquierda, trasera derecha, delantera derecha y así sucesivamente.

La transición de caminar a trotar es continua, desde que hay un incremento en la velocidad del caminar, la pata delantera empieza a pisar antes que la trasera opuesta toque el piso. Cuando la velocidad es tal que, la pata opuesta en diagonal empieza a pisar al mismo tiempo, el animal esta trotando. El correr, que se hace a la misma velocidad que el trote o a una velocidad levemente más alta, es caracterizado por un caminar simultáneo de las dos patas de un lado. Durante el galope las patas opuestas se mueven sincronizadamente, las patas delanteras se alternan con las patas traseras. La característica general que emerge de este análisis es que el acoplador entre las patas adyacentes (a lo largo y a través del animal) esta en fase (moviéndose igual) o fuera de fase (alternandose).

Los pasos comúnmente vistos en anfibios y artrópodos se asemejan a los pasos el caminar y el trotar de gatos. En la cucaracha, que por supuesto tiene seis patas, el caminar de patas adyacentes se alterna durante la velocidad moderada y alta velocidad. Así, al caminar las tres patas, una de la parte posterior derecha, una del medio de la izquierda y la derecha del frente alterna al caminar con la izquierda de la parte posterior, la derecha del medio y la izquierda del frente. El insecto por lo tanto esta apoyado siempre por lo menos por tres de sus patas, y por esa razón al paso se le nombra como el paso del **trípode**. Mientras que la velocidad a la que camina el insecto disminuye, el paso se describe mejor como secuencia detrás-a-adelante para las tres patas a cada lado del insecto. Las dos patas del insecto en cualquier segmento se alternan siempre terminantemente.

Para el caminar lento, una característica común entre el gato y la cucaracha es la secuencia de caminar detrás-a-adelante. Lo mismo se aplica a la mayoría de los animales, un hecho que se observa claramente en animales con muchas patas tales como milpiés y ciempiés, donde ondas de pasos aparentan moverse desde atrás a adelante.

El ciclo de un paso para una pata individual consiste de dos fases básicas: **la fase de oscilación**, cuando la pata está despegada del piso y moviéndose hacia adelante, y **la fase de la postura**, cuando la pata está en el piso y moviéndose al revés con respecto al cuerpo. La fuerza propulsiva para la progresión se desarrolla durante la fase de la postura. Una característica común del ciclo de un paso en la cucaracha y el gato (y en la mayoría de los animales incluyendo hombre) es que la duración de la fase de la oscilación sigue siendo constante mientras que la velocidad del caminar varía. Los cambios en la velocidad de progresión son producidos sobre todo por los cambios en el tiempo que toma a las piernas para ser contraídas durante la fase de la postura.

La técnica más simple para determinar qué músculos están implicados en generar las fases de oscilación y de postura del ciclo del paso, es registrar la actividad eléctrica en los músculos de la pata de un animal que camina. Las contracciones del músculo son iniciadas por una serie de breves potenciales eléctricos propagados a lo largo de la membrana externa de cada fibra muscular. La suma de los acontecimientos eléctricos de diversas fibras se puede registrar por medio de pares de electrodos finos del alambre implantados en el músculo. Las grabaciones obtenidas con este método se llaman electromiogramas, como

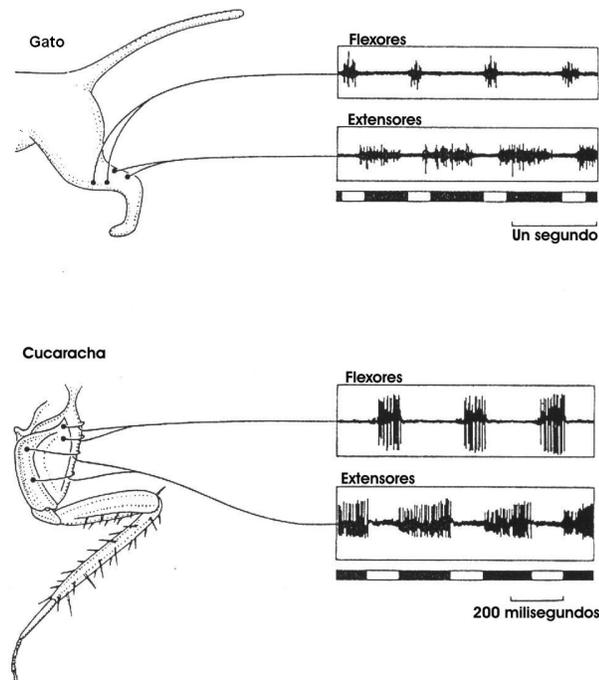


Figura 2.5: Las señales recíprocas de actividad eléctrica son grabadas en los músculos flexores y en los músculos extensores durante la fase de oscilación (parte blanca) y la fase de la postura (parte negra).

se puede observar en la Figura 2.4 para el caso de la cucaracha.

Para grabar electromiogramas de los músculos de la pata de una cucaracha que camina libremente, los extremos sin aislar de dos alambres muy finos (un dosmilesimo de una pulgada de diámetro) se colocan en cada uno de los músculos de la pata que producen los movimientos de una articulación. Los otros extremos de los alambres de grabación están conectados a unas terminales montadas por encima del animal, y las longitudes de los alambres se ajustan de modo que el animal pueda caminar libremente alrededor de un área de dos pies de diámetro. Las señales eléctricas de cada músculo se amplifican y se exhiben en un osciloscopio, donde pueden ser analizadas. Almacenar las señales en archivos electrónicos permite hacer un análisis computarizado tiempo después. Para reducir al mínimo cualquier efecto mecánico que los alambres de la grabación pudieran tener en el movimiento, el almacenamiento de datos se hace generalmente de dos músculos a la vez. Es posible, sin embargo, implantar 24 electrodos en un animal. La técnica para registrar electromiogramas de los músculos en otros animales que caminan es similar en principio al método desarrollado para la cucaracha.

La mayoría de los músculos que explican los movimientos de las patas traseras del gato y de la cucaracha se pueden clasificar como los **músculos flexores** o **músculos**

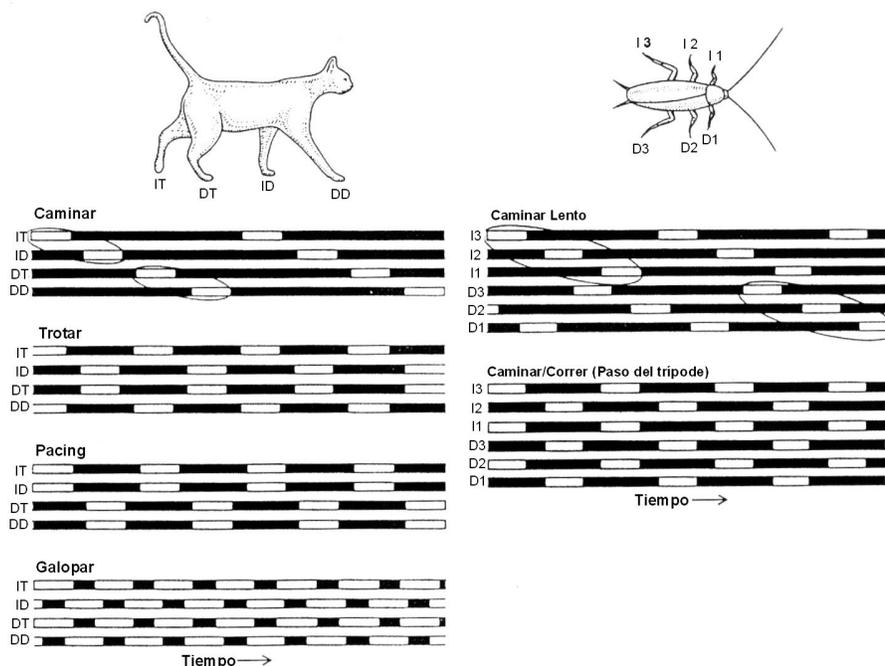


Figura 2.6: Patrones de pasos del gato y la cucaracha. De izquierda a derecha cada barra horizontal representa el tiempo en que una pata esta despegada del piso (partes blancas de la barra) y el tiempo en que una pata esta en el piso (partes negras de la barra).

extensores según si la función del músculo es reducir el ángulo de la articulación o aumentarlo. Las grabaciones del electromiograma de los músculos durante el caminar han demostrado que la actividad eléctrica de los flexores y de los extensores se alterna, como se puede observar en la Figura 2.5, para el caso de la cucaracha. Las señales alternas de la actividad que es observada son correlacionadas bien con el movimiento de la pata. Los flexores comienzan a descargarse levemente antes del comienzo de la fase de oscilación, y las contracciones resultantes en estos músculos levantan rápidamente la pata del piso y la mueven hacia adelante con respecto al cuerpo. En el gato los extensores se activan completamente antes del final de la fase de la oscilación, haciendo que la pata se enderece cerca del final de la fase de oscilación, produciendo un paso eficaz. Los extensores siguen estando activos durante la mayor parte de la fase de postura apoyando el peso del animal y desarrollando la fuerza de propulsiva hacia adelante. De manera similar, en la pata trasera de la cucaracha, la actividad en los músculos extensores durante la fase de postura, endereza la pata y desarrolla el empuje para caminar.

En ambos animales las variaciones en la amplitud y en los tiempos de inicio de la actividad eléctrica en los diversos músculos flexores y extensores en cada pata son complejas y dependen de la velocidad de caminar. Poco se sabe hasta ahora sobre cómo estos patrones complejos de actividad eléctrica son creados por el sistema nervioso central. El problema más simple, al parecer, es determinar los mecanismos responsables de generar el patrón

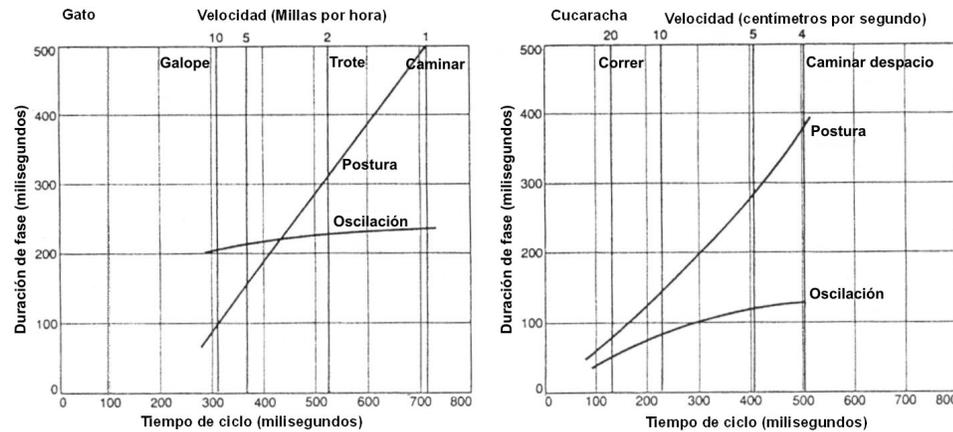


Figura 2.7: La duración de la fase de oscilación de un paso (cuando la pata está despegada del piso) se mantiene constante en comparación a la duración de la fase de postura (cuando la pata está en el piso) en la mayoría de los animales.

básico de alternación de la actividad en flexores y extensores, sin embargo, ha recibido mucha atención.

En pocos años, se ha acumulado mucha evidencia que apoya la idea original de Graham Brown de que el ritmo básico para caminar en cada pata del gato es generado por los mecanismos dentro de la médula espinal, de que de la evidencia de Graham y que efecto es un generador de ritmo central para cada pata. La evidencia que apolla la existencia de este generador de ritmo viene de las extensas investigaciones de Sten Grillner y sus colegas de Suecia en los patrones de la actividad del flexor y los músculos extensores después de la eliminación de la entrada sensorial de los receptores en las patas de gatos que caminan. (La entrada sensorial puede ser eliminada fácilmente cortando las raíces dorsales; distintos fajos de nervios que entran en la médula espinal y contienen casi todas las fibras sensoriales del nervio de las patas pero ninguna de las fibras del nervio motriz que proveen a los músculos.) Uno de los resultados más importantes divulgados por los investigadores suecos era que después de que los segmentos de la pata trasera se han aislado (cortando la médula espinal o el tallo de cerebro superior) los patrones recíprocos rítmicos de la actividad en flexores y extensores de la pata trasera del gato se podrían seguir generando en ausencia de la información sensorial de los receptores periféricos en la pata. Además, ellos encontraron que cuando gatos con la médula espinal seccionada o con la parte superior del cerebro separada fueron hechos caminar en una caminadora, la secuencia temporal de activación de los diferentes músculos de la pata trasera no fueron alterados al remover los sensores puestos en la pata trasera. El siguiente resultado mostró que en adición al ritmo básico que había sido generado centralmente, los mecanismos centrales son responsables de determinar el orden en el cual los diferentes músculos se activan. Resultados similares fueron obtenidos por John F. Iles y Keir Pearson en sus investigaciones de cucarachas. Después de eliminar todos los sensores colocados en las patas de los animales operados se

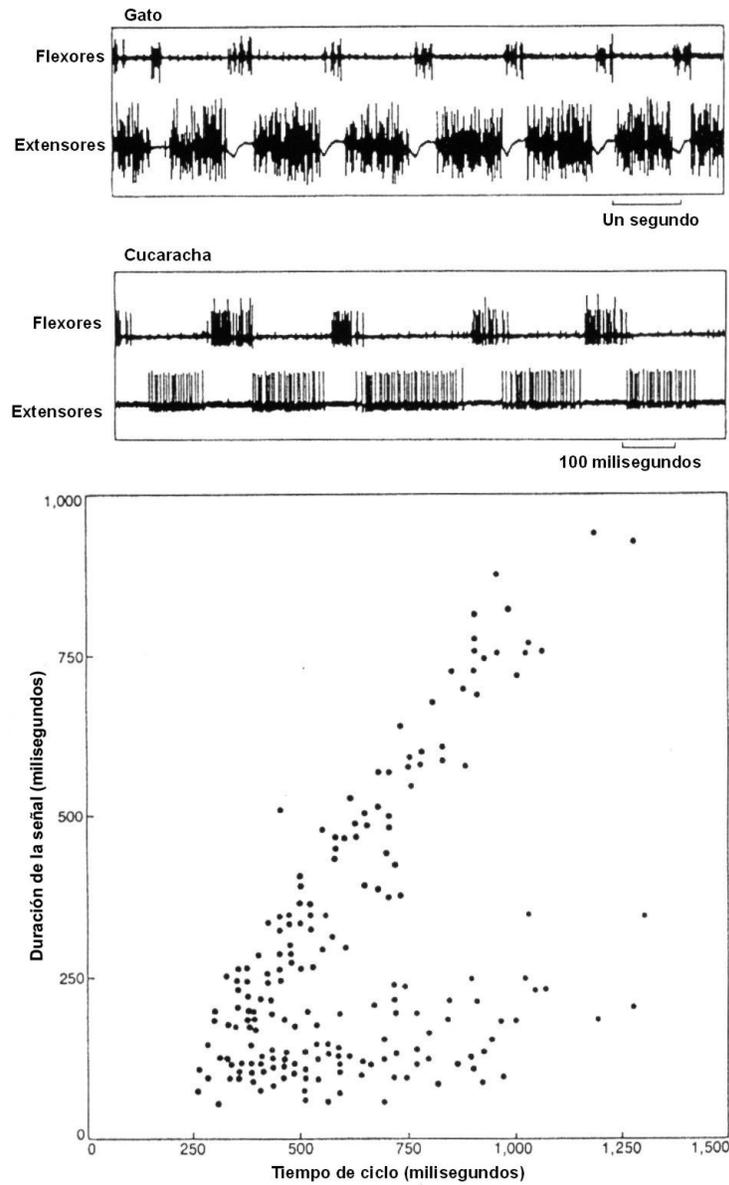


Figura 2.8: Comprobación de la existencia de un generador de ritmo central.

encontró que persiste un patrón recíproco en las neuronas motrices de los flexores y extensores de la pata trasera. La secuencia de activación de las diferentes neuronas motrices permanecen iguales que en el caminar normal de un animal y la duración de la actividad en el flexor permanece casi constante, como se muestra en la Figura 2.7. Existen desde niveles inferiores del sistema nervioso de las cucarachas redes que pueden generar la secuencia rítmica de la actividad eléctrica en los flexores y extensores similar a la actividad observada en estos músculos durante el caminar normal.

Los patrones centralmente generados de la actividad motriz han sido encontrados para desmentir todo tipo de comportamiento estereotipado tanto en animales vertebrados e invertebrados; el comportamiento de este tipo incluye la respiración, movimientos del ojo, masticar, tragar y volar. Neurofisiólogos, usualmente se refieren a este tipo de patrones de actividad como programas motrices.

Los mecanismos celulares responsables de generar señales recíprocas rítmicas de la actividad en neuronas motrices apenas están empezando a ser comprendidos. Pequeños progresos han sido hechos en la determinación de tales mecanismos en vertebrados, principalmente debido a la inmensa complejidad del sistema nervioso de estos animales. Como resultado, muchas de nuestras ideas acerca de la base celular de la generación del ritmo central, vienen de los estudios de los invertebrados. En estos animales se ha encontrado que la actividad rítmica en sus neuronas motrices puede ser generada de dos distintas maneras; esto puede resultar de una actividad oscilatoriamente intrínseca en las células nerviosas individuales denominadas generadoras de pasos (pacemakers) o puede emerger como una propiedad de un grupo interconectado de células nerviosas ninguna de las cuales tiene la propiedad oscilatoria intrínseca. No hay evidencia de que en los sistemas del caminar de los animales, las células nerviosas sean responsables de generar los patrones motrices rítmicos. Hay evidencia, sin embargo, de que un grupo de células nerviosas interconectadas genera el ritmo recíproco de la actividad en la pata trasera de la cucaracha.

Los patrones de actividad en las neuronas motrices de los músculos flexor y extensor de la cucaracha, es decir, las células nerviosas que dan lugar a la contracción de los músculos flexor y extensor, permitieron a Iles y a Pearson sugerir en 1970 que la actividad de la señal recíproca es generada por un sistema de interneuronas (que llamamos generador de señal flexora) que periódicamente excita las neuronas motrices del flexor e inhibe las neuronas motrices del extensor. Posteriormente Charles R. Fourtner y Keir Pearson tuvieron éxito haciendo grabaciones intracelulares con microelectrodos de las interneuronas dentro del sistema nervioso de la cucaracha durante los movimientos rítmicos de la pata. Sus resultados apoyaron fuertemente el concepto de un sistema generador de señales para el flexor. Identificaron una sola interneurona en la cual el potencial eléctrico a través de la membrana externa osciló en la fase con la actividad señales rítmicas en neuronas motrices flexoras. Cuando las oscilaciones similares en el potencial de la membrana de esta interneurona fueron artificialmente creadas al hacer circular corriente a través del electrodo de grabación, fueron capaces de imitar las señales de actividad normalmente generada en

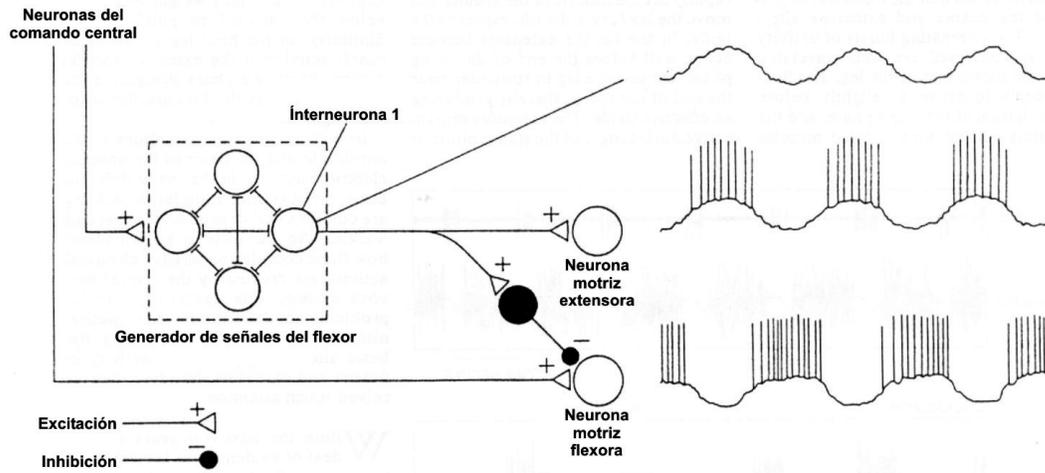


Figura 2.9: Organización de el generador central de ritmo en cada pata de la cucaracha.

las neuronas motrices durante los movimientos rítmicos de la pata. Además, la excitación de las neuronas motrices flexoras fue acompañada por la inhibición de cualquier actividad espontánea en las neuronas motrices extensoras.

La interneurona que excita los músculos flexores y que inhibe los músculos extensores parece pertenecer a una red de células nerviosas, y la interacción entre los miembros de la red es responsable de la activación rítmica de los músculos flexores. La característica interesante de este sistema generador de ritmo en la cucaracha es su asimetría: no parece haber un sistema de interneuronas responsables de generar las señales del extensor. Los extensores son continuamente excitados, y su actividad es, periódicamente interrumpida por la inhibición del generador de señales del flexor. El generador de señales del flexor da lugar a una explosión de actividad eléctrica que es justamente constante en la duración, independientemente o sin importar la tasa en la cual las señales son producidas; como resultado la duración de la fase de oscilación varía sólo ligeramente con la velocidad con que camina.

Aunque poco se sabe en cuanto a como se genera el ritmo al caminar en la médula espinal del gato, se sabe que el ritmo no depende de una conexión directa de las neuronas motrices. Como en la cucaracha, las interacciones dentro de una red de interneuronas son responsables. Un número de modelos diferentes de como los sistemas de interneuronas pueden dar lugar al ritmo del caminar, incluyendo uno originalmente propuesto por Graham Brown en 1914, están actualmente bajo consideración pero aun no hay suficiente información para evaluar la validez de cualquiera de ellos.

La existencia de una generación de ritmo central para cada pata no significa que la

entrada sensorial no tenga importancia en el modelado de la actividad motriz. De hecho, la entrada sensorial es esencial, si el animal puede ser capaz de adaptar sus movimientos de sus pasos inmediatamente para compensar irregularidades en el terreno por el cual anda. Por ejemplo, los pasos de las patas traseras de un gato, que ha sufrido un corte transversal espinal o cerebral, se adaptan para emparejar la velocidad en una caminadora para una amplia gama de velocidades de esta. Ya que hay poco cambio en la duración de la fase de oscilación, la adaptación del ciclo del paso a la velocidad de una caminadora es resultado de una disminución en la duración de la fase de postura. La explicación de este fenómeno es que una señal sensorial indica la extensión de una pata durante la fase de postura y cambia el programa motriz de la postura para balancearse. De ahí que después de una fase de oscilación estereotipo la pata es colocada sobre una caminadora y se mueve hacia atrás con la velocidad de la caminadora hasta que una señal sensorial provoque la iniciación de la siguiente fase de oscilación.

Dos condiciones parecen ser necesarias para que la fase de oscilación comience. Primero, la articulación de la cadera debe ser ampliada; segundo, los músculos extensores deben ser relajados. Ambas condiciones son realizadas cerca del final de la fase de postura. El cambio sensorial es efectuado por medio de circuitos localizados dentro de los segmentos de la pata trasera de la médula espinal. Esta conclusión importante viene del trabajo de Grillner y sus colegas Serge Rossignol y Hans Forssberg, quienes mostraron que prevenir la extensión de la pata trasera de un *gato espinal*¹ que camina sobre una caminadora, inhibe la intervención de aquella pata. Si se permite a la pata extenderse despacio, la fase de oscilación es iniciada eventualmente cuando la pata está en una posición cercana a la posición donde se inicia la oscilación durante el caminar normal.

El principio que dice que una pata debe ser relajada para que la oscilación sea iniciada, también se aplica al sistema del caminar de la cucaracha. La activación de los receptores que detectan fuerzas en la cutícula (esqueleto duro externo) de la pata durante la fase de postura, inhibe el sistema de generación de señales para el flexor de interneuronas y así previene el cambio de la postura al balanceo. Como las patas son extendidas durante la fase de postura, la tensión en la cutícula disminuye, ya que el peso del animal es soportado mas tiempo por otras patas. Este movimiento elimina la influencia inhibitoria de los receptores de tensión de la cutícula desde el generador de señales del flexor, permitiendo así al sistema activarse y así producir la fase de oscilación.

En la cucaracha el cambio del programa motriz de la oscilación a la postura también es provocada por una entrada sensorial. Un grupo de receptores en el pelo es excitado por los movimientos de flexión durante la fase de oscilación. La entrada sensorial de estos receptores inhibe las neuronas motrices y el sistema generador de señales del flexor. El último efecto apaga la señal del flexor (y finaliza la fase de oscilación) y permite a la pata iniciar la fase de postura. La iniciación de la postura también es facilitada por una

¹*Gato espinal* hace referencia a un gato cuya médula espinal fue seccionada para incomunicar a su cerebro con sus patas traseras.

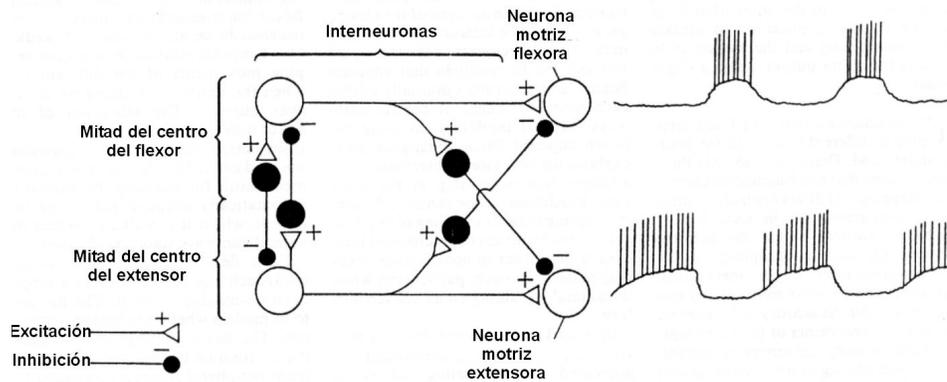


Figura 2.10: Modelo del Centro-Medio para explicar la generación central de una actividad recíproca rítmica en las neuronas motrices de las patas traseras del gato.

conexión estimulante de los receptores en el pelo a las neuronas motrices del músculo extensor. El camino inhibitorio de los receptores en el pelo al generador de señales del flexor, asegura que la posición de la pata al final de la fase de oscilación permanece constantemente independiente de la posición en la cual el paso fue iniciado.

Aparte del hecho de que la entrada sensorial funciona para cambiar el programa motriz de una fase a otra, es claro que esta también funciona para modificar el programa motriz durante la ejecución de una sola fase. Grillner y sus colegas describieron un reflejo importante de este tipo en la pata trasera de un gato espinal. Ellos mostraron que el estímulo eléctrico o mecánico de los receptores en la piel sobre la parte superior de una de las patas traseras del gato durante la fase de oscilación causa un aumento grande de actividad eléctrica en los músculos flexores de la pata y por consiguiente la pata se levanta más alto. La función de este reflejo, en condiciones naturales, es fácil de ver, desde que la parte superior de la pata a menudo golpea un objeto. La elevación reflexiva del pata permitirá evitar el objeto. Un rasgo significativo del reflejo es que aparece en el animal espinal. Demostrando que esta compensación automática en el ciclo del paso para perturbaciones externas no necesariamente requiere la participación de niveles más altos del sistema nervioso.

En la cucaracha, la retroalimentación de los receptores de tensión en la cutícula excita las neuronas motrices del extensor durante la fase de postura. Desde que estas neuronas motrices son activadas durante la fase de postura, la entrada sensorial incrementa la amplitud de la actividad del extensor. El efecto puede ser considerado como un reflejo reforzante; su función es compensar variaciones en la carga cuando la resistencia a la extensión cambia inesperadamente. Por ejemplo, la carga llevada por la pata de repente es incrementada debido al movimiento irregular en una o varias de otras patas, hay un incremento en la actividad de los receptores de tensión de la cutícula y de esta manera, hay un incremento de la actividad del extensor para oponerse a cualquier tendencia de la

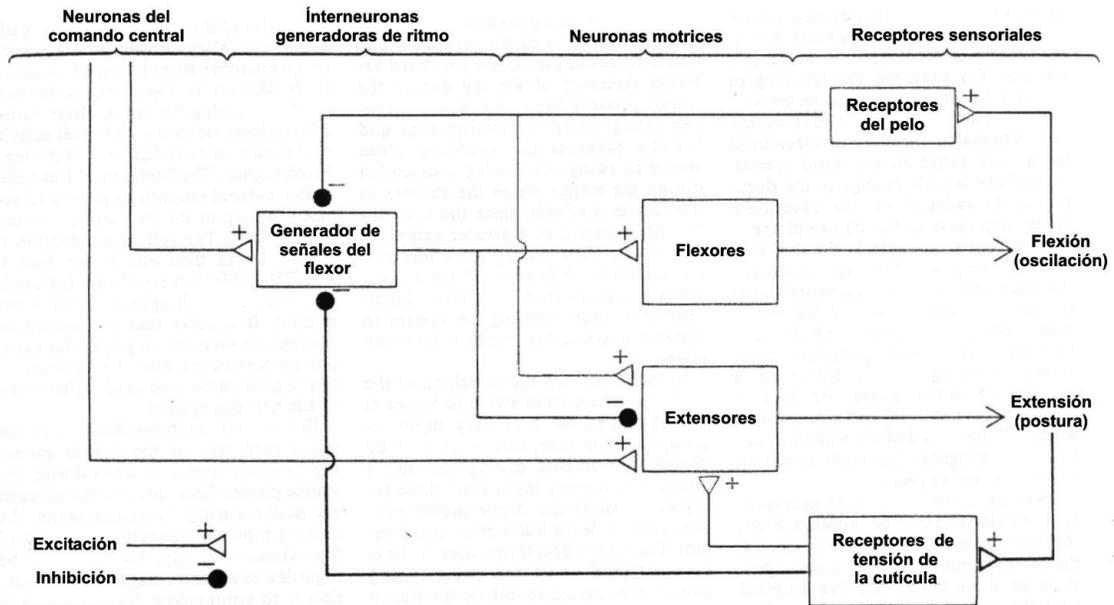


Figura 2.11: Caminos de reflejos en las patas de la cucaracha.

carga adicional de disminuir el rango de extensión. En la pata trasera del gato, un reflejo reforzado también puede funcionar durante la fase de postura para ayudar a compensar cualquier aumento inesperado en la carga sobre los músculos extensores, desde el aumento de la resistencia de la extensión de la pata durante la fase de postura causa un aumento marcado de la actividad de los extensores. Esta compensación del reflejo toma una cantidad de tiempo significativa y podría funcionar efectivamente sólo en un gato que camina despacio.

Parece claro que los reflejos tienen dos funciones muy diferentes en el control del ciclo de un paso en una sola pata. La primera es cambiar el programa motriz de una fase a otra (es decir iniciar la fase de oscilación o iniciar la fase de postura) y la segunda es modificar la salida motriz en una sola fase.

Los mecanismos que coordinan los pasos en las diferentes patas aun no son bien entendidos. Hay tres mecanismos que pueden funcionar para coordinar pasos: (1) conexión central directa de generadores de ritmo en cada pata por caminos dentro del sistema nervioso; (2) la conexión indirecta de los generadores de ritmo por un acoplamiento mecánico, tal que los movimientos de cualquier pata cambiarían las influencias sensoriales en los generadores de ritmo de la otra pata; (3) influencias sensoriales comunicadas directamente de una pata a los generadores de ritmo de otras patas. Inhibiciones centrales que se conectan entre generadores de ritmo adyacentes han sido demostradas durante el caminar en el

gato y la cucaracha. Después de la eliminación de todas las entradas sensoriales en las patas traseras de los gatos espinales, la actividad motriz en las patas opuestas sigue con un patrón de alternación rítmica similar al observado durante el caminar normal. En la cucaracha, por otra parte, la actividad flexora en patas adyacentes pocas veces ocurre de manera sincronizada; aún después de que la entrada sensorial ha sido eliminada.

Esta observación en la cucaracha, combinada con un análisis de la actividad eléctrica en las interneuronas que conectan los segmentos adyacentes del insecto, condujo a Iles y Pearson a concluir que los generadores de señales del flexor adyacentes se inhiben mutuamente el uno al otro mediante caminos centrales. La conexión inhibitoria mutua entre generadores de señales del flexor adyacentes explica la observación conductual de porque las patas adyacentes nunca pisan al mismo tiempo. Además de la conexión inhibitoria central, el acoplamiento indirecto de generadores de ritmo mediante acoplamientos mecánicos es importante en la coordinación de los pasos de la cucaracha, en particular cuando el animal esta caminando por una superficie irregular.

En una cucaracha que camina, las patas que cargan el peso del animal son impedidas de iniciar la fase de oscilación porque la actividad en los receptores de tensión de la cutícula inhibe al generador de señales del flexor asociado con cada una de aquellas patas. La fase de oscilación puede ser iniciada sólo en las patas que llevan poca o ninguna carga. Cuando una pata que da un paso encuentra apoyo sólido, comenzará a llevar un poco del peso del animal y así disminuirá la carga llevada en una o varias otras patas. Este efecto puede ser suficiente para permitir la iniciación de la fase de oscilación en las otras patas. Sujeto a la condición de que ninguna de las dos patas adyacentes pueden pisar al mismo tiempo (debido a la inhibición mutua entre los generadores de señales del flexor), no necesariamente debe haber una relación exacta y predecible entre los movimientos de los pasos de las diferentes patas cuando el animal camina sobre una superficie irregular. La inhibición de los generadores de señales del flexor por la entrada sensorial desde los receptores de tensión en la cutícula (señalando la carga llevada por la pata) es un mecanismo eficiente para permitir al animal adaptar automáticamente su paso al terreno por el cual este caminar, de modo que el animal pueda caminar establemente en cualquier momento.

Cada generador de señales del flexor en la cucaracha puede ser considerado como un simple elemento de toma de decisiones. La decisión que se tomará es si hay que dar un paso o no. El generador de señales del flexor basa su decisión en la información de receptores periféricos que señalan el estado de esa pata e informan de otros generadores de señales del flexor que señalan el estado de las patas adyacentes. La decisión de pisar es hecha cuando la posición de todas las patas es tal que un paso no conducirá a la inestabilidad.

El resultado de las investigaciones recientes sobre el control nervioso del caminar en muchos animales diferentes ha mostrado que los circuitos nerviosos básicos para el caminar están localizados en los niveles inferiores del sistema nervioso. El trabajo sobre el gato,

por ejemplo, ha confirmado la conclusión de Sherrington y Graham Brown de que los pasos son un acto esencialmente autónomo que depende principalmente de los circuitos nerviosos dentro de la médula espinal. Por lo tanto, un rasgo importante de los sistemas del caminar en todos los animales, es que los centros más altos del sistema nervioso no son necesarios para los patrones básicos de la actividad motriz.

Esto no significa que los centros más altos no juegan ningún papel en el control del caminar. Estos seguramente están implicados en la iniciación y el mantenimiento del caminar, pero los caminos que transportan las órdenes para caminar aún no han sido identificados. Otra función importante de los centros altos, en particular en mamíferos y pájaros, es modular el programa motriz del caminar básico en respuesta a entradas sensoriales recibidas desde los receptores en la cabeza, como los ojos y el aparato vestibular (el órgano receptor en el oído que siente la posición y el movimiento de la cabeza). La modulación del programa motriz por entradas desde los receptores en la cabeza no sólo funciona para controlar la dirección del caminar, sino también para ayudar a asegurar que el equilibrio y la estabilidad son mantenidos en cualquier momento.

Hay dos notables semejanzas entre los mecanismos responsables del control del caminar en el gato y en la cucaracha. La primera es que el ritmo básico recíproco de la actividad eléctrica en músculos flexores y extensores puede ser generado en ausencia de la entrada sensorial de los receptores en la pata. Además, en ambos animales la duración de las señales flexoras generadas en el centro son constantemente comparadas con la variación en la duración de las señales del extensor. Este descubrimiento corresponde a la observación conductual de que la duración de la fase de oscilación permanece esencialmente constante para grandes cambios de la velocidad del caminar.

La segunda semejanza es que los reflejos funcionan como un cambio en la actividad motriz; de la extensión a la flexión. La iniciación de la fase de oscilación requiere que la pata sea extendida y relajada. Los reflejos también pueden funcionar para modular la actividad motriz, ya sean en la fase de oscilación o la fase de postura. Ambos tipos de reflejos funcionan modificando el programa motriz, ajustando los movimientos del paso a variaciones imprevisibles en el ambiente externo. Es también importante notar que estos reflejos pueden funcionar en animales después de que los niveles más altos del sistema nervioso han sido desconectados. Así, la adaptación automática del movimiento de un paso es llevada a cabo en parte por caminos de reflejos limitados a los niveles inferiores del sistema nervioso.

Al principio las semejanzas marcadas entre los mecanismos básicos para el control del caminar en el gato y aquellos para el control del caminar en la cucaracha pueden parecer sorprendentes, en particular cuando es considerado que los mamíferos e insectos evolucionaron separadamente de los ancestros no caminantes similares a los gusanos. Las semejanzas se hacen más comprensibles, sin embargo, cuando se recuerda que en ambos grupos de animales, el sistema del caminar evoluciono para la misma función, es decir para

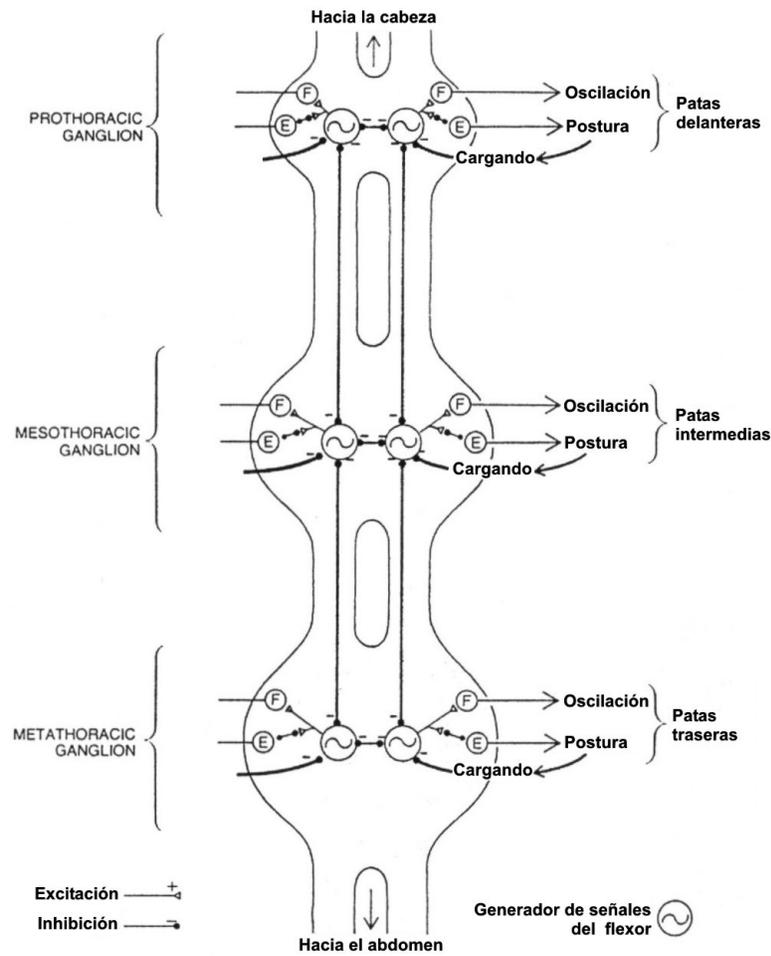


Figura 2.12: En las seis patas de una cucaracha los pasos son coordinados por caminos nerviosos que interconectan a los generadores de señales rítmicas.

mover estable y rápidamente al animal sobre el terreno irregular. Hay numerosos ejemplos en la naturaleza donde animales sin relación evolucionaron en sus mecanismos de manera similar para la misma tarea: la semejanza del ojo de los moluscos cefalópodos como el pulpo y el ojo de los vertebrados. Entonces la semejanza entre los sistemas del caminar en el gato y en la cucaracha sugiere que el número de formas correctas de construir un sistema óptimo del caminar es muy limitado.

Del estudio del caminar en animales diversos comienzan a surgir algunos principios comunes que son la base del control del caminar. Un mejor entendimiento de estos principios, en su momento, puede contribuir a mejor entendimiento de como el sistema nervioso controla el caminar del hombre.

2.2. Maquinas que Caminan

Muchas máquinas imitan la naturaleza; un ejemplo familiar es la imitación del vuelo de un pájaro por un aeroplano. Una forma de locomoción animal que se ha resistido a ser imitada es el caminar. ¿Puede ser que computadoras modernas y sistemas de control retroalimentados hagan posible construir máquinas que caminen? Hace algunos años, Marc H. Raibert e Ivan E. Sutherland exploraron la pregunta con modelos computarizados y hardware de esa época.

Construyeron dos maquinas. Una tiene 6 patas y un operador humano; su propósito es explorar el tipo de locomoción desplegado, que es usado por los insectos, el cual no demanda atención al problema del equilibrio. La otra maquina solo tiene una pata y se mueve saltando; sirve para explorar el problema del equilibrio. Llamaron al primer tipo de locomoción "arrastrarse" para distinguirlo del caminar, el cual necesita del equilibrio y correr, que involucra periodos de vuelo. Ese trabajo ha ayudado a entender como es que la gente y otros animales se arrastran, caminan y corren.

A diferencia de una rueda, que cambia su punto de apoyo continua y gradualmente mientras lleva el peso, una pata cambia su punto de apoyo de repente y debe ser descargada para hacer eso. Para un sistema con patas que se arrastra, camina o corre, cada pata debe atravesar períodos, uno es cuando este lleva la carga y mantiene su pata fija en la tierra y otro período cuando es descargado y su pata es libre de moverse. Este tipo de alternación cíclica entre una fase cargada, llamada postura y una fase descargada, llamada transferencia, es encontrada en cada de sistema con patas. Como alguien que ha montado un caballo a trote o a galope sabe, la alternación entre la postura y la transferencia puede generar un pronunciado movimiento de arriba a abajo. Se cree que las máquinas con patas pueden ser construidas y que reducirán al mínimo este movimiento.

Este trabajo y el trabajo de otros tarde o temprano puede conducir al desarrollo de

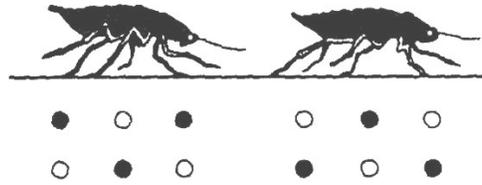


Figura 2.13: Paso del Trípode Alterno.

máquinas que se arrastren, caminen y corran en un terreno donde la suavidad o los baches hagan que los vehículos con ruedas y arastrados sean ineficaces y así dirigirlos a usos industriales, agrícolas y militares. La ventaja de estos vehículos con patas en terreno difícil consiste en que ellos pueden escoger equilibrios para mejorar la tracción, reducir al mínimo los jalones y pasar obstáculos. En principio el funcionamiento de los vehículos con patas puede ser en mayor grado independiente de las asperezas de la tierra.

Como se ha indicado, la locomoción es posible con o sin el equilibrio dinámico. Los animales que se arrastan evitan la necesidad de equilibrarse, teniendo al menos seis patas, de las cuales al menos tres siempre puede ser desplegadas para proporcionar un trípode para el apoyo. Las fotografías del movimiento de alta velocidad de los insectos muestran que ellos comúnmente avanzan arrastándose con un trípode alternado.

Aunque una máquina que se arrastra no necesita del equilibrio dinámico puede ser construida con cuatro patas, tal máquina funciona torpemente porque su peso debe ser cambiado en cada paso para impedirle voltearse. El funcionamiento satisfactorio sin el equilibrio activo requiere al menos seis patas, seis es el número más pequeño de patas que siempre proporciona un trípode para el apoyo incluso cuando la mitad de las patas son elevadas. Varias máquinas de seis patas han sido construidas, cada una difiere en el tamaño y en el diseño mecánico. Todas ellas dependen del control de una computadora para las patas.

Los programas de computadora que controlan tal máquina realizan cinco tareas. Primero, regular la forma de caminar de la máquina, es decir la secuencia y el camino en el cual las patas realizan la tarea de locomoción. Las máquinas de seis patas trabajan con la forma de caminar que eleva una, dos o tres patas simultáneamente.

La forma más simple de caminar involucra una secuencia regular de los movimientos de la pata. Por ejemplo, el paso del trípode puede ser registrado como (1,5,3; 6,4,2) con las comas designando el empleo simultáneo de las patas y los ; el empleo secuencial. Asimismo los pasos que elevan una sola pata a la vez como (3; 2; 1; 4; 5; 6) y (3; 4; 2; 5; 1; 6) son útiles. Un paso que eleva varias patas a la vez, generalmente hace posible viajar más rápido, pero ofrece menos estabilidad que un paso que mantiene más patas sobre la tierra.

Una segunda tarea de un programa computacional que controla una máquina que se arrastra es impedir a la máquina voltearse. Si el centro de gravedad de los movimientos de la máquina va más allá de la base de apoyo proporcionada por las patas, la máquina se volteará. La computadora debe supervisar ubicación del centro de gravedad de la máquina en lo que concierne a la colocación de las patas para asegurar que la base de apoyo sea siempre bastante grande. Para formas simples de caminar la geometría de las patas es suficiente para mantener una base adecuada de apoyo, pero para una manera de caminar más compleja un cómputo cuidadoso de estabilidad estática puede ser sumamente importante.

Ya que muchas patas comparten el apoyo de la máquina, una tercera tarea del control computacional es la de distribuir la carga de apoyo y las fuerzas laterales entre las patas. En el paso de trípede, desde luego, la distribución de la carga de apoyo es colocada por la geometría de las tres patas de apoyo. Con más de tres patas de apoyo la computadora que controla debe decidir como manejar la distribución de carga para alcanzar objetivos del nivel alto del sistema nervioso de un animal como la suavidad en un paseo y la una mínima perturbación de el piso.

Incluso cuando sólo tres patas apoyan la máquina, el programa de control debe distribuir las fuerzas de la pata lateral. Un modo de ver esta tarea es considerando que el sistema de control debe mantener la máquina simplemente haciendo ejercicios isométricos contra el piso. La cantidad sensores y de cómputo que es necesario para distribuir las cargas laterales entre muchas patas puede ser muy grande.

Una cuarta tarea de la computadora es la de asegurarse que las patas no operan fuera de los límites de sus recorridos. La geometría de las patas puede hacer posible que una pata golpee con otra, si las patas pueden chocar, la computadora debe limitar su movimiento para prevenir el daño. Para maximizar la utilidad de cada pata su colocación sobre el piso debe tener en cuenta los límites del movimiento de la pata y el movimiento esperado de la máquina durante el período de postura de aquella pata. Por ejemplo, si la máquina esta girando a la derecha, las patas delanteras deberían ser colocadas más lejos a la derecha de modo que sus recorridos laterales puedan ser ajustados durante la vuelta. Para un vehículo con el control autónomo, la colocación de las patas puede estar basado en el futuro camino planificado del vehículo. Para un vehículo con un conductor humano la colocación apropiada de cada pata requiere una predicción de las órdenes del conductor para el siguiente período de postura.

Una quinta tarea para la computadora es la de escoger sitios para dar los pasos y que darán el apoyo adecuado. Sobre el suelo liso la tarea es fácil pero sobre el terreno áspero puede ser sumamente difícil. Uno puede prever que un sistema que explora terreno inspeccionaría la tierra delante de la máquina y escogería probablemente donde pisar firme. Para hacer uso de tal escáner la computadora de control construiría un modelo interno digital del terreno. Tal modelo tendría que considerar solo obstáculos que son

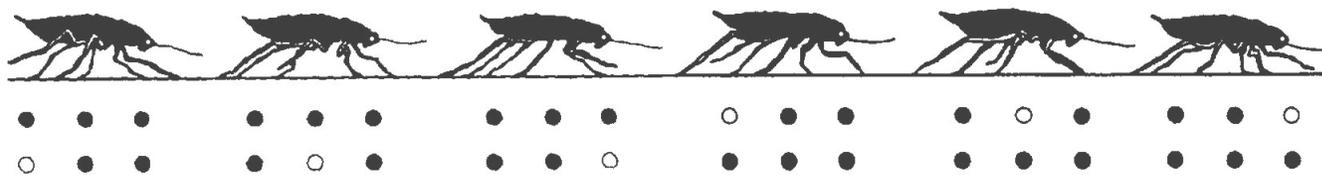


Figura 2.14: Los pasos de los insectos ofrecen las bases para diseñar un sistema capaz de desplazarse por medio de seis patas.

de un tamaño similar o mas grandes que las patas de la máquina. Un operador humano podría aportar al modelo ayuda en la evaluación de posibles tropiezos.

Sutherland construye una maquina de seis patas, una maquina que se desplaza manejada hidraulicamente. Un motor de gasolina proporciona su poder y actuadores hidráulicos mueven sus patas. Tiene seis patas, de modo que el equilibrio dinámico no es necesario.

Un microprocesador built-in controla las patas encendiendo o apagando las válvulas que regulan el flujo del aceite a los actuadores hidráulicos. Los sensores en cada pata reportan al microprocesador su posición y las fuerzas que actúan. La máquina es bastante grande para acomodar un conductor humano, quien controla su velocidad y dirección de movimiento y establece la inclinación de su cuerpo y su separación del piso. La velocidad del vehículo es aproximadamente dos millas por hora.

Un objetivo en el diseño del vehículo era minimizar la cantidad de cómputo requerido para obtener un movimiento de arrastre. Los circuitos hidráulicos están diseñados para hacer el movimiento de las patas a lo largo de trayectorias útiles sin la atención del microprocesador, que simplemente selecciona uno de las trayectorias disponibles para cada piernas. Así el microprocesador es libre de concentrarse en seleccionar que patas usara para decidir donde dar el siguiente paso; esto no tiene que pasar el tiempo calculando los detalles del movimiento de la pata.

Cada pata de la máquina puede balancearse para adelante o atrás y arriba o abajo en la unión de cadera universal que lo adjunta al marco de la máquina. Estos movimientos son ejecutados alargando o acortando los dos actuadores hidráulicos por pata, que son adaptadas en una configuración de V encima de la pata. Un ajuste de las válvulas provee aquel aceite dejando a un actuador entrar en el otro, de modo que cuando un actuador se acorte, el otro actuador se alarga en la misma cantidad. Debido a la geometría de los pivotes esta conexión proporciona el movimiento horizontal de la pata.

El movimiento horizontal puede ser activado o desactivado dependiendo de los ajustes de la válvula, de forma que algunas patas puedan servir para manejar la maquina hacia delante mientras que otras a los costados. Como las patas están colocadas en la tierra

y cargadas, pueden deslizarse hacia adelante o hacia atrás, dependiendo del movimiento de las patas que ya están en el suelo y moviéndose. Así la computadora de control no necesita calcular el preciso momento cuando una pata va a tocar la tierra o los detalles del movimiento requerido al momento el contacto para obtener un suave movimiento hacia adelante.

La articulación de la rodilla de cada pata es impulsada por un actuador hidráulico separado montado horizontalmente a lo largo de la pata. Este actuador puede ser activado mientras la pata está levantada para colocar la pata de lado para el siguiente paso. Cuando la pata está sobre la tierra, la articulación de la rodilla debe moverse ligeramente para seguir la trayectoria circular de la pata sobre la tierra. Esto es un movimiento complejo, pero esto no requiere la acción de la computadora; en cambio una conexión paralela simple de los actuadores de la articulación de la rodilla permite a todas las rodillas ajustarse al movimiento promedio del vehículo. Una bomba hidráulica adicional proporciona al sistema la posibilidad de forzar un movimiento colectivo de lado de todas las articulaciones de las rodillas, haciendo a la máquina arrastrarse de lado como un cangrejo.

El conductor humano de la máquina tiene tres clases de control. Primero, él puede regular la cantidad del aceite que fluye en el sistema porque puede controlar el desplazamiento de las bombas hidráulicas. Hay bombas separadas para cada pata en los lados izquierdo y derecho de modo que el conductor pueda conducir haciendo que la máquina se arrastre más rápido sobre un lado que sobre el otro. Los ajustes de los controles de dirección son reportados al microprocesador de modo que este pueda colocar las patas correctamente. Por ejemplo, si la máquina gira a la derecha, las patas delanteras deben ser transferidas a la derecha y las posteriores a la izquierda para acomodarse al giro. Si la máquina camina hacia atrás, lo cual se logra invirtiendo el flujo del aceite, las patas deben ser transferidas hacia atrás con cada paso en lugar ir a adelante. Como cada pata es levantada de la tierra la computadora de control escoge una posición objetivo basándose en la cantidad y la dirección de flujo del aceite actual puesto por el conductor. Cuando una pata de apoyo se acerca al límite de su viaje, la computadora de control inicia su levantamiento y transferencia a un nuevo punto de apoyo. Si cualquier pata de apoyo alcanza el límite de su viaje, el microprocesador detiene el vehículo hasta que aquella pata pueda ser levantada de la tierra y transferida a un nuevo punto de apoyo donde esta tenga espacio para moverse.

La segunda clase de control humano del vehículo establece la actitud y separación del suelo de la maquina. El conductor puede establecer un control que cambia la posición de apoyo vertical para las patas izquierdas y derechas para hacer que el vehículo rote a la izquierda o a la derecha. Asimismo, él puede indicar diferentes posiciones de apoyo verticales para las patas delanteras y traseras para que la maquina pueda inclinarse hacia atrás o hacia adelante. Otro control le permite indicar que las posiciones de apoyo verticales para las seis patas deberán ser bajadas o levantadas colectivamente para cambiar la separación con el piso.

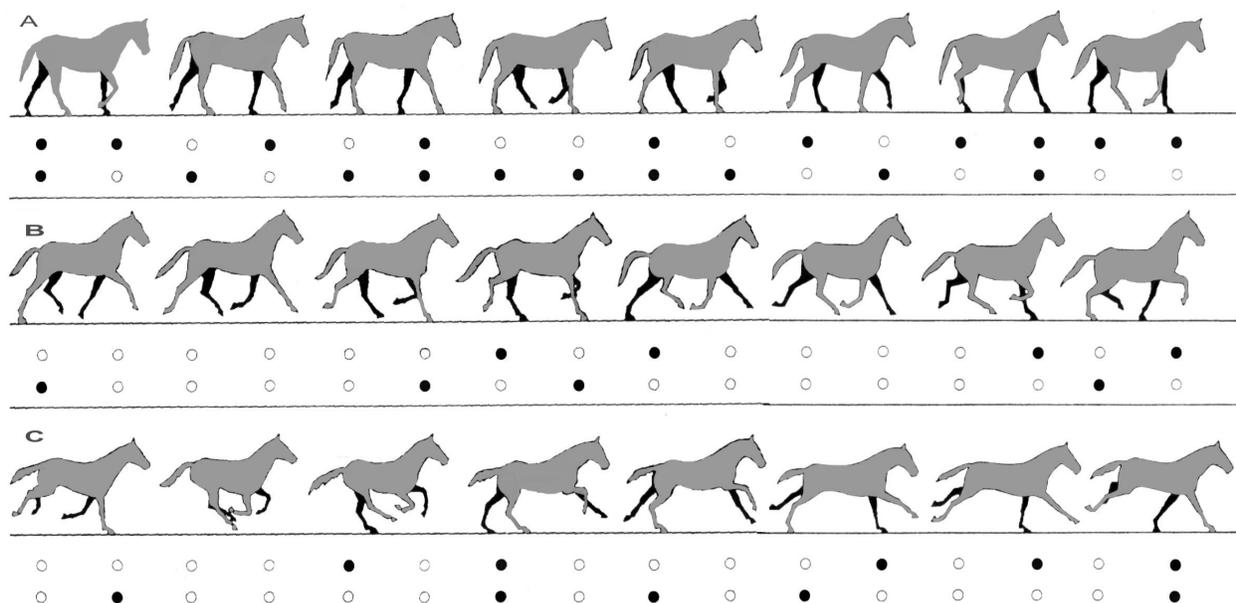


Figura 2.15: Secuencia de pasos del caballo. A: caminar; B: trote; C: galope.

La tercera clase de control humano realizará la cuidadosa colocación de las patas para la operación sobre terreno áspero. Un vehículo que camina construido hace algunos años por Ralph Mosher en la Empresa General Electric, dependió exclusivamente del control manual de colocación de la pata y era por lo tanto bastante fatigoso para conducir. Se cree que la selección de la manera de caminar también puede ser importante, pero aún no se tiene bastante experiencia para saber si podría ser hecha automáticamente o si serían necesarias entradas humanas.

Otro asunto de atención es el caminar y correr donde el equilibrio juega un papel importante. Hasta hace un siglo la gente todavía discutía si realmente un caballo que trotaba tenía todas sus patas sobre de la tierra simultáneamente. La fotografía stop-motion de Eadweard Muybridge inicio el debate, mostrando que un caballo realmente deja la tierra completamente durante un trotar. Una persona que corre también hace eso, de igual manera lo hace el perro, el guepardo y desde luego el canguro. Tales animales no sólo caminan, lo cual requiere el equilibrio dinámico, también corren, empleando movimientos balísticos con eficacia para aumentar su velocidad de viaje.

Hay dos diferencias fundamentales entre un vehículo que se arrastra y que esta estáticamente equilibrado y uno que esta dinámicamente equilibrado. La primera diferencia está en la definición de estabilidad. Un vehículo que se arrastra es estable si sus patas proporcionan al menos un trípede de apoyo en cualquier momento para asegurar que este no se voltee; un vehículo que corre o camina dinámicamente equilibrado puede permitir inclinarse en breves intervalos. Los movimientos de las patas y el cuerpo aseguran que un

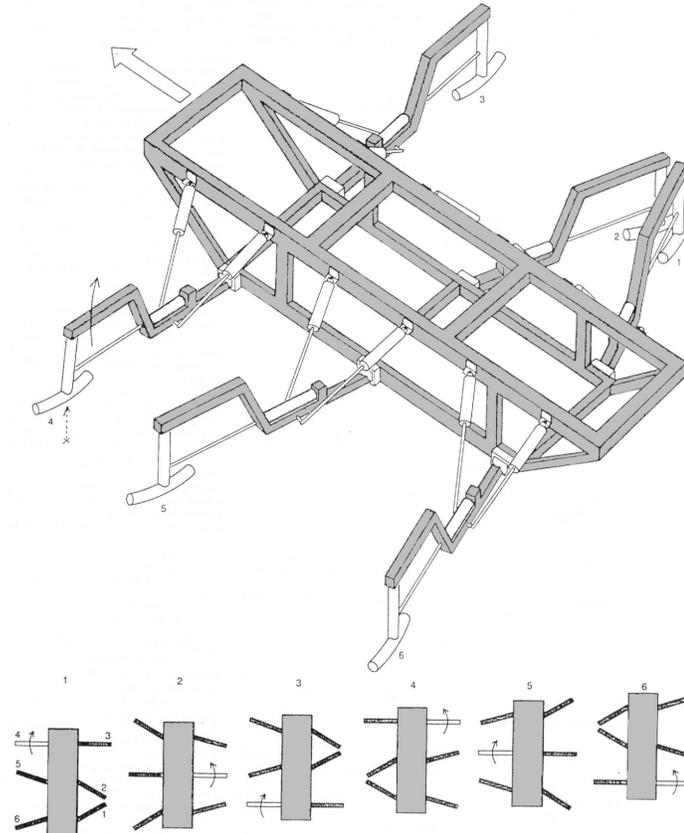


Figura 2.16: Máquina caminadora de seis patas.

intervalo de inclinación simple es breve y que una base adecuada de apoyo se mantiene en promedio. Por ejemplo, un hombre que corre toca el piso alternadamente con sus dos piernas, proporcionando una base de soporte para su cuerpo sólo el tiempo justo.

La segunda diferencia entre el equilibrio estático y dinámico está en la consideración de velocidad y momento. El equilibrio estático asume que la configuración de las patas de apoyo y la posición del centro de gravedad son adecuados para especificar la estabilidad; esto ignora el movimiento del vehículo. Tales cálculos estáticos son no siempre suficientes. Por ejemplo, un vehículo de rápido movimiento podría inclinarse hacia adelante si este se parara de repente con el centro de gravedad muy cerca a las patas delanteras. Para entender la gran movilidad de los sistemas que caminan y corren, se debe relacionar ambos, la definición de estabilidad y la cuenta para la velocidad en calcular el equilibrio.

Esto es estudiar el problema del equilibrio en su forma más simple que Raibert y sus compañeros de trabajo en la Universidad de Carnegie-Mellon han construido una máquina que salta sobre su sola pata y corre como un canguro, en una serie de saltos. El dispositivo puede tomarse como un palo de pogo controlado por la computadora. Raibert

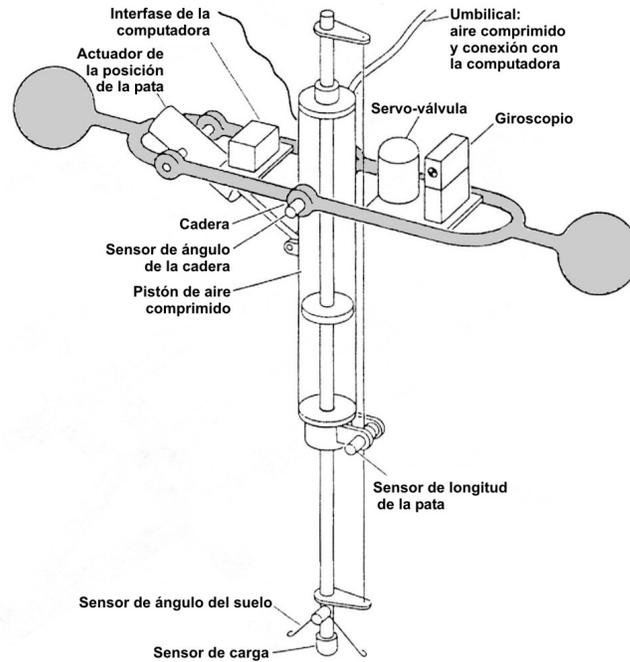


Figura 2.17: Máquina de locomoción por saltos en un solo plano dotada de una pata.

fue motivado por la notable simplicidad del algoritmo de equilibrio. En su forma actual la máquina está limitada a moverse en un solo plano, de manera que solo puede voltearse en una sola dirección.

La máquina tiene dos partes principales: un cuerpo y una pata. El cuerpo proporciona la estructura principal y lleva válvulas, sensores y electrónicos. La pata es un mecanismo simple que no sólo cambia la longitud a lo largo de su eje, sino que también pivotea con respecto al cuerpo en una articulación llamada cadera. La pata rebota sobre un resorte con tensión ajustable, muy parecido a una pierna humana con sus músculos y tendones elásticos. El resorte es un cilindro de aire en el cual las presiones son controladas con sensores y válvulas. Al final de la pata hay un pequeño pie.

El movimiento de pivoteo de la pata es controlado por un segundo actuador manejado por aire que aplica torques en la articulación de la cadera. Una simple válvula de encendido-apagado controla la pata elástica, pero el control del ángulo del pivote de la pata requiere un servovalvula proporcional, es decir un dispositivo de retroalimentación que responde en proporción a la fuerza de la señal que esta recibe. Como el momento de inercia de la pata es un 10 % menos que el momento de inercia del cuerpo, la pata puede pivotear durante el vuelo sin impartir mucho movimiento al cuerpo. La inclinación del cuerpo es medida por un giroscopio, permitiendo a la computadora de control mantener el cuerpo en una actitud de nivel. Otros sensores miden el ángulo de la cadera, la longitud de la pata, la presión del aire en la pata elástica, el ángulo entre la pata y la tierra, y la

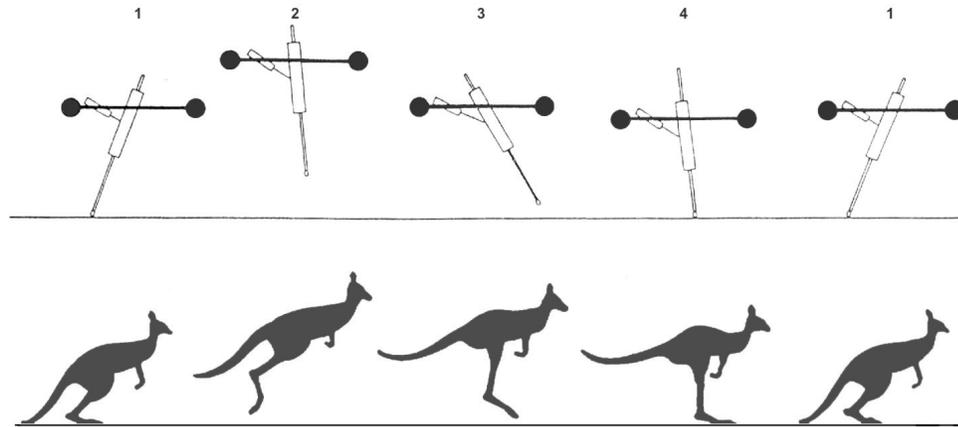


Figura 2.18: Máquina de locomoción por saltos en movimiento.

fuerza del contacto de la pata con la tierra.

Tres lazos separados del servo-control regulan la máquina. Un lazo controla el movimiento vertical, otro el equilibrio y otro la actitud de cuerpo. Cada lazo está sincronizado con el movimiento del salto básico.

El primer lazo controla la altura del movimiento del salto. Este añade o quita energía del movimiento para alcanzar la altura correcta del salto y aporta la energía perdida durante cada salto. El control de altura hace ambas tareas, añadiendo o liberando aire periódicamente del cilindro principal para ajustar la tensión eficaz de la salida del aire. En otras palabras, el control de altura gobierna la temporización y la magnitud del poder entregado al mecanismo controlador del salto, alcanzando así la altura deseada del salto. Cuando se ha alcanzado una altura de salto deseada, la mayoría de la energía necesitada para el siguiente salto es recuperada del resorte, en el cual fue almacenada durante el aterrizaje anterior. Mientras los movimientos del salto son relativamente estables, la tarea de administrar la energía del salto de la máquina no es particularmente difícil.

El segundo lazo del servo-control provee el equilibrio de la máquina, colocando la pata mientras que la máquina está en vuelo de manera que el siguiente aterrizaje es hecho en una postura equilibrada. El cálculo de la posición correcta de la pata considera la velocidad de avance del vehículo y la inclinación del cuerpo. Un solo algoritmo de la computadora para el equilibrio trabaja cuando la máquina está saltando en un lugar, acelerando para correr, corriendo a una velocidad constante, saltando sobre objetos y retardándose para un salto inmóvil.

Cuando la máquina salta en un lugar, la pata y el pie son movidos pequeñas distancias para compensar perturbaciones externas y los errores de saltos anteriores. Cuando la máquina debe empezar a correr, a la derecha, el pie es movido primero a la izquierda

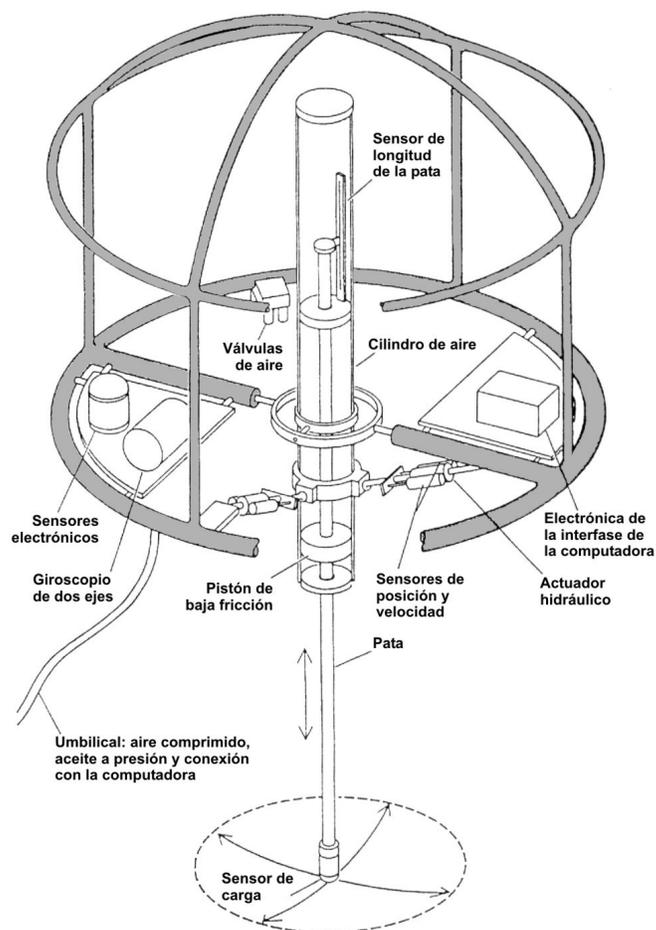


Figura 2.19: Máquina avanzada de locomoción por saltos.

para desequilibrar el vehículo de modo que empiece a inclinarse en la dirección deseada. La carrera estable es como saltar en un lugar excepto que los ajustes de equilibrio complementan los movimientos grandes amplios de la pata, los cuales son determinados por la velocidad de viaje. Detenerse se parece mucho al inicio pero la máquina es inclinada en la dirección opuesta a la dirección del movimiento.

El tercer lazo de servo-control estabiliza la actitud del cuerpo para mantenerlo todo derecho. Esto proporciona torques entre la pata y el cuerpo mientras el pie está sobre la tierra para alcanzar la actitud deseada durante el siguiente vuelo. La eficacia de este servo depende de la buena tracción entre el pie y la tierra. El servo de actitud que funciona cuando el pie está sobre la tierra, comparte el mecanismo controlador de cadera empleado por el servo de equilibrio que funciona mientras la máquina está en el vuelo. Ciertos detalles sutiles del cambio de un modo de control a otro, son asociados con el descubrimiento del principio y el fin de cada vuelo. El mecanismo de rotación debe estar inactivo durante estos acontecimientos a no ser que el pie resbale sobre la tierra.

Cuando un animal corre, su pata se balancea hacia adelante y hacia atrás a través de ángulos grandes para proporcionar el equilibrio y conducir hacia adelante. Se encontró que tales movimientos de oscilación de la pata no tienen que ser programados explícitamente para una máquina sino que son un resultado natural de las interacciones entre los controladores del equilibrio y la actitud. Suponga un vehículo con velocidad de viaje constante horizontal y aterriza con su cuerpo todo derecho. ¿Qué debe hacer el controlador de actitud durante la fase de postura para mantener la actitud derecha? Debe asegurarse que ningún torque sea generado en la cadera. Ya que el pie es fijado en la tierra durante la postura, la pata debe barrerse atrás a través de un ángulo para garantizar que el torque sobre la cadera será cero mientras el cuerpo avanza.

Por otra parte, ¿qué debe hacer el servo del equilibrio durante vuelo para mantener el equilibrio? Puesto que el pie debe pasar tanto tiempo delante del centro de gravedad del vehículo como detrás de él, la velocidad de viaje y la duración de la postura dictan una posición delantera del pie para el aterrizaje que colocará el pie en un punto conveniente para el siguiente periodo de postura. Así durante cada vuelo la pata debe balancearse hacia adelante bajo dirección del servo de equilibrio, y durante cada postura debe barrerse hacia atrás bajo el control del servo de actitud; los movimientos de barrido delanteros y traseros requeridos para correr se obtienen automáticamente de la interacción de los lazos del servo-control para el equilibrio y la actitud.

Posteriormente se construyó una versión de la máquina que se balancea en tres dimensiones y por lo tanto puede moverse alrededor en una superficie abierta. Se escribió y probó una simulación de computadora del movimiento de tal máquina y se encontró que el control en tres dimensiones se puede analizar en los mismos tres lazos del servo-control descritos.

La fabricación de esta máquina con una pata fue enormemente ayudada por un pensamiento de que el correr puede ser mejor comprendido dividiéndolo en las tres partes que se trataron: el control de altura, el control de equilibrio y el control de actitud. Dividiendo el control en estas tres partes, se ha hecho mucho más fácil de entender el comportamiento complejo de las patas durante el correr y el caminar. Esta idea ha conducido a un sistema de control bastante simple que hace a una máquina de una sola pata equilibrarse y correr.

Se contempló también la construcción de máquinas de movimiento dinámico con más de una pata. Raibert y Sutherland pensaban que la manera correcta de concebir tales máquinas es enfocándose primero en sus movimientos de arriba y abajo y el comportamiento del equilibrio, posponiendo las complicaciones dadas por el movimiento hacia adelante. La noción de que saltar es la actividad principal era natural para la máquina con una sola pata aparte de proporcionar un modo eficaz de pensar en su comportamiento, pero parece menos natural para máquinas con varias patas. Quizás parece menos natural porque estamos acostumbrados a ver animales que corren y queremos entender todo su comportamiento de repente.

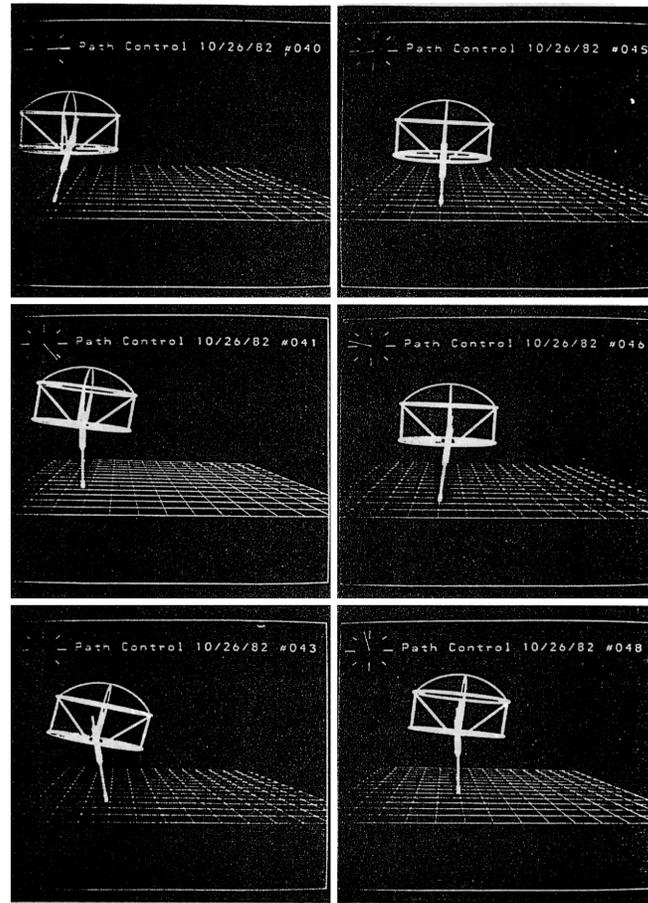


Figura 2.20: Simulación de la maquina avanzada de locomoción por saltos.

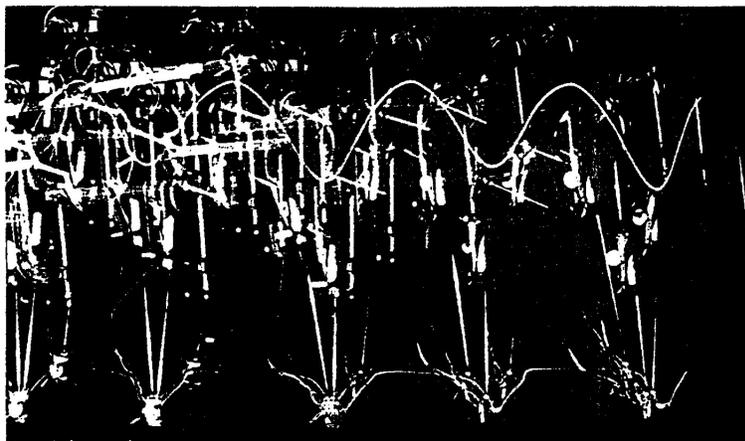


Figura 2.21: Simulación de la maquina avanzada de locomoción por saltos.

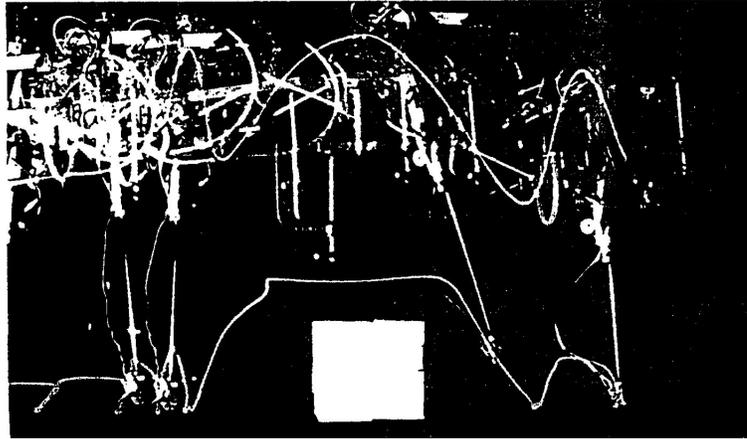


Figura 2.22: Simulación de la maquina avanzada de locomoción por saltos.

Una máquina de cuatro patas que está saltando en un lugar podría usar cualquiera de las varias secuencias de actividad de la pata. El patrón más simple debería ser el de saltar simultáneamente sobre las cuatro patas. No es difícil de imaginar que los tres mismos servomecanismos que controlan la máquina con una sola pata que salta podrían controlar el movimiento de un vehículo de cuatro patas en este modo. De hecho, el lazo de control de actitud que mantiene el cuerpo todo derecho podría ser sustancialmente más simple debido a la más amplia base de apoyo. Cuando la máquina se mueve hacia delante, las patas se deberían balancear juntas en un patrón de movimiento que fácilmente podría ser generado por los mismos mecanismos de control como aquellos que sirven a la máquina con una sola pata.

Otro posible tipo de paso para una máquina de cuatro patas saltando en un lugar es alternando las patas en pares opuestos diagonales. Otra vez esto no extiende demasiado la imaginación para ver como uno podría separar el control de tal vehículo en el control de altura, el control de equilibrio y el control de actitud de cuerpo. El control de altura añadiría la energía al movimiento del salto para mantener la altura en el nivel deseado. El control de equilibrio posicionaría las dos patas levantadas de tal manera que mantuvieran el equilibrio. El control de actitud del cuerpo aplicaría apropiadamente el torque al par de patas sobre la tierra. El control de la actitud y el equilibrio alternarían en el uso de los mismos actuadores de la pata, así como lo hacen en la máquina con una sola pata. Además, tal como se ha visto en aquella máquina, el movimiento hacia adelante podría ser fácilmente acomodado moviendo cada pata levantada a una posición adelantada escogida para hacer la fuerza de equilibrio promedio de la pata cero durante el siguiente período de postura. El movimiento que resulta es un trote del tipo común entre animales de cuatro patas.

Otros dos tipos de paso pueden ser entendidos similarmente separando el control de cada pata en vertical, equilibrio y componentes de la actitud del cuerpo. En el galope las

patas traseras pisan ligeramente más pronto que las delanteras. La actitud de cuerpo es permitida para cambiarse durante el vuelo de modo que una actitud de nariz arriba (nose-up) sea vista como si las patas traseras las piernas de reverso aterrizaran y una actitud de nariz abajo (nose-down) como si las patas delanteras se despegaran del suelo. El salto es una variación del galope en el cual las patas delanteras funcionan casi en armonía y así como las patas traseras, pero las acciones delanteras y traseras son igualmente espaciadas en el tiempo. Es este tipo de salto el que permite al guepardo llegar a velocidades de más de 60 millas por hora.

El movimiento eficiente sobre la tierra requiere que poca energía sea perdida durante cada movimiento de la máquina. Ya se mencionó como los movimientos verticales de las patas pueden ser hechos eficientes reponiendo la energía en elementos elásticos. ¿Qué hay acerca de los movimiento delanteros y traseros?

A altas velocidades sobre la tierra las patas de un vehículo tendrán que moverse hacia adelante y hacia atrás bastante rápido. La mayor parte de la energía gastada por un animal que corre se va en generar estos movimientos de la pata. En la máquina de una sola pata estos mecanismos son provistos por un servomecanismo convencional proporcional. En tal sistema la energía cinética de la pata mientras esta se balancea es completamente perdida mientras que la pata es traída para descansar momentáneamente en cada ángulo extremo. El movimiento por saltos, es obtenido por un sistema autoresonante constituido por el salto de una pata y la masa de la máquina, de modo que el servo de altura solo necesita añadir o restar una pequeña cantidad de energía para mantener la altura del salto. Es obvio que si una máquina con varias patas debe ser eficiente así como rápida, esta tendrá que incorporar una especie de sistema autoresonante para el movimiento delantero y trasero de la pata. Se podría diseñar tal mecanismo con resortes entre las patas para hacerlas oscilar como una horquilla a una frecuencia apropiada para la velocidad del rebote vertical.

Aunque se pudiera construir una máquina con cuatro patas que pueda correr con cualquiera de los pasos comunes que se han descrito, quedan muchas preguntas interesantes asociadas con el inicio y fin de tal máquina y la selección de su paso. Fácilmente se puede ver como empezar a avanzar hacia adelante si la máquina ya salta en el lugar. Lo que es mucho menos obvio, es como coordinar la transición de un inicio estático a una carrera de velocidad. Asimismo, ¿cómo y cuando debería tal máquina cambiar de un paso al otro? Un caballo corriendo cambia su dirección mientras que da vuelta, es decir, el cambia cual de las dos patas delanteras precede levemente la otra. ¿Qué cálculos computacionales deben ser hechos para realizar tales cambios de menor importancia en el patrón del movimiento de la pata? Se encuentran estos problemas fascinantes, ambos como preguntas de ingeniería, en la forma "¿Qué se debe construir?" y como preguntas científicas en la forma "¿Cómo trabajan los sistemas vivos?"

Un problema mucho más difícil es como escoger un punto de apoyo para la pata de la máquina. La función de la visión en el caminar y la correr de la gente y animales, en

particular la capacidad de escoger sitios sensibles para colocar los pies, no es muy bien entendida. Uno puede imaginarse evitando este problema teniendo a la máquina corriendo rápido sólo sobre la tierra lisa y teniendo una especie de ayuda humana para escoger un camino seguro. Probablemente será conveniente explorar la tierra adelante del vehículo para ver si hay agujeros. De todos modos, tal como un caballo galopando, corre el riesgo de pisar en un agujero de ardilla, así que se debe esperar que una máquina corriendo también puede meterse en esa clase de problema.

La movilidad de los vehículos "todo terreno" está limitada por dos factores. Primero, las continuas huellas de llantas no dejan a los vehículos de ruedas y de arrastre aprovechar los puntos discontinuos de apoyo que están disponibles para un vehículo con patas. Se puede pensar que el estado actual de los sistemas de computo es lo suficientemente avanzado para permitir la construcción de adecuados sistemas de control para vehículos con patas, y entonces la alternativa con patas para un vehículo de alta movilidad puede ser seriamente considerada. De hecho, DARPA ya esta patrocinando investigaciones sobre tales vehículos.

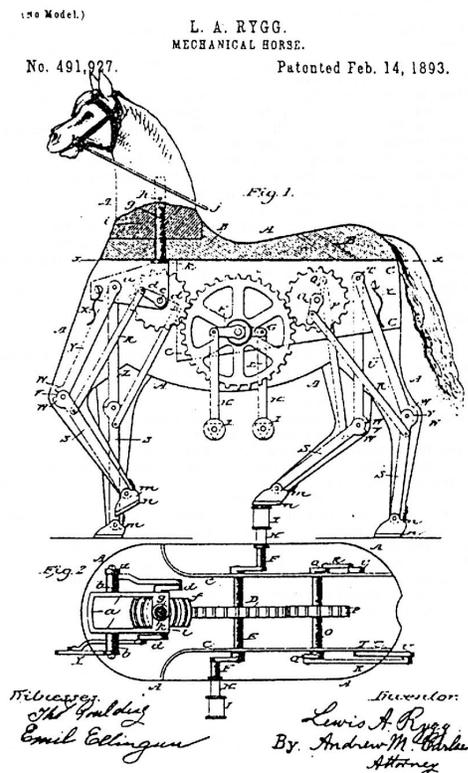


Figura 2.23: Caballo mecánico.

Una segunda fuente de movilidad es la anchura estrecha; una motocicleta puede entrar en sitios que un jeep no puede alcanzar. Vehículos estrechos con patas pueden ser contru- idos, pero ellos tendrán que equilibrarse, al menos en direcciones laterales. El dominio de equilibrio, será la llave para construir máquinas de alta movilidad que puedan caminar y

correr.

2.3. Comentarios y Referencias

El material presentado en este capítulo, básicamente es una traducción de los artículos [Referencia]. El estudio de este material ha permitido conocer los antecedentes sobre los cuales se basan los resultados obtenidos en la tesis. También es importante mencionar que fue el motivo de inspiración para diseñar, construir y controlar el insecto-robot.

Capítulo 3

Herramientas Básicas de Teoría de Control

Este capítulo presenta algunos antecedentes básicos de la teoría del control clásico que posteriormente se aplicarán a lo largo de esta tesis y servirán al lector que no está involucrado en el tema para tener un panorama general de los sistemas de control clásico.

La organización de este capítulo es la siguiente: La primera sección presenta una introducción a los sistemas de control automáticos presentando los conceptos básicos que serán de utilidad para la comprensión del capítulo. La segunda sección hace referencia a los sistemas de control clásicos en tiempo continuo generales. La tercera sección analiza los sistemas de control digitales comenzando con un repaso de los sistemas en tiempo discreto. La cuarta sección presenta un método de sintonización para controladores PID clásicos y al final del capítulo se presentaran ejemplos de diseño de controladores que serán de ayuda en capítulos posteriores.

3.1. Introducción

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su extrema importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robots, el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por ejemplo, el control automático es esencial en el control numérico de las máquinas-herramientas en las industrias de manufactura y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso. [4] [5]

Un controlador automático compara el valor real de la salida con la entrada de referencia (valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina *acción de control*.

Muchos controladores automáticos industriales son electrónicos, hidráulicos, neumáticos, o alguna combinación de estos. En este capítulo se presentara los principios de controladores generales.

3.2. Sistemas de Control en Tiempo Continuo

En esta sección se analizaran los detalles de las acciones básicas de control que utilizan los controladores analógicos industriales.

La Figura 3.1 muestra un diagrama a bloques de un sistema de control industrial típico. El controlador detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida del controlador automático se alimenta a un actuador, tal como un motor o una válvula neumáticos, un motor hidráulico, o un motor eléctrico (el actuador es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia).

El sensor o elemento de medición, es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, tal como un desplazamiento, una presión, o un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Este elemento está en la trayectoria de retroalimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de retroalimentación del sensor o del elemento de medición.

3.2.1. Controlador Proporcional

Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t) = r(t) - y(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

o bien, en cantidades transformadas por método de Laplace,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3.2)$$

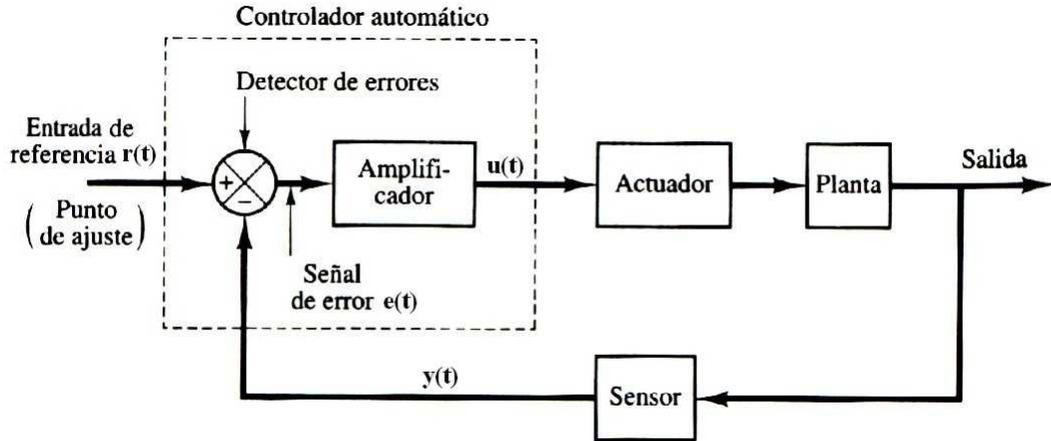


Figura 3.1: Diagrama de bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición).

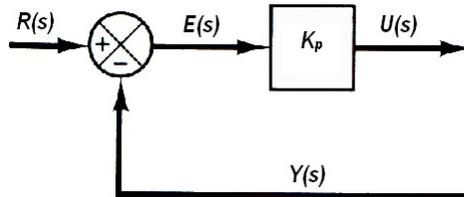


Figura 3.2: Diagrama de bloques de un controlador proporcional.

en donde K_p se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable. En la Figura 3.2 se presenta un diagrama a bloques de tal controlador.

3.2.2. Controlador Integral

En un controlador con acción de control integral, el valor de salida del controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$. Es decir

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (3.3)$$

o bien

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

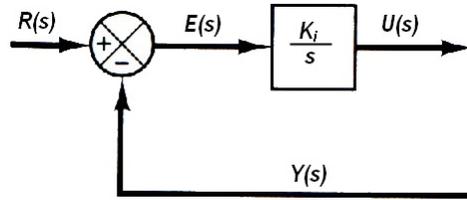


Figura 3.3: Diagrama de bloques de un controlador integral.

en donde K_i es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (3.5)$$

Si se duplica el valor de $e(t)$, el valor de $u(t)$ varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de $u(t)$ permanece estacionario. En ocasiones, la acción de control integral se denomina control de reajuste (*reset*). La Figura 3.3 muestra el diagrama a bloques de tal controlador.

3.2.3. Controlador Proporcional-Integral

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3.6)$$

o la función de transferencia del controlador es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.7)$$

en donde K_p es la ganancia proporcional y T_i , se denomina tiempo integral. Tanto K_p como T_i son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral y proporcional de la acción de control, el inverso del tiempo integral T_i se denomina *velocidad de reajuste*. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de repeticiones por minuto. La Figura 3.4(a) muestra el diagrama a bloques de un controlador proporcional más integral. Si la señal de error $e(t)$ es una función escalón unitario, como en la Figura 3.4(b) la salida del controlador $u(t)$ se convierte en lo que se muestra en la Figura 3.4(c).

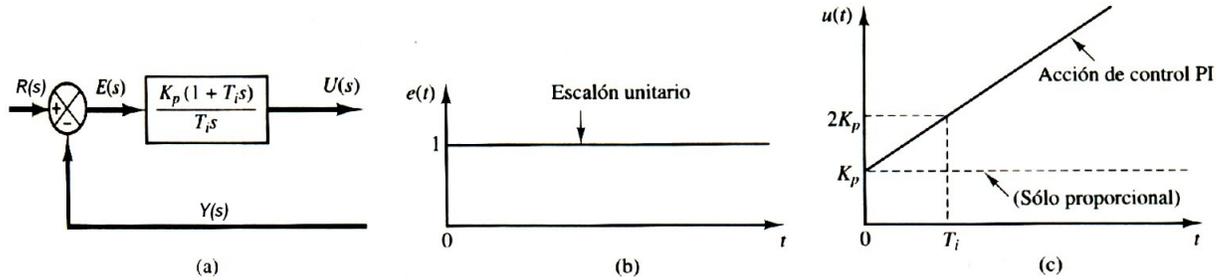


Figura 3.4: (a) Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada escalón unitario y la salida del controlador.

3.2.4. Controlador Proporcional-Derivativo

La acción de control de un controlador proporcional-derivativo (PD) se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.8)$$

y la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (3.9)$$

en donde K_p es la ganancia proporcional y T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Tanto K_p como T_d son ajustables. La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. La Figura 3.5(a) muestra el diagrama a bloques de un controlador proporcional-derivativo. Si la señal de error $e(t)$ es una función rampa unitaria como se aprecia en la Figura 3.5(b), la salida del controlador $u(t)$ se convierte en la que se muestra en la Figura 3.5(c). La acción de control derivativa tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control derivativa nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido.

Aunque la acción de control derivativa tiene la ventaja de ser previsión tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

Observe que la acción de control derivativa no se usa nunca sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios.

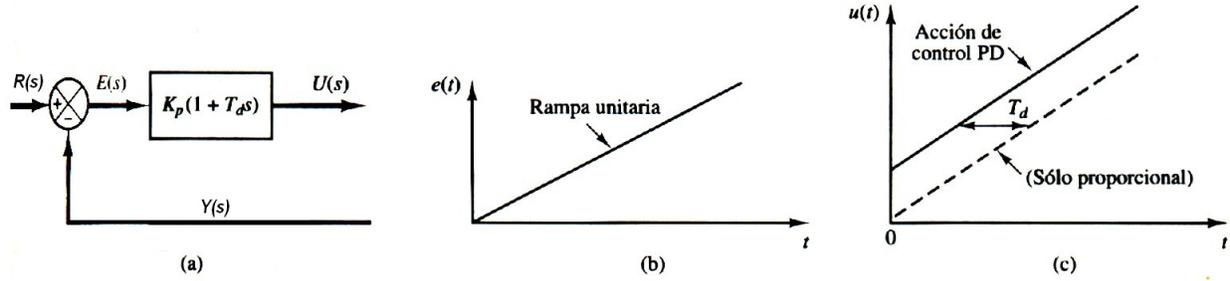


Figura 3.5: (a) Diagrama de bloques de un controlador proporcional-derivativo; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.

3.2.5. Controlador Proporcional-Integral-Derivarivo

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.10)$$

o la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.11)$$

en donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. El diagrama a bloques de un controlador proporcional-integral-derivativa aparece en la Figura 3.6(a), si $e(t)$ es una función rampa unitaria como la que se observa en la Figura 3.6(b), la salida del controlador $u(t)$ se observa en la Figura 3.6(c).

3.3. Sistemas de Control en Tiempo Discreto

En años recientes se ha incrementado el uso de controladores digitales en sistemas de control. Los controladores digitales se utilizan para alcanzar el desempeño óptimo, por ejemplo, en la forma de productividad máxima, beneficio máximo, costo mínimo o la utilización mínima de energía.

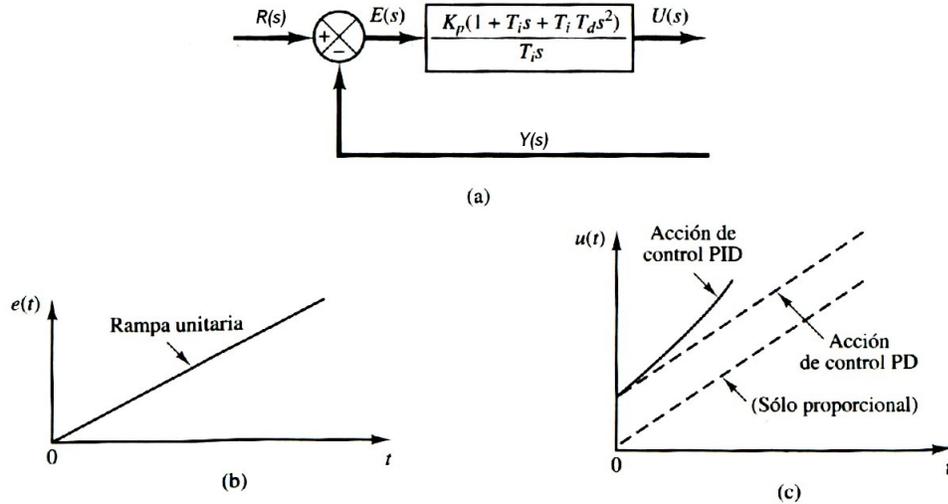


Figura 3.6: (a) Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral-derivativo; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.

Recientemente, la aplicación de control por computadora ha hecho posible el movimiento “inteligente” en robots industriales, la optimización de economía de combustible en automóviles y el refinamiento en la operación de enseres y máquinas de uso doméstico.

La tendencia actual de controlar los sistemas dinámicos en forma digital en lugar de analógico, se debe principalmente a la disponibilidad de computadoras digitales de bajo costo y a las ventajas de trabajar con señales digitales en lugar de trabajar con señales en tiempo continuo.

3.3.1. Sistemas Discretos

Una señal en tiempo continuo es aquella que se define sobre un intervalo de tiempo continuo. La amplitud puede tener un intervalo continuo de valores o solamente un número finito de valores distintos. El proceso de representar una variable por medio de un conjunto de valores distintos se denomina *cuantificación* y los valores distintos resultantes se denominan *valores cuantificados*. La variable cuantificada solamente cambia en un conjunto finito de valores distintos.

Una señal de tiempo discreto es una señal definida solo en valores discretos de tiempo (esto es, aquellos en los que la variable independiente t está cuantificada). En una señal en tiempo discreto si la amplitud puede adoptar valores en un intervalo continuo entonces se denomina *señal de datos muestreados*. Una señal de datos muestreados se puede generar muestreando una señal analógica en valores discretos de tiempo. Esta es una señal de pulsos modulada en amplitud.

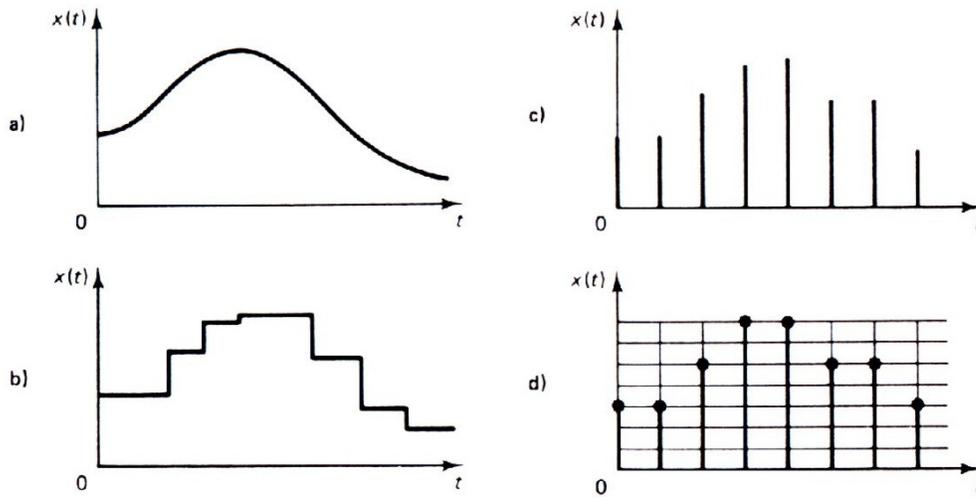


Figura 3.7: a) Señal analógica en tiempo continuo; b) Señal cuantificada en tiempo continuo; c) Señal de datos muestreados; d) Señal digital.

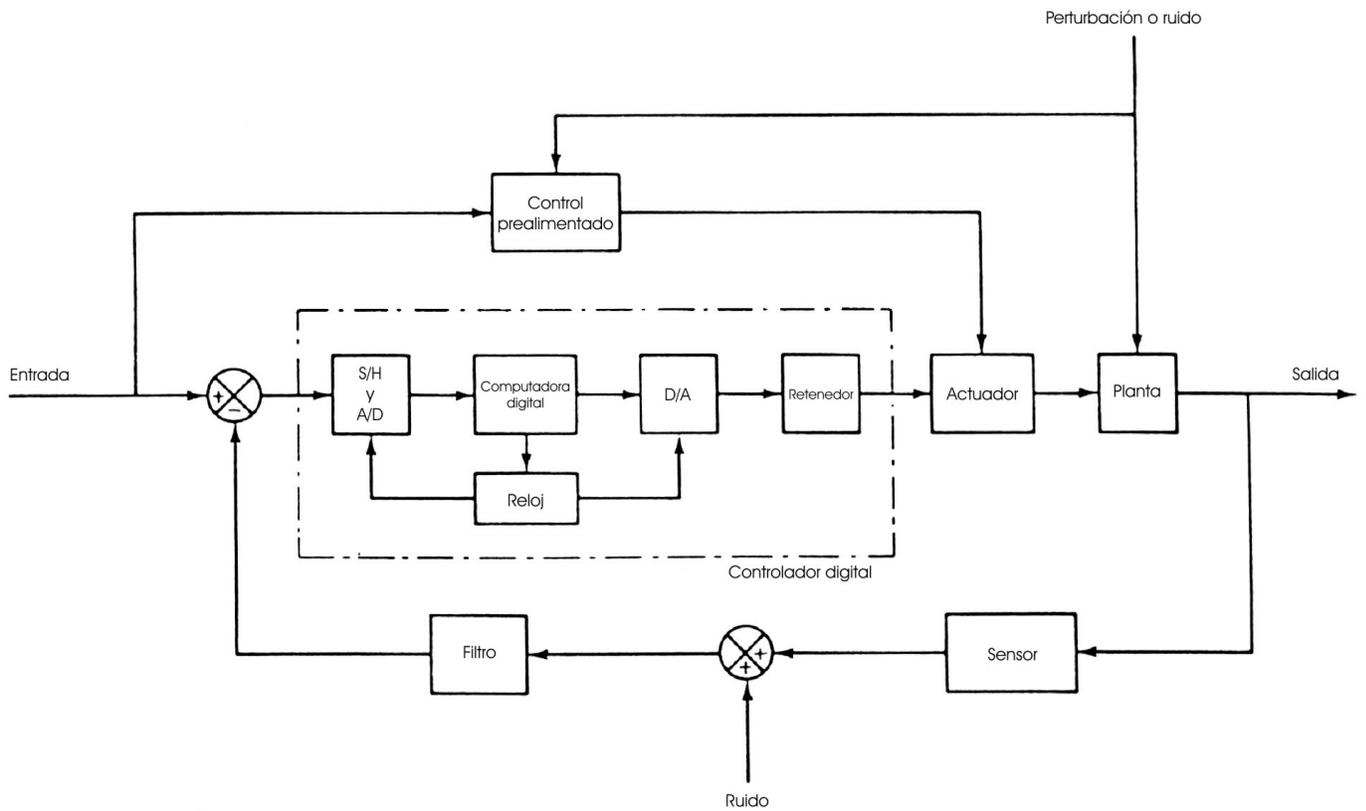


Figura 3.8: Diagrama de bloques de un sistema de control digital.

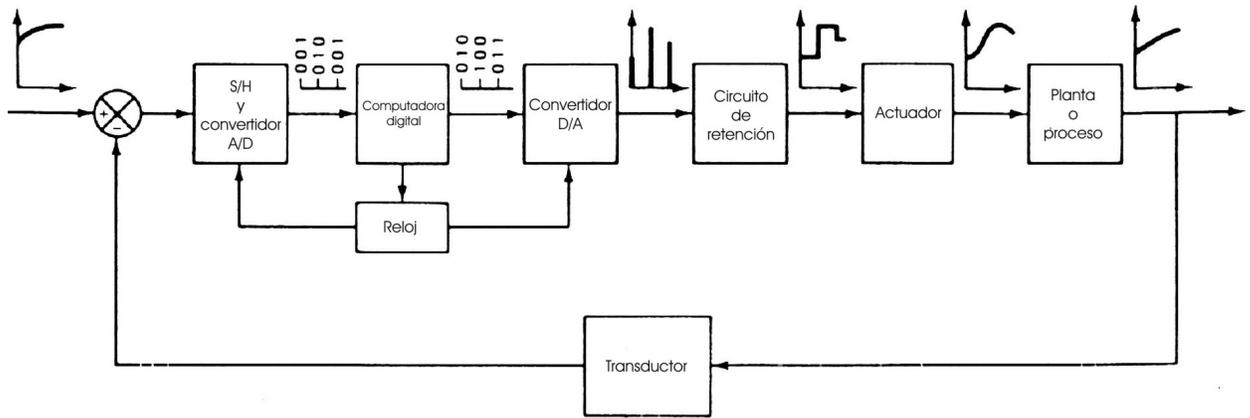


Figura 3.9: Diagrama de bloques de un sistema de control digital que muestra las señales en forma binaria o gráfica.

En la Figura 3.8 se muestra un diagrama a bloques de un sistema de control digital que representa la configuración del esquema de control básico. En el sistema se incluye el control retroalimentado y el control prealimentado. En el diseño del sistema de control, se deberá observar que la “bondad” del sistema de control depende de las circunstancias individuales. Se requiere elegir un índice de desempeño apropiado para un caso dado y diseñar un controlador de manera que optimice el índice de desempeño elegido.

La figura muestra un diagrama de bloques de un sistema de control digital. Los elementos básicos del sistema se muestran mediante los bloques. La operación del controlador se maneja por el reloj. En dicho sistema de control digital en algunos puntos del sistema pasan señales de amplitud variable ya sea en tiempo continuo o discreto, mientras que otros pasan señales codificadas en forma numérica.

La salida de la planta es una señal en tiempo continuo. La señal de error se convierte a forma digital mediante el circuito de muestreo y retención y el convertidor analógico-digital. La conversión se hace en el tiempo de muestreo. La computadora digital procesa las secuencias de números por medio de un número y produce nuevas secuencias de números. En cada instante de muestreo se debe convertir un número codificado (en general un número binario) en una señal física de control, la cual normalmente es una señal en tiempo continuo. El convertidor digital-analógico y el circuito de retención convierte la secuencia de números a una señal continua por secciones. El reloj en tiempo real de la computadora sincroniza los eventos. La salida del circuito de retención se alimenta la planta, ya sea de manera directa o a través de un actuador.

3.3.2. Controlador PID Digital

El esquema de control PID ha sido usado de manera exitosa en muchos sistemas de control industrial por más de medio siglo. Como se revisó en la Sección 3.2, el principio básico del esquema de control PID es que actúa sobre la variable a ser manipulada a través de una apropiada combinación de las tres acciones de control: acción de control proporcional (donde la acción de control es proporcional a la señal de error actuante, la cual es la diferencia de la entrada y la señal de retroalimentación); la acción de control integral (donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante) y la acción de control derivativa (donde la acción de control es proporcional a la derivada a la señal de error actuante).

En situaciones donde muchas plantas se controlan directamente mediante una sola computadora digital (como un esquema de control en el que se controlan desde unos cuantos lazos hasta cientos mediante un solo controlador digital) la mayoría de los lazos de control se pueden manipular mediante esquemas de control PID.

Reescribiendo la acción de control PID en controladores analógicos esta dada por

$$m(t) = K \left[e(t) + 1 \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.12)$$

donde $e(t)$ es la entrada al controlador (señal de error actuante), $m(t)$ es la salida del controlador (la señal manipulada) $k(t)$ es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral (o tiempo de reajuste) y T_d es el tiempo derivativo (o el tiempo de adelanto).

Para obtener la función transferencia pulso del control PID digital, se puede discretizar la ecuación Al aproximar el termino integral mediante la sumatoria trapezoidal y el termino derivativo mediante la diferencia de dos puntos, se obtiene (referencia), para un periodo de muestreo T .

$$m(kT) = K \left[e(kT) + \frac{T}{T_i} \left(\frac{e(0)+e(T)}{2} + \frac{e(T)+e(2T)}{2} + \dots + \frac{e((k-1)T)+e(kT)}{2} \right) + T_d \frac{e(kT)-e((k-1)T)}{T} \right] \quad (3.13)$$

o

$$m(kT) = K \left[e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e((k-1)T)] \right] \quad (3.14)$$

se define

$$\frac{e((h-1)T)+e(hT)}{2} = f(hT), \quad f(0) = 0 \quad (3.15)$$

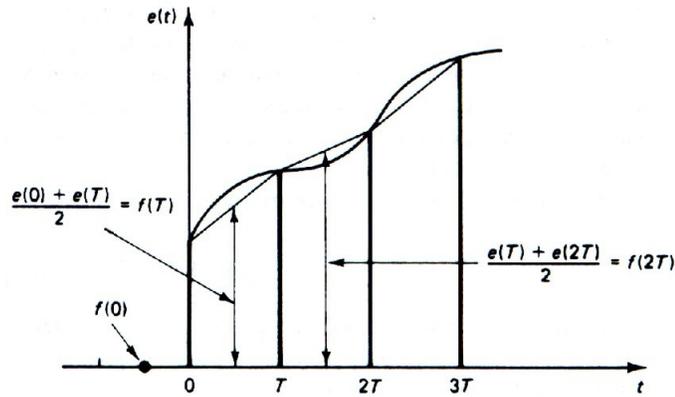


Figura 3.10: Diagrama que muestra la función $f(hT)$.

entonces se muestra la función

$$\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T)e(hT)+)}{2} = \sum_{h=1}^k f(hT) \quad (3.16)$$

Al tomar la transformada z de esta ultima ecuación, se obtiene

$$Z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T)e(hT)+)}{2} \right] = Z \left[\sum_{h=1}^k f(hT) \right] = \frac{1}{1-z^{-1}} [F(z) - f(0)] \quad (3.17)$$

$$= \frac{1}{1-z^{-1}} F(z) \quad (3.18)$$

nótese que

$$F(z) = Z[f(hT)] = \frac{1+z^{-1}}{2} E(z) \quad (3.19)$$

por lo tanto

$$Z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T)e(hT)+)}{2} \right] = \frac{1+z^{-1}}{2(1-z^{-1})} E(z) \quad (3.20)$$

Entonces la transformada z de la ecuación 3.14 da como resultado

$$M(z) = K \left[1 + \frac{T}{2T_i} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z) \quad (3.21)$$

Esta última ecuación se puede reescribir como

$$M(z) = K \left[1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} + \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z) \quad (3.22)$$

$$= \left[K_P + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1}) \right] E(z) \quad (3.23)$$

donde

$$K_P = K \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_I}{2} = \textit{ganancia proporcional} \quad (3.24)$$

$$K_I = \frac{KT}{T_i} = \textit{ganancia integral} \quad (3.25)$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T} = \textit{ganancia derivativa} \quad (3.26)$$

Nótese que la ganancia proporcional K_P para un controlador PID digital es más pequeña que la ganancia K para el controlador PID analógico por un factor de $K_i/2$

La función de transferencia pulso del controlador PID se convierte en

$$G_D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K_P + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1}) \quad (3.27)$$

La función de transferencia pulso del controlador PID digital dada por la ecuación (3.27) se conoce comúnmente como *forma posicional* del esquema de control PID.

La otra forma por lo regular utilizada en el esquema de control PID digital es el esquema conocido como *forma de velocidad*. Para obtener la ecuación de forma de velocidad, se considera la diferencia hacia atrás en $m(kT)$, esto es, la diferencia entre $m(kT)$ y $m((k-1)T)$. Con algunas suposiciones y manipuladores, se obtiene

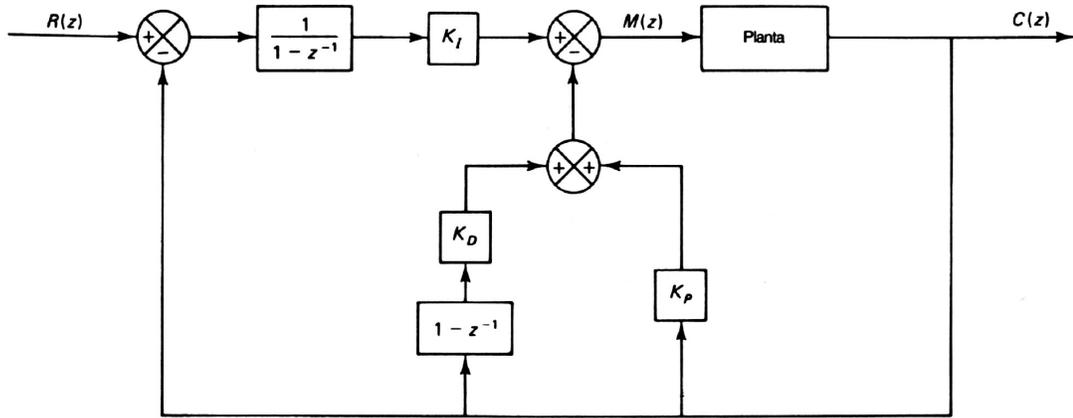


Figura 3.11: Diagrama de bloques de la realización del esquema de control PID en la forma de velocidad.

$$M(z) = -K_P C(z) + K_I \frac{R(z) - C(z)}{1 - z^{-1}} - K_D (1 - z^{-1}) C(z) \quad (3.28)$$

La ecuación (3.28) da el esquema de control PID en la forma de velocidad. En la Figura 3.11 se muestra el diagrama a bloques de la realización de un esquema de control PID digital en la forma de velocidad. Note que en la ecuación (3.28) solo el término del control integral incluye la entrada $R(z)$. Por lo tanto, el término integral no se puede excluir del controlador digital si este se utiliza en la forma de velocidad.

Una ventaja del esquema de control PID en la forma de velocidad es que no es necesaria la inicialización cuando se conmuta de operación manual a automática. De este modo, si existen cambios súbitos grandes en el punto de ajuste o en el inicio de puesta en operación del proceso, el esquema de control PID en la forma de velocidad presenta mejores características de respuesta que aquel en la forma posicional. Otra ventaja del esquema de control PID de forma de velocidad es que es útil en la supresión de correcciones excesivas en sistemas de control de procesos.

Las leyes de control lineales en la forma de acciones de control PID, tanto en forma posicional como forma velocidad, son básicas en controles digitales debido a que con frecuencia dan soluciones satisfactorias a muchos problemas prácticos de control, en particular en el control de procesos. En controladores digitales las leyes de control se pueden implementar mediante software y por lo tanto las restricciones de hardware de los controles PID se pueden ignorar por completo.

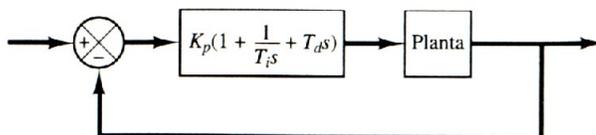


Figura 3.12: Control PID de una planta.

3.4. Reglas de Sintonización para Controladores PID

La Figura 3.12 muestra el control PID de una planta. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla con las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema de lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso se debe recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron más reglas para sintonizar los controladores PID (lo cual significa establecer valores para K_p , T_i y T_d con base en las respuestas escalón experimentales o basadas en el valor de K_p que produce la estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional). Las reglas de Ziegler-Nichols, que se presentan a continuación, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas (Por supuesto, estas reglas se aplican al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos).

3.4.1. Reglas de Ziegler-Nichols para Sintonizar Controladores PID

Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , con base a las características de respuesta transitoria de una planta específica. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o la sintonización de los controles PID se realiza mediante experimentos en la planta. (Se han propuesto numerosas reglas de sintonización para los controladores PID desde la propuesta Ziegler-Nichols. Se les encuentra en la literatura y aquí solo se presentan las reglas de Ziegler-Nichols.)

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler- Nichols. En ambos se pretende obtener un 25 % de sobrepaso máximo en la respuesta escalón véase la Figura 3.8.

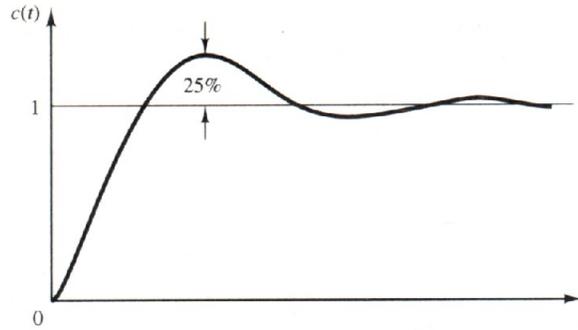


Figura 3.13: Curva de respuesta a un escalón unitario que muestra un sobrepaso máximo de 25 % .

Primer método

En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, como se observa en la Figura 3.14. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la respuesta escalón unitario puede tener la forma de S como se observa en la Figura 3.15. (Si la respuesta no exhibe una curva como S, este método no es pertinente). Tales curvas de respuesta escalón se generan experimentalmente o a partir de la simulación dinámica de la planta.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente con el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje de tiempo y la línea $c(t) = K$, como se aprecia en la Figura 3.15. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de transporte del modo siguiente:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{T_s + 1} \quad (3.29)$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que aparece en la Tabla 3.1.

Observe que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de la regla de Ziegler-Nichols produce

Tabla 3.1: Valores de K_p , T_i y T_d que sugirieron Ziegler y Nichols.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

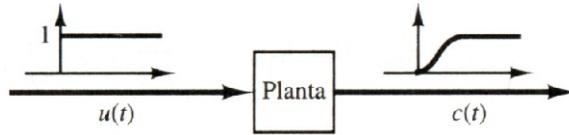


Figura 3.14: Respuesta de escalón unitario de una planta.

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2LS} + 0.5LS \right) \\
 &= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Por lo tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -1/L$.

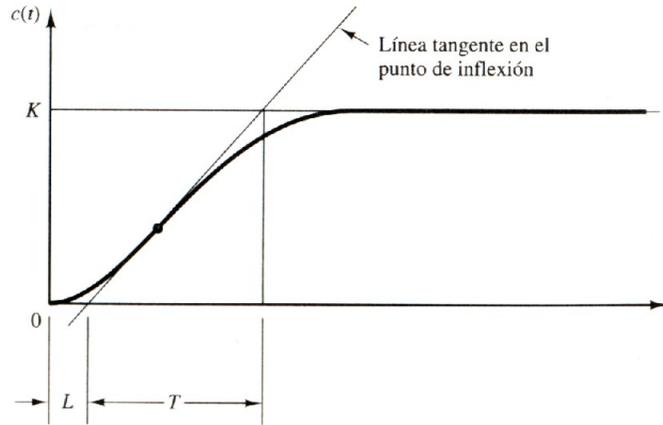


Figura 3.15: Curva de respuesta con forma de S.

Segundo método

En el segundo método, primero se establece $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional véase Figura 3.16, incremente K_p de cero a un valor crítico K_{cr} en donde la salida exhiba primero oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , no se aplica este método). Por tanto, la ganancia crítica de K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente (véase Figura 3.17). Ziegler y Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que aparece en la Tabla 3.2

Observe que el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0.6 K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5 P_{cr} s} + 0.125 P_{cr} s \right) \\
 &= 0.075 K_{cr} P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Por lo tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y cero doble en $s = -4/P_{cr}$.

Tabla 3.2: Valores de K_p , T_i y T_d que sugirieron Ziegler y Nichols.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

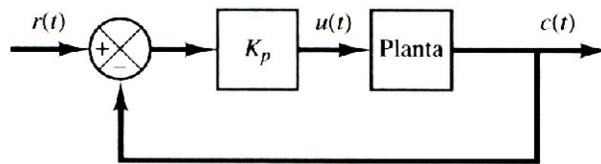


Figura 3.16: Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.

3.5. Ejemplo: Diseño de un Controlador Clásico para la Posición de un Motor de C.D.

Modelado

El motor de corriente directa es un actuador muy utilizado en los sistemas de control. Éste proporciona un movimiento rotacional y puede acoplarse directamente a engranes o poleas para obtener diferentes relaciones. En la Figura 3.18 se observa el circuito que forman la armadura y el rotor, así como el diagrama de cuerpo libre del rotor.

Para este ejemplo se asume que el motor tiene los siguientes valores como parámetros físicos. Estos valores son resultado de experimentos realizados con un motor real.

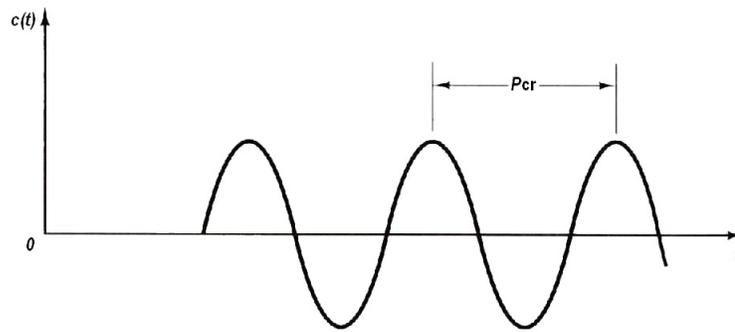
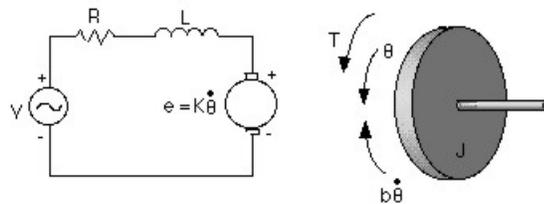

 Figura 3.17: Oscilación sostenida con un periodo P_{cr} .


Figura 3.18: Circuito eléctrico de la armadura y diagrama de cuerpo libre del rotor.

- Se asume que el eje y el rotor son rígidos

El torque del motor \mathbf{T} , está relacionado a la corriente de la armadura, i , por un factor constante \mathbf{K}_t . La f.e.m. en sentido opuesto, e , está relacionada a la velocidad de rotación por las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}_t i \quad (3.32)$$

$$e = \mathbf{K}_e \dot{\theta} \quad (3.33)$$

En unidades SI, \mathbf{K}_t (constante de la armadura) es igual a \mathbf{K}_e (constante del motor).

De la figura 3.18 se pueden escribir las siguientes ecuaciones basadas en las ley de Newton combinada con la ley de Kirchhoff:

$$\mathbf{J}\ddot{\theta} + \mathbf{b}\dot{\theta} = \mathbf{K}i \quad (3.34)$$

Tabla 3.3: Valores de K_p , T_i y T_d que sugirieron Ziegler y Nichols.

Variable	Descripción	Valor
J	Momento de inercia del rotor	$3.2284 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$
b	Relación de amortiguamiento del sistema mecánico	$3.5077 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
$K = K_e = K_t$	Constante de fuerza electromotriz	$0.0274 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{Amp}$
R	Resistencia eléctrica	4Ω
L	Inductancia eléctrica	$(L) = 2.75 \times 10^{-6} \text{ H}$
V	Entrada	Fuente de voltaje
θ	Salida	Posición del eje

$$\mathbf{L} \frac{di}{dt} + \mathbf{R}i = \mathbf{V} - \mathbf{K}\dot{\theta} \quad (3.35)$$

Función de Transferencia

Usando la transformada de Laplace, las ecuaciones (3.34) y (3.35) del modelo pueden ser expresadas en términos de s .

$$s(\mathbf{J}s + \mathbf{b})\Theta(s) = \mathbf{K}\mathbf{I}(s) \quad (3.36)$$

$$(\mathbf{L}s + \mathbf{R})\mathbf{I}(s) = \mathbf{V} - \mathbf{K}s\Theta(s) \quad (3.37)$$

Eliminando $\mathbf{I}s$ se puede obtener la siguiente función transferencia en lazo abierto, donde la velocidad de rotación es la salida y el voltaje la entrada.

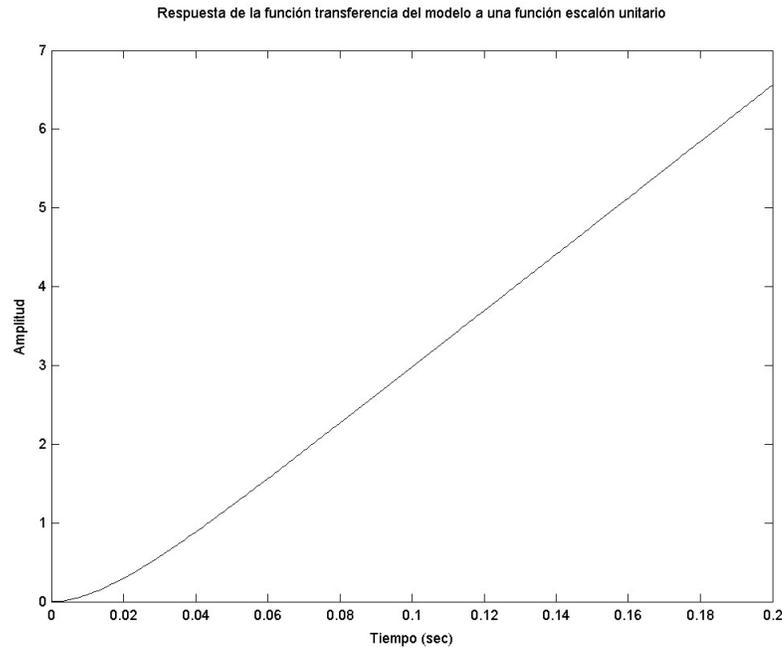


Figura 3.19: Respuesta del modelo a una función escalón unitario.

$$\frac{\dot{\theta}}{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{K}}{(\mathbf{J}s + \mathbf{b})(\mathbf{L}s + \mathbf{R}) + \mathbf{K}^2} \quad (3.38)$$

En este ejemplo se tiene la posición como salida y no la velocidad. Se puede obtener la posición integrado a $\dot{\theta}$ y para esto únicamente se necesita dividir la función transferencia por s .

$$\frac{\theta}{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{K}}{s(\mathbf{J}s + \mathbf{b})(\mathbf{L}s + \mathbf{R}) + \mathbf{K}^2} \quad (3.39)$$

Ahora se evalúa la respuesta de esta función transferencia a una función escalón unitario usando la función "step" de Matlab. La figura 3.19 muestra el resultado de la simulación y de ésta se concluye que al aplicar 1 volt la posición del motor cambia por 6 radianes, seis veces más que la posición deseada, suponiendo que para cada volt de entrada el motor deba girar solamente un radián.

Ejemplo 3.5.1 Diseño de un control de posición para un motor de C.D.

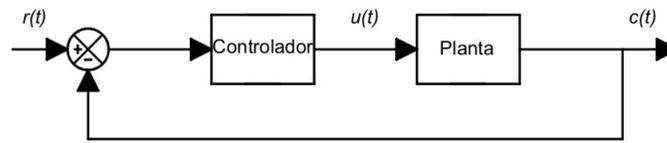


Figura 3.20: Diagrama a bloques que muestra el arreglo de un controlador y una planta.

Ahora se diseñan diferentes controladores y se aplican al sistema de forma que se tenga un esquema como el de la figura 3.20. Al terminar se tendrá un controlador PID cuya función transferencial se muestra en la ecuación 3.39.

$$\mathbf{K_P} + \frac{\mathbf{K_I}}{s} + \mathbf{K_D}s = \frac{\mathbf{K_D}s^2 + \mathbf{K_P}s + \mathbf{K_I}}{s} \quad (3.40)$$

Control Proporcional

Primero se prueba un control proporcional con ganancia de 1.7 usando de la función "cloop" de Matlab para determinar la función transferencial en lazo cerrado con retroalimentación unitaria.

Como resultado se tiene la gráfica que se muestra en la figura 3.21, en la cual se puede ver que el error es pequeño y disminuye conforme pasa el tiempo pero aun considerable, el tiempo que tarda el sistema en estabilizarse es grande y el sobrepaso en casi del 20 %.

Control Proporcional-Integral

Ahora se agrega el término integral de la función transferencial del controlador PID el cual deberá minimizar el tiempo de estabilización.

En la figura 3.22 se observa la gráfica resultante y se tiene que el tiempo de estabilización es demasiado grande aún. Para reducir el tiempo de estabilización se debe ajustar el control incrementando las ganancias para hacer más rápida la respuesta del controlador.

Ahora se observa que la respuesta es más rápida que antes, pero la $\mathbf{K_I}$ grande empeora la respuesta transitoria lo que se refleja en un sobrepaso muy grande (casi del 70 %). Para reducir este problema ahora se incluirá el siguiente término de la función transferencial del controlador PID.

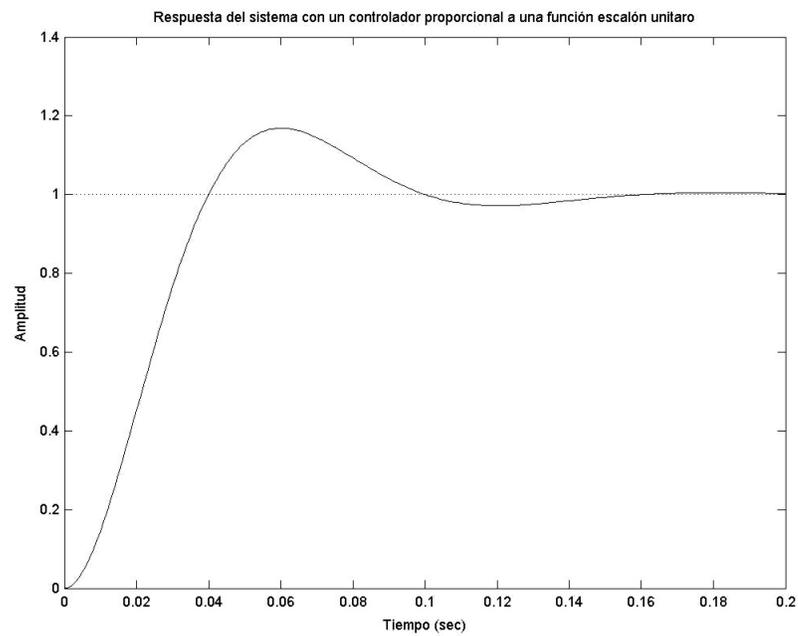


Figura 3.21: Respuesta del sistema con un controlador proporcional con ganancia $K_P = 1.7$ a una función escalón unitario.

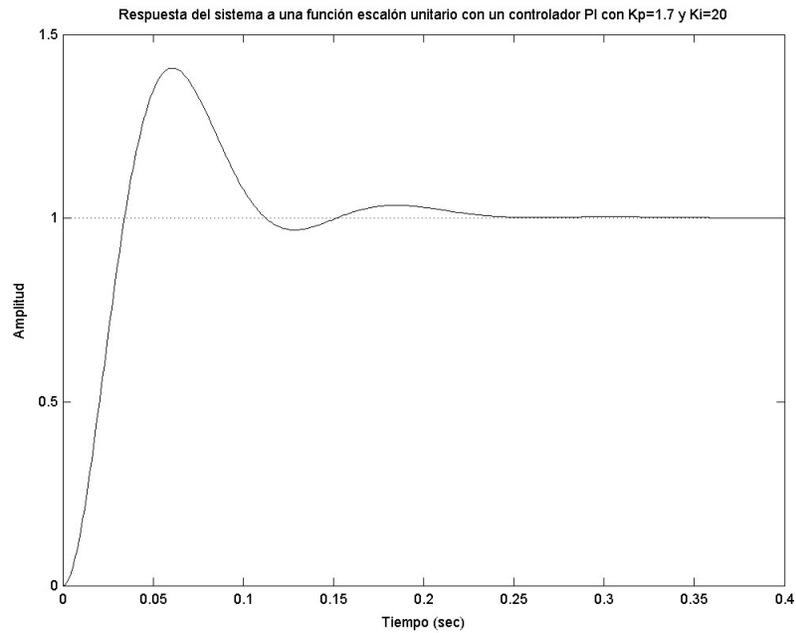


Figura 3.22: Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral con ganancias $K_P = 1.7$ y $K_I = 20$ a una función escalón unitario.

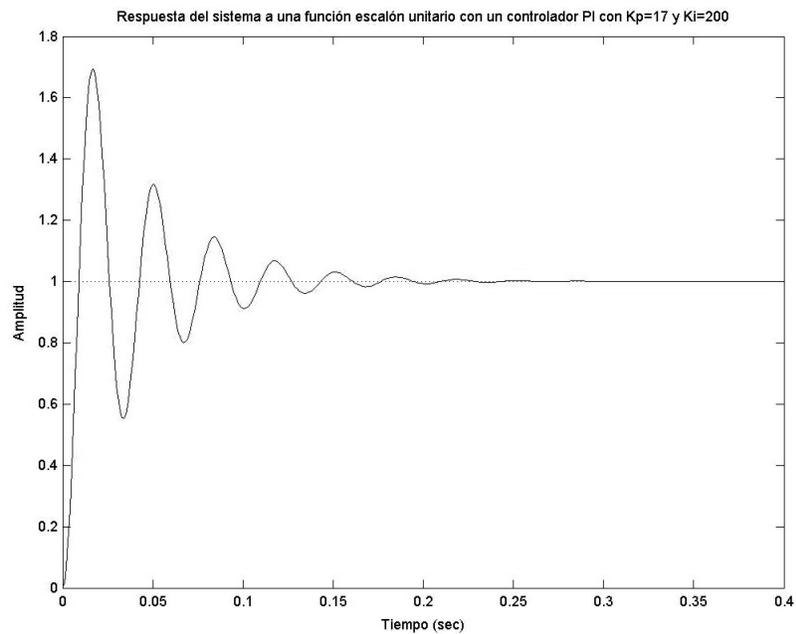


Figura 3.23: Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral con ganancias $K_P = 17$ y $K_I = 200$ a una función escalón unitario.

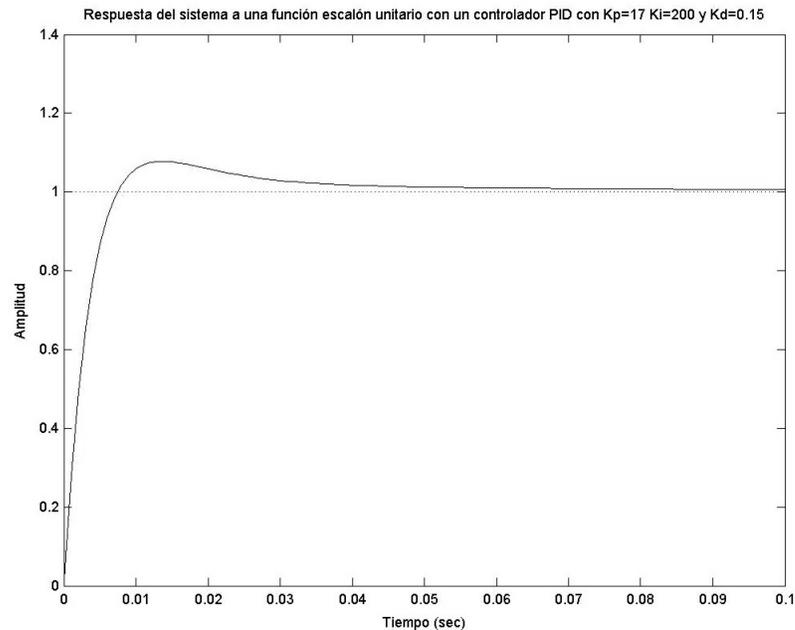


Figura 3.24: Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral-derivativo con ganancias $K_P = 17$, $K_I = 200$ y $K_D = 0.15$ a una función escalón unitario.

Control Proporcional-Integral-Derivativo

Ahora se incluye el término derivativo de la función transferencia del controlador PID el cual mejorará la respuesta transitoria del sistema y por lo tanto disminuirá el sobrepaso.

La figura 3.24 muestra la respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral-derivativo con ganancias $K_P = 17$, $K_I = 200$ y $K_D = .15$ a una función escalón unitario. La respuesta del sistema se ve muy bien, tiene un sobrepaso de apenas 16 % y el tiempo de estabilización es de solo 40ms aproximadamente. En este momento puede incrementar aún mas la ganancia integral para aumentar la velocidad de respuesta.

La figura 3.25 muestra la respuesta que se obtiene usando un controlador proporcional-integral-derivativo con ganancias $K_P = 17$, $K_I = 600$ y $K_D = 0.15$ ya es lo bastante buena para usarse en un sistema real.

3.6. Comentarios

En este capítulo se han resumido las diferentes estrategias de control clásico, como son:

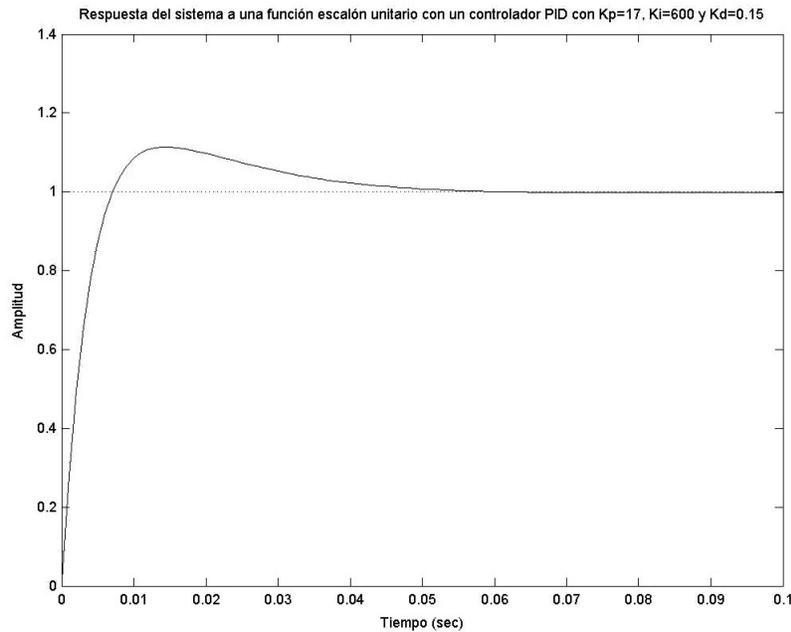


Figura 3.25: Respuesta del sistema con un controlador proporcional-integral-derivativo con ganancias $K_P = 17$, $K_I = 600$ y $K_D = 0.15$ a una función escalón unitario.

1. Control Proporcional
2. Control PI
3. Control PD
4. Control PID

Así como los métodos de sintonización de Ziegler-Nichols.

También se han aplicado estas estrategias a un motor de C.D., presentando su respuesta en simulación numérica.

En este trabajo de desarrollo tecnológico se utilizan 18 servomotores que tienen como actuadores motores de C.D. que sirven para mover cada una de las articulaciones. Es importante mencionar que cada uno de estos actuadores ya está controlado con un controlador PD y la única tarea que realizarán los controladores que se diseñan para este robot es la de proporcionar una señal de set point a los motores en base a instrucciones recibidas desde una computadora.

Capítulo 4

Entomología

La ciencia que estudia a detalle los sistemas biológicos de los artrópodos es la entomología. Este capítulo presenta una descripción de los sistemas neurosensorial, muscular y la anatomía de los insectos. El estudio de estos temas será de ayuda en el diseño de los sistemas mecánicos y electrónicos del insecto-robot ya que estarán basados en los sistemas reales de un insecto. En este capítulo no se incluirán descripciones de los sistemas circulatorio, digestivo, respiratorio, etc. porque el insecto-robot no dependerá de estos sistemas para su funcionamiento.

La organización del capítulo es la siguiente: en la primera sección se presenta material introductorio que comprende conceptos básicos relativos a la anatomía de los insectos, estos conceptos se usaran a lo largo de este capítulo y algunos capítulos posteriores donde se hará referencia de la entomología de los insectos para el diseño de piezas mecánicas y controladores. La segunda sección describirá las partes principales de un insecto y hace un estudio mas detallado del tórax por ser la región locomotora. Posteriormente, en la tercera sección se describen las patas de los insectos y en las ultimas dos secciones se analiza su funcionamiento mientras el insecto está estático y en movimiento. Estas secciones serán útiles para diseñar sistemas de locomoción para el insecto robot.

4.1. Introducción

Conocer la anatomía y fisiología es esencial para entender mejor a los insectos, esto también es útil para conocer los nombres de las estructuras con el fin de poder hablar acerca de ellas. La nomenclatura de la anatomía de los insectos debe ser vista como una herramienta que hace tratar temas sobre los insectos, y no como una barrera para el entendimiento. De hecho, varios de los términos (por ejemplo, femur, trochanter, mandíbula)

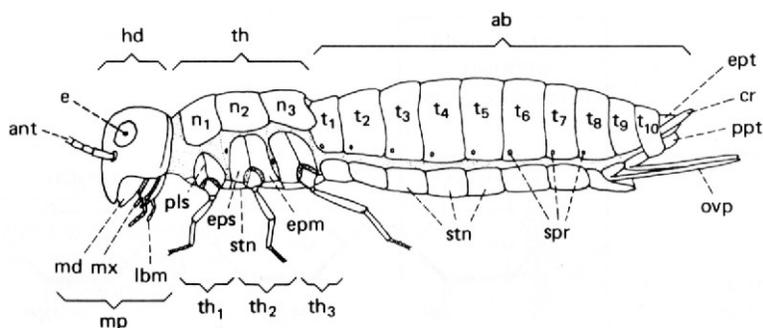


Figura 4.1: Estructura general de un insecto.

tienen significados similares a la anatomía de los vertebrados.

Los insectos tienen una forma más o menos alargada o cilíndrica y son unilateralmente simétricos, esto es que, el lado izquierdo y derecho son muy parecidos. El cuerpo está dividido en una serie de segmentos, los metameres, y estos están agrupados en tres regiones distintas o tagmata (singular, tagma): la cabeza, el tórax y el abdomen como se muestra en la Figura 4.1. En la misma figura se usa la siguiente nomenclatura: *ab*, abdomen; *ant*, antena; *cr*, cercus; *e*, ojo compuesto; *epm*, epimeron; *eps*, episternum; *ept*, epiprocto; *hd*, cabeza; *lbn*, labium; *md*, mandíbula; *mp*, piezas bucales; *mx*, maxila; *n*, nota de torax; *ovp*, ovipositor; *pls*, sutura pleural; *ppt*, paraprocto; *spr*, spiracles; *stn*, sternum; *t₁₋₁₀*, terga; *th*, tórax; *th₁*, protórax; *th₂*, mesotórax; *th₃*, metatórax.

El esqueleto de un animal soporta y protege el cuerpo y transfiere las fuerzas generadas por la contracción de músculos. Una de las características fundamentales de los artrópodos es el desarrollo de placas endurecidas o *esclerites*, y su incorporación en el sistema óseo del animal. Esto se llama usualmente *exoesqueleto* porque los esclerites son parte externa de la pared del cuerpo del artrópodos. De hecho, los artrópodos también poseen un extenso endoesqueleto de soporte, refuerzo, y sitios para el agarre de músculos.

4.2. Tagmata

4.2.1. Abdomen

El tercer tagma de los insectos es el abdomen que en comparación con la cabeza y el tórax es simple en estructura. Los segmentos que forman el tagma abdominal están relacionados con numerosas funciones, ya que en su interior se encuentra la mayor parte de los órganos que intervienen en la alimentación, respiración, circulación, excreción y reproducción. Varias de estas funciones se ven favorecidas directamente por la movili-

dad, posibilidades de dilatación o cambios de forma, por lo que los segmentos presentan generalmente una clara individualización, manteniendo áreas flexibles o distensibles entre ellos. Se observa cierta semejanza en los segmentos, con excepción de los últimos que aparecen fuertemente modificados en relación con mecanismos de fecundación o postura de huevos.

En general, el abdomen en los insectos está formado por más de 11 metamerés (Figura 4.1). Cada metamere tiene típicamente una esclerite dorsal.

En el abdomen, los surcos visibles externamente de la pared del cuerpo delimitan los metamerés que sirven como puntos de agarre para los músculos longitudinales dorsal y ventral en los artrópodos. La contracción de estos músculos da como resultado un movimiento telescópico o retracción de los segmentos abdominales.

4.2.2. Cabeza

El primer tagma, la cabeza de los insectos, está compuesta de una serie de segmentos corporales metaméricos, todos especializados para la obtención y manipulación de alimentos, percepción sensorial e integración neural. La cabeza sostiene los ojos, las antenas y las piezas bucales, así mismo contiene el sistema nervioso superior y mecanismos sensoriales importantes. Este aspecto difiere grandemente entre los grupos de insectos.

La cabeza es básicamente una capsula articulada fuertemente esclerotizada unida al tórax por un cuello formado por una membrana flexible. La parte externa está marcada por ranuras muchas de las cuales indican rigidez en el interior, y muchas de ellas se extienden profundamente al interior fusionándose con otras y formando un esqueleto. Estas estructuras sirven para fortalecer la cabeza y proveer de sitios de agarre para los músculos.

4.2.3. Tórax

El tórax es el tagma locomotor del cuerpo, en este se encuentran las patas y alas de un insecto. Está formado por tres segmentos, el anterior *protórax*, *mesotórax* y el posterior *metatórax* (Figura 4.1, th_1 - th_3).

La primera unidad, protórax, nunca lleva alas y puede presentar formas y tamaños variables en relación a funciones no locomotoras, como imitación del medio, defensa, ubicación del centro de gravedad etc. Se encuentra unido al resto del tórax por una línea flexible, indicadora de su poca participación en la generación de impulsos, a la cabeza se relaciona mediante una membrana cervical y dos escleritos cervicales.

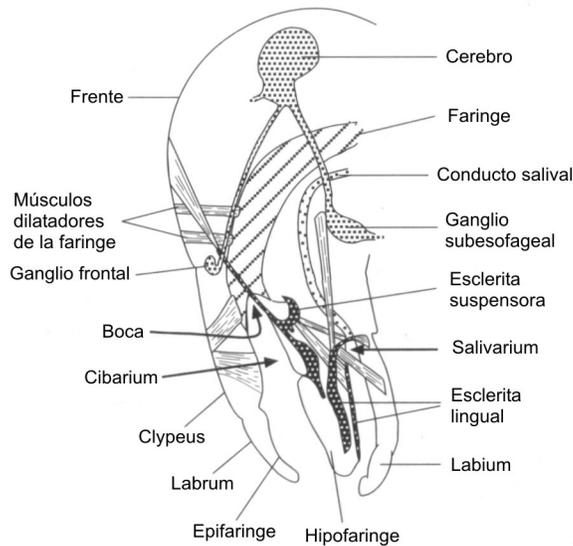


Figura 4.2: Cavidad pre-oral y musculatura de la cabeza de un insecto.

La unidad torácica posterior, formada por meso y metatórax juntos, es más desarrollada y relacionada con vuelo, cuando existen alas, o con la función propulsora de patas medias y posteriores.

4.3. Las Patas

Los insectos tienen tres pares de patas típicamente, un par por cada segmento torácico. De ahí que, se tiene el nombre alternativo para los insectos, los *hexápodos*, sin embargo, no todos los hexápodos son insectos.

4.3.1. Estructura Básica de las Patas

Cada pata está compuesta de seis segmentos, cada uno de estos segmentos está articulado con el anterior por articulaciones monocondílicas y dicondílicas sobre una membrana, el *corium*. Los seis segmentos básicos son: coxa, trochanter, fémur, tibia, tarsus y pretarsus (Figura 4.3(a)).

La coxa tiene comúnmente la forma de un cono truncado y está articulado con la pared del tórax. Puede haber solo una articulación con el pleuron (Figura 4.3(a)), en cuyo caso el movimiento de la coxa es libre, pero frecuentemente hay una segunda articulación con el trochanter (Figura 4.3(b)). Esto restringe su movimiento pero como la coxa tiene una

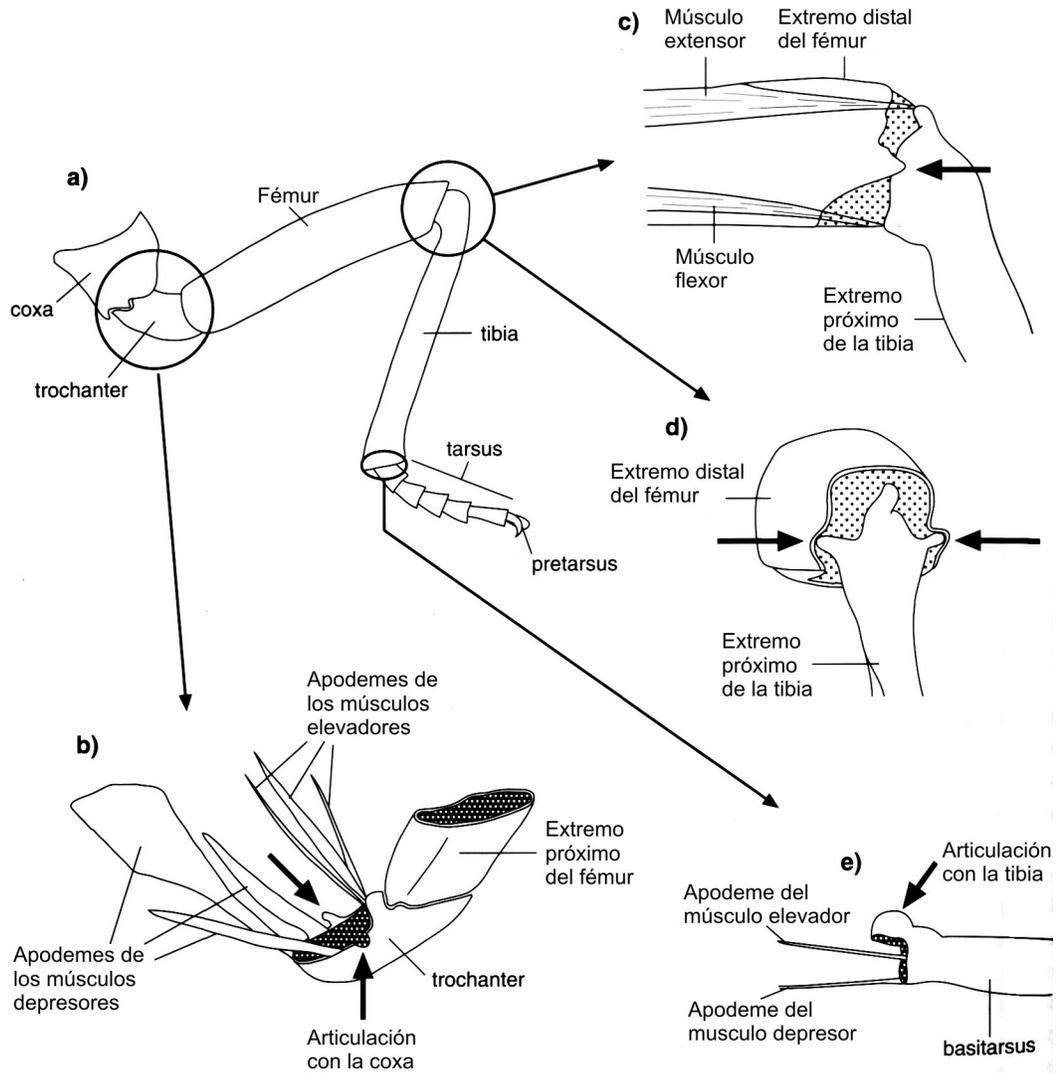


Figura 4.3: Patas y articulaciones. (a)Pata de insecto típica. (b)Articulación dicondíllica del trochanter con la coxa. (c), (d)Articulación dicondíllica de tibia y fémur, (c)vista lateral, (d)vista final. (e)Articulación monocondíllica del tarsus con tibia.

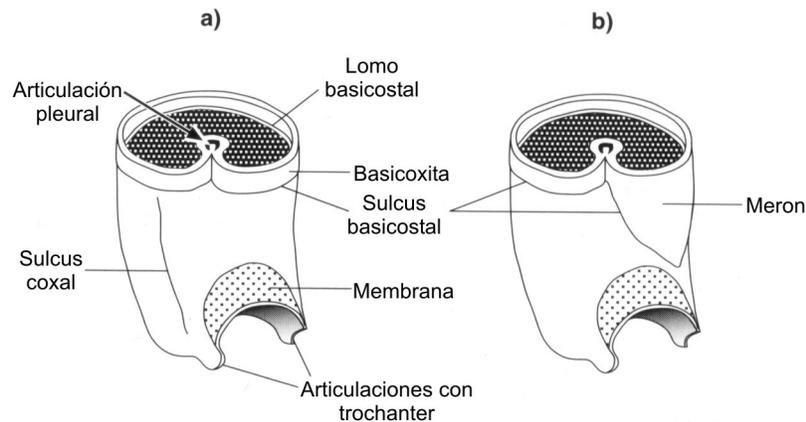


Figura 4.4: Coxa, vista lateral oblicua. (a) Insecto típico. (b) Coxa con meron largo.

unión flexible con el episternum, la coxa sigue relativamente móvil.

El trochanter es un pequeño segmento con una articulación dicondíllica con la coxa de forma que solo se puede moverse en el plano vertical (Figura 4.3(b)). En el caso de algunos insectos existen 2 trochanter, pero el aparente segundo trochanter es, en realidad, una parte del fémur.

El fémur es comúnmente pequeño en las larvas, pero en muchos adultos es la parte más larga y robusta de la pata. Este comúnmente está más o menos fijo al trochanter y se mueve con él. En este caso no hay músculos moviendo el fémur con respecto al trochanter, pero algunas veces un solo músculo adherido al trochanter está presente para producir un pequeño movimiento de regreso, o reducción, del fémur (Figura 4.3(b)).

La tibia es el segmento largo de la pata y se articula con el fémur por medio de una articulación dicondíllica tal que se mueve en un plano vertical (Figura 4.3(c)(d)). En muchos insectos, la parte superior de la tibia está doblada tal que el segmento puede flexionarse hacia el suelo (Figura 4.3(a)). El tarsus, en muchos insectos, está subdividido desde dos a cinco tarsómeros. Esto se diferencia de los segmentos reales por la ausencia de músculos. El tarsómero basal, o basitarsus, se articula con la última parte de la tibia por medio de un solo condile (Figura 4.3(e)), pero entre tarsómeros no hay una articulación; estos están conectados por una membrana flexible que les da libertad de movimiento.

El pretarsus, en la mayoría de los insectos, consiste de una base membranosa que soporta un lóbulo medio, el arolium, el cual puede ser membranoso o parcialmente esclerotizado y una parte de las uñas, las cuales se articulan con un segmento medio del último tarsómero conocido como el unguifer.

4.3.2. Músculos de las Patas

Los músculos que mueven las patas se dividen en dos categorías : extrínsecos, los que están agarrados por fuera de la patas, e intrínsecos, todos aquellos que se encuentran a lo largo de los segmentos enlazando un segmento con otro. La coxa es movida por músculos extrínsecos agarrados al tórax, un arreglo típico de estos insectos (Figura 4.5). Con músculos promotor y remotor surgen en el tergum, abductor y músculos abductores del pleuron y esternon, y músculos rotatorios de también del esternon. Los roles de los músculos varían, dependiendo de la actividad de los otros músculos y también del tipo de articulación.

La musculatura intrínseca es mucho mas simple que la musculatura coaxal, y consiste típicamente solo de pares de músculos antagonisticos en cada segmento (Figura 4.5).

El fémur usualmente no se mueve y esta fijo al trochanter, pero la tibia es movida por un músculo flexor y un extensor, agarrados al fémur e insertados en la apodemes desde la membrana hasta la base de la tibia. Los músculos elevador y depresor del tarsus se agarran de la tibia y están insertados hasta el final de basi tarsus, pero no hay músculos en el tarsus que muevan los tarsumeres.

4.3.3. Sistema Sensorial de las Patas

Las Patas de los insectos tienen un extenso sistema sensorial. Algunos de los elementos sensoriales son propioceptores, los cuales monitorean la posición y postura de los segmentos de la pata de un insecto. Otros elementos sensoriales son los receptores mecánicos y químicos que tienen la función de percibir estímulos del ambiente.

La Figura 4.6 se observa los sistemas sensoriales de la pata de un insecto. En (a) se muestran los propioceptores y el numero que esta en paréntesis indica el numero de receptores de cada grupo. La nomenclatura es la siguiente: CA sensor campaniforme, HP placa con pelo, SC órgano chordotonal. En (b) se muestran los exteroceptores del tarsus de un insecto. En la vista frontal hay 140 filamentos mecano-sensitivos largos y 200 pequeños filamentos químicos-sensitivos en la superficie superior y los lados del tarsus. En la vista ventral hay 180 filamentos sensitivos y de estos el 60% son químicos.

4.3.4. Postura

Mantener una postura requiere actividad muscular y un continuo ajuste de está actividad para compensar los pequeños cambios en la posición. Algunos músculos de la patas, como los músculos extensor de las partes frontal y medias de un insecto, están activas con-

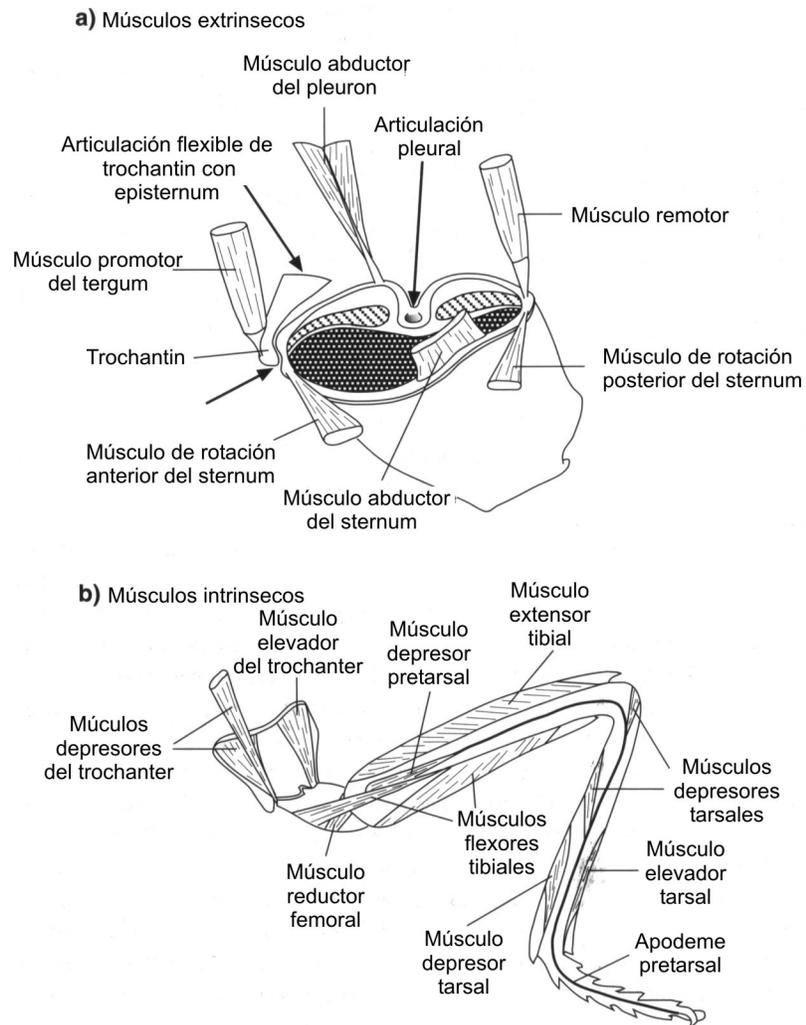


Figura 4.5: Músculos de las patas. (a) Músculos extrínsecos de coxa. (b) Músculos intrínsecos.

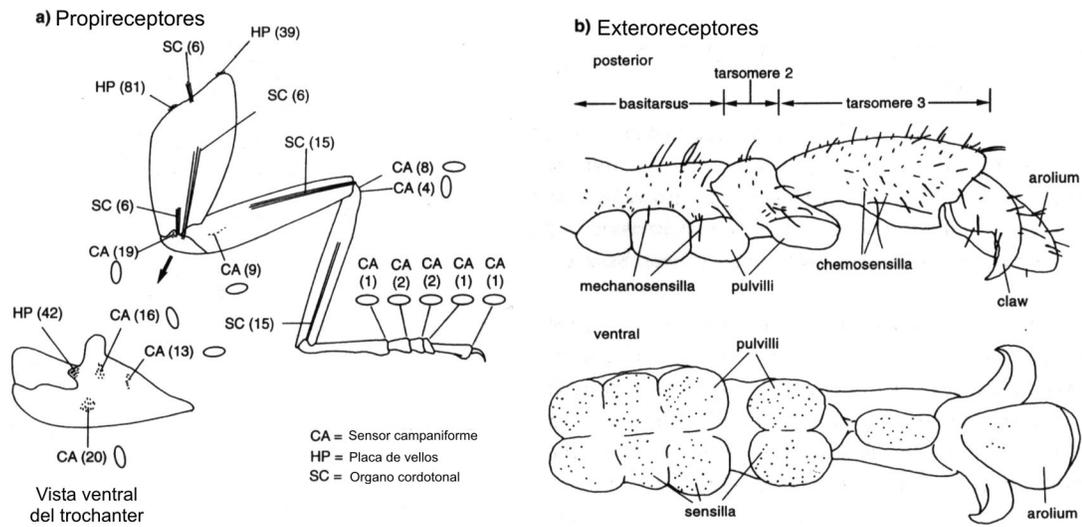


Figura 4.6: Sistema sensorial de la pata.

stantemente cuando está estacionario. Los *axones* lentos mandan señales a estos músculos a bajas frecuencias, entre 5 y 30 Hz, su actividad varía con la actividad de la pata. Los axones rápidos no están activos en un insecto estacionario, y las neuronas invidoras están esporádicamente activas, pero emiten una señal en respuesta a un contacto o vibración.

Cuando un insecto permanece en postura cualquier fuerza que tienda a cambiar los ángulos entre los segmentos de las patas, como una ráfaga de viento, es contrarrestada por un reflejo muscular, llamado reflejo de posición postural, y en muchos casos este es procesado por los órganos chordotonaes. Muchos estudios han examinado la articulación fémur-tibia. En este caso, cualquier tendencia al reducir el ángulo entre el fémur y la tibia es contrarrestado por el músculo extensor de la tibia, mientras que un incremento en el ángulo es contrarrestado por el músculo flexor de la tibia.

Se han descrito reflejos similares para otras articulaciones de la pata. Estos reflejos son producidos en respuesta a cambios pasivos en los ángulos entre los segmentos cualquiera que sea el grado inicial de flexión o extensión, pero la entrada del órgano chordotonal, y la actividad de las neuronas motrices hacia los músculos, varía de acuerdo a la posición.

Las fuerzas axiales que pueden producirse por el peso del insecto cuando esta manteniendo una postura, son percibidas por el sensor, orientado transversalmente, mas proximo, aunque sus respuestas tales como las fuerzas axiales son relativamente débiles. Doblar la tibia, produce respuestas intensas. Cuando el insecto está en postura sobre una superficie horizontal, con la tibia inclinada y alejada del cuerpo, la masa del cuerpo tiende a doblar la tibia, comprimiendo los sensores próximos. Torcer la tibia provoca que ambos grupos de sensores respondan. La estipulación de los sensores próximos excita a las neuronas motri-

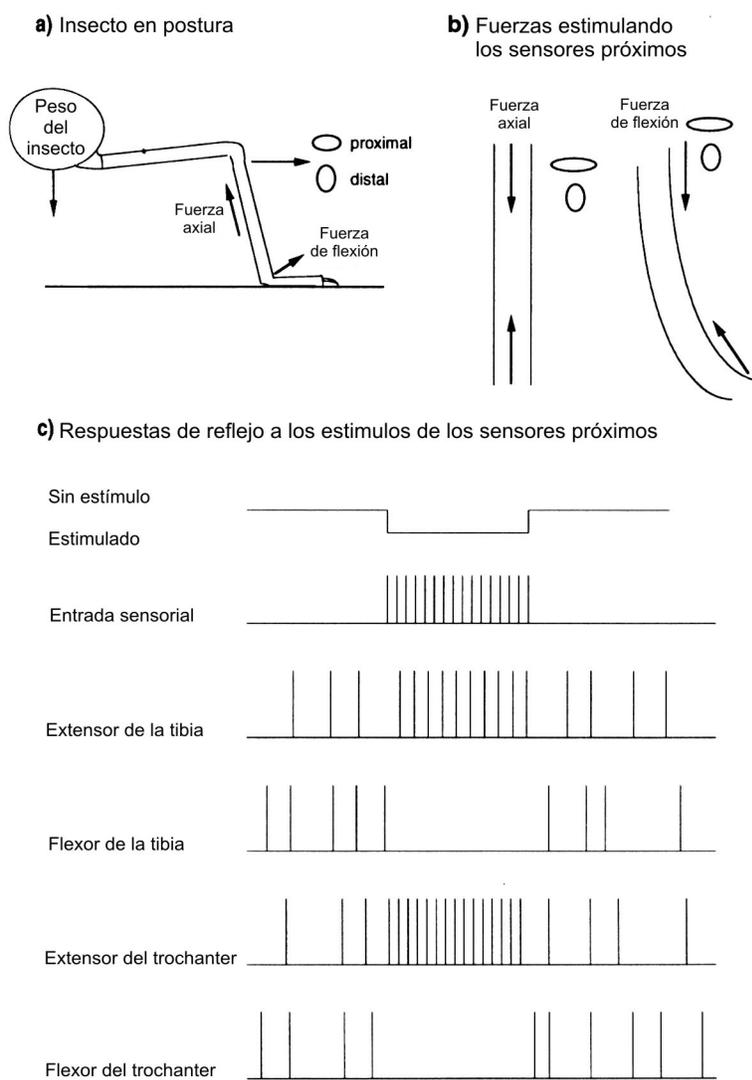


Figura 4.7: Función de los sensores campaniformes en la postura de un insecto.

ces lentas de los músculos extensores de la tibia y el trochanter, e inhibe las neuronas motrices lentas de los músculos flexores de la tibia y el trochanter.

En la Figura 4.7 se muestra el funcionamiento de los sensores próximos en la pata de un insecto que mantiene una postura. En (a) se muestra el perfil de un insecto. Las dos orientaciones de los sensores en el grupo proximo se muestran con elipses. En (b) el diagrama muestra los efectos de una fuerza axial en un doble dorsal. El sensor orientado transversalmente se comprime a lo largo de sus ejes cortos y se estimula. En (c) la actividad de las neuronas motrices de los músculos extensores de la tibia y el trochanter aumenta cuando los sensores son estimulados. La actividad de los músculos flexores se inhibe. Las líneas verticales representan potenciales de acción.

4.3.5. Locomoción

La movilidad en muchos estados en la historia de la vida es una característica de todos los animales. Ellos deben moverse con el fin de encontrar pareja, dispersarse y, en muchos casos, para encontrar comida. El éxito de los insectos como animales terrestres se debe en parte a su alta capacidad de movilidad aparte del poder de volar.

La mayoría de los insectos se mueven sobre la superficie de la tierra caminando o corriendo. Las patas se mueven en secuencias variadas con diferentes velocidades y además manteniendo la estabilidad. La coordinación de estos movimientos involucra mecanismos centrales, pero los reflejos segmentales también son importantes.

Movimientos de las Patas

Para describir los movimientos de las patas de un insecto comúnmente se usan los siguientes términos:

Protracción: Movimiento completo hacia adelante de todo el miembro con respecto a la articulación del cuerpo.

Promovimiento: El movimiento de la coxa resultante de la protracción.

Retracción: El movimiento hacia atrás de la pata relativo a su articulación al mismo tiempo que el pie está colocado sobre el piso.

Removimiento: El movimiento correspondiente de la coxa resultado de la retracción.

Adducción: El movimiento de la coxa hacia el cuerpo.

Abducción: El movimiento de la coxa para alejarse del cuerpo.

Elevación: Momento de la protracción en que se realiza el levantamiento de la pata.

Depresión: Bajar la pata o parte de la pata.

Extensión: Un incremento en el ángulo entre dos segmentos de la pata.

Flexión: Un decremento en el ángulo entre dos segmentos de la pata.

Mecanismos de Caminar

Una pata puede actuar simplemente como un puntal con las fuerzas actuando hacia abajo desentendiendo de su ángulo de inclinación con respecto al cuerpo y el peso del insecto (Figura 4.8). Fuerzas iguales y opuestas se ejercerán por la pata sobre el cuerpo. La fuerza que actúa debajo de la pata puede descomponerse en dos componentes, horizontal y vertical, como la pata esta extendida hacia un lado del cuerpo la fuerza horizontal puede descomponerse en componentes longitudinales y transversales. Las magnitudes relativas de las componentes transversal y longitudinal variaran con la posición de la pata. En la Figura 4.9 se asume que solo tres patas están sobre el piso y es claro que para muchos de estos movimientos el efecto del puntal de las patas frontales tiende a retardar el movimiento hacia adelante (empuje longitudinal hacia adelante), mientras que el efecto de las patas medias y traseras promueve el movimiento hacia adelante (empuje longitudinal hacia atrás). Mientras que todas las fuerzas opuestas longitudinales (hacia atrás, hacia adelante) y laterales (izquierda, derecha) estén en equilibrio no habrá movimiento, pero si las fuerzas no están balanceadas el cuerpo se desplazara hasta caer en su centro de gravedad.

Una pata puede actuar como una palanca, que es una barra en la cual se realiza un trabajo externo tal que rota con respecto a un *fulcrum*¹. Este efecto es producido por los músculos extrínsecos los cuales mueven a la pata con respecto al cuerpo y entonces sostiene al cuerpo.

La pata, sin embargo, no es un simple puntal rígido o barra. Esta tiene músculos intrínsecos los cuales también pueden ejercer fuerzas en el cuerpo flexionando o extendiendo la pata. Si una pata es extendida, la flexión de las articulaciones empujara el cuerpo hacia adelante, mientras, en una pata direccionada hacia atrás, se endereza y empuja el cuerpo hacia adelante.

Cuando un insecto comienza a moverse, la pata frontal está completamente protractada al máximo promovimiento coxal y todos los segmentos de la pata están extendidos. En este estado se ejerce una acción puntal retardando el movimiento hacia adelante. La retracción comienza debido al removimiento coxal el cual produce un efecto palanca generando el movimiento del animal, un efecto el cual es sumado a la flexión del trochanter sobre la

¹Un eje entre la base de la pata y el tórax

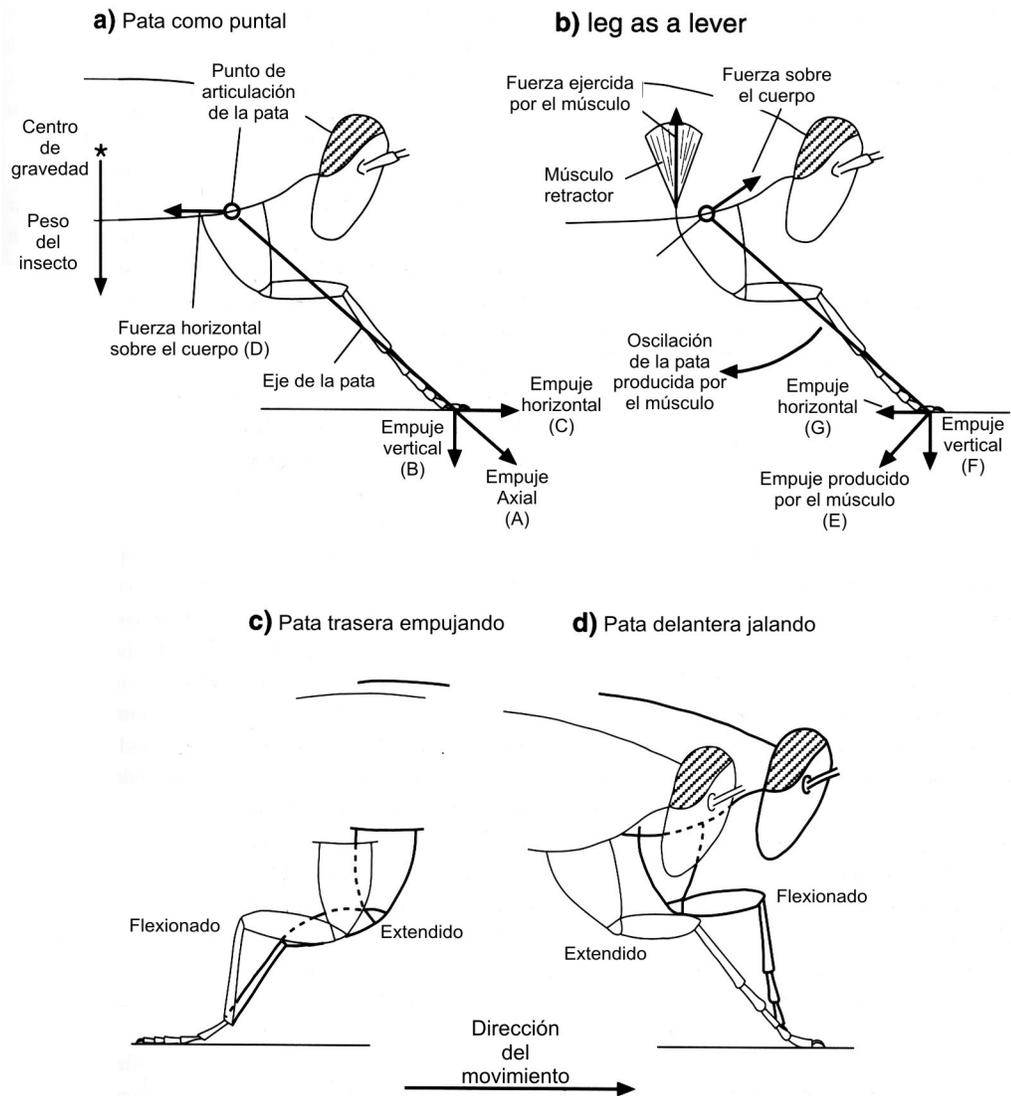


Figura 4.8: Funcionamiento mecánico de una pata.

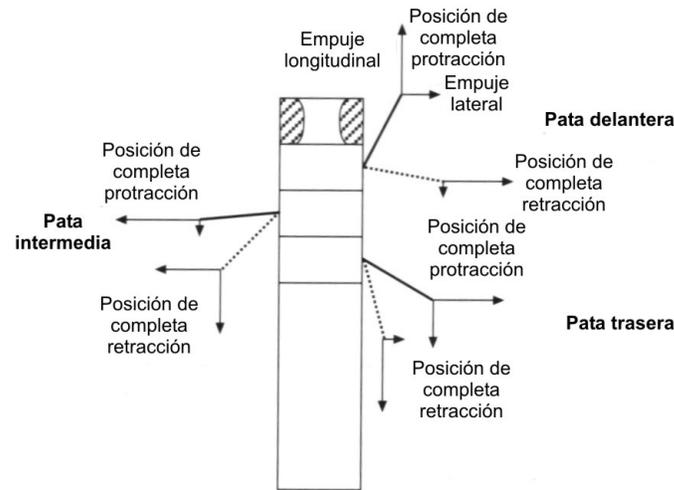


Figura 4.9: Estabilidad en tres patas.

coxa y el de la tibia sobre el fémur. Esta fase continua hasta que la pata está en ángulo recto con respecto al eje que cruza a lo largo del insecto. Cuando este a superado esta posición ejerce un efecto puntal el cual, ayudado por la extensión de la pata, tiende a empujar al insecto hacia adelante.

Durante la protracción la pata es levantada y flexionada tal que no puede ejercer fuerzas sobre el cuerpo. El músculo promotor coxal probablemente comienza a moverse antes que la retracción este completa, así que el cambio desde la retracción a la protracción es suave. Como la pata delantera oscila hacia adelante esta se extiende de nuevo, así que cada ciclo del movimiento de los músculos intrínsecos experimenta dos fases de contracción y relajación, mientras los músculos extrínsecos solo se contraen y relajan una sola vez. La patas medias y traseras siempre están sobre el piso detrás de sus *coxae*², así su efecto puntal longitudinal siempre ayuda el movimiento hacia adelante. Las fuerzas propulsivas principales de ambos pares de patas se obtienen de la extensión del trochanter sobre la coxa y de la tibia sobre el fémur empujando al insecto hacia adelante. Las fuerzas longitudinales producidas por estos movimientos son generalmente son las que mueven al insecto hacia adelante. Al mismo tiempo se producen fuerzas laterales y cuando, por un instante, las patas delanteras están sobre el piso tienden a empujar la cabeza hacia la izquierda. Esto se equilibra en parte por las otras patas, pero existe una tendencia de la cabeza de oscilar de lado a lado mientras el insecto camina.

²Plural de coxa

4.4. Sistema Nervioso

El sistema nervioso es un sistema de procesamiento de información y conducta que se asegura de mantener un funcionamiento y coordinación rápidos de los efectores, produciendo y modificando las respuestas del insecto a las entradas de los órganos sensitivos periféricos.

4.4.1. Componentes Básicos del Sistema Nervioso

Neurona: Es la unidad estructural del sistema nervioso, que consta de un soma o cuerpo celular y del que emanan diversas finas prolongaciones llamadas dendritas, éstas sirven de superficie receptora para conducir señales de otras neuronas hacia el cuerpo celular. Los axones, llamados también fibras nerviosas, son sistemas especializados que conducen señales lejos del cuerpo celular. La transmisión de señales entre neuronas se denomina sinapsis.

Receptores sensoriales: Son estructuras especializadas en captar los estímulos y transformarlos en un impulso nervioso, están ubicadas en diversas partes del cuerpo animal.

Nervios: Son los que conducen impulsos nerviosos, están constituidos por neuronas aferentes (conducen impulsos de estímulos), eferentes (conducen impulsos de respuesta) y de asociación.

4.4.2. Anatomía del Sistema Nervioso

Ganglios

El conjunto de neuronas motrices e interneuronas del sistema nervioso se denominan ganglios. Dentro de la ganglios todo el conjunto se agrupa periféricamente. El centro de cada ganglio está ocupado por arborizaciones de axones sensoriales, arborizaciones de axones de neuronas motrices y arborizaciones de axones de interneuronas.

En general el sistema nervioso de los insectos está formado por un cerebro que está colocado preoralmente en la cabeza y por una serie de ganglios en cada segmento del cuerpo. Los ganglios adyacentes están unidos por un par de conexiones interganglionares que no son más que axones.

El primer ganglio de la cadena ventral es el subesophageal. Este es un ganglio compuesto, está formado por la fusión de los ganglios mandibular, maxilar y labial. Este

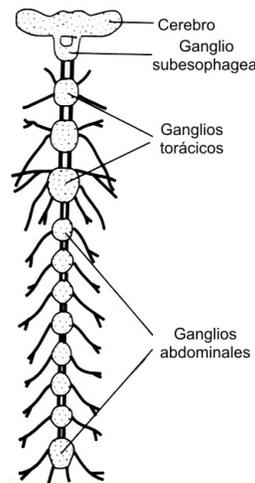


Figura 4.10: Anatomía del sistema nervioso.

ganglio tiene nervios conectados con la mandíbula, el maxilar, el labium y algunas veces a algunas partes del cuello y glándulas salivales.

Después del ganglio subesofageal están los ganglios torácicos ubicados, como su nombre lo indica, en el tórax. Típicamente hay tres ganglios torácicos pero en muchos insectos estos están fusionados en uno solo. Cada ganglio torácico tiene cinco o seis nervios en cada lado con la función de mandar señales musculares y recibir señales de los órganos sensoriales.

El siguiente conjunto de ganglios está conformado por los ganglios abdominales, los cuales son mas pequeños que los ganglios torácicos y tiene solo unos cuantos nervios adheridos, por lo general, todo el conjunto está conformado por 8 ganglios abdominales.

Cada uno de estos ganglios aporta una cierta cantidad de autonomía; esto es que, cada uno puede coordinar los impulsos involucrados en actividades en una parte específica del cuerpo. Las actividades que involucran a todo el cuerpo pueden coordinarse por impulsos desde el cerebro, pero muchas de estas puede ocurrir aunque el cerebro esté ausente.

Neuronas del Sistema Nervioso

Como ya se mencionó, las unidades funcionales básicas del sistema nervioso son las neuronas. Existen tres tipos principales de neuronas: neuronas sensoriales, interneuronas y neuronas motrices. Los conjuntos de células nerviosas sensoriales están ubicadas, por lo general, cerca de la superficie del cuerpo, donde se encuentran de manera individual o agrupadas en órganos sensoriales. De estas células se extienden axones hacia los ganglios

del sistema nervioso central. Las neuronas motrices están ubicadas en los ganglios y un axon se extiende hasta un órgano efector (un músculo o una glandula). Las interneuronas son células a través de las cuales los impulsos nervioso se direccionan hacia la apropiada célula o neurona.

Capítulo 5

Diseño y Construcción

5.1. Introducción

En este capítulo se analizan los mecanismos de movimiento de un robot hexapodo haciendo uso de los conceptos de movimiento de un insecto al caminar y tomando en cuenta los conceptos mas básicos de entomología.

La organización de este capítulo es la siguiente: En la primera parte se hace una elección de los materiales de construcción. Para la segunda parte se hace detalle de las piezas que conforman al robot. En la tercera parte se hace un análisis de los rangos de movimiento de las terminales de las patas del robot.

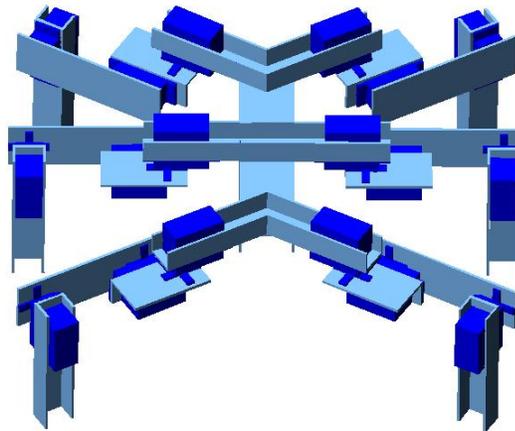


Figura 5.1: Vista frontal del diseño en AutoCAD del prototipo.

5.2. Materiales de construcción

En la actualidad existen diversos materiales de construcción para robots, dependiendo de la aplicación específica del robot, siendo, para los robots caminantes y/o autónomos el uso de materiales con una densidad baja y una alta resistencia a la flexión; una baja densidad ayuda a disminuir el peso general de el robot, considerando que en muchas ocasiones el peso de los actuadores y baterías es decisivo en los cálculos dinámicos de desplazamiento y algunas otras tareas; una alta resistencia a la flexión nos proporciona principalmente una rigidez suficiente para asegurar en cálculos dinámicos y estáticos que nuestra estructura se comporta muy similar a una rigidez ideal, logrando así una simplificación en cálculos, también ayuda a que en el diseño de colocación de actuadores, cables, circuitos, baterías, sensores, etc, sea mas homogéneo y espacioso.

También considerando los precios de materiales que reúnan las propiedades que necesitamos así como la facilidad de trabajar con ellos se consideran algunos de los mas comunes:

Para la tabla 5.1 de materiales, en la fibra de vidrio, se considera una mezcla de plástico y fibra de vidrio con fibra de vidrio al 30 %, y para fibras en pruebas de flexión, se hace en forma vertical, haciendo uso sistema Ksi.

Para este caso se hace elección del aluminio, por su facilidad de trabajar con este material y precio, se hace elección del perfil de aluminio de 1" X 1" para las patas, y para el tórax 1 1/4 " X 1 1/4 " pulgada, el primero coincidiendo con el tamaño en ancho de los motores.

5.3. Piezas del Robot

Considerando la entomología básica de insectos, dentro de esta, el caminar de los insectos, la región locomotora es el tórax y principalmente sus patas, la colocación de los motores se hace en referencia a igualar los movimientos de las articulaciones de los insectos; estos ocasionados por los músculos extensores y flexores, y reduciendo grados de libertad en las pata así como anular los grados de libertad que existen en el tórax de los insectos, también, aumentando el rango de movimiento en las articulaciones responsables del caminar en reversa.

Tabla 5.1: Relación de densidad, flexibilidad y facilidad, precio de trabajo de materiales de construcción de robots.

Tipo de controlador	Densidad	Resistencia Flexion	Precio, Facilidad
Aluminio	2.71 g/cm ³	27 GPa	Barato, Facil
Naylon Acero	1.14 g/cm ³	30.6 GPa	Caro, Dificil
Fibra de Vidrio	1.41 g/cm ³	20 Ksi	Barato, Dificil
Hierro Gris	7.19 g/cm ³	27 GPa	Barato, Dificil

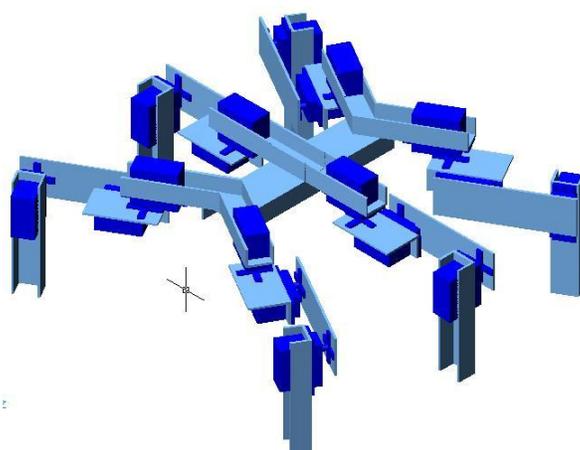


Figura 5.2: Vista en perspectiva del prototipo en AutoCAD.

Soporte Central

En el desarrollo del soporte principal se hace uso de la similitud en la que los insectos tienen su tórax, y en la postura que mantienen su par de patas traseras en ángulos variados que van desde aproximadamente 10 grados a -45 grados medidos con la orientación de las manecillas del reloj y respecto a una línea imaginaria que va de su cuello a su abdomen. En el par de patas centrales, variantes de 45 a -45 grados también en la misma línea imaginaria, mientras su par de patas delanteras mantienen ángulos que van desde 30 a -45 grados, también en la misma línea imaginaria, para este caso se emplea un ángulo de 30 grados para el insecto robot para mantener en su tórax un centro de gravedad en equilibrio y para mantener una estructura en equilibrio se hace uso de la simetría en el soporte principal del robot, así, manteniendo un equilibrio sencillo tanto para estática, cinemática, y dinámica. También se mantiene simetría tanto en la línea imaginaria del cuello al abdomen del insecto, como en su ortogonal a la mitad del soporte.

Pata

Cada una de las patas del insecto robot es igual en longitud de eslabones, mantiene distancias comunes de los eslabones con respecto a las patas de los insectos, pero mantiene las patas iguales respecto a estos, que en los insectos varían. La igualdad de cada pata en el insecto robot simplificará, en un futuro, el modelado dinámico Figura 5.4.



Figura 5.3: Soporte principal.

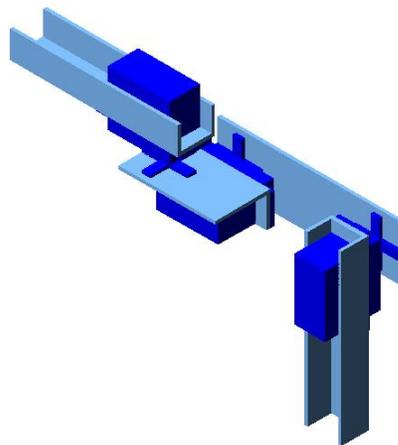


Figura 5.4: Pata del insecto robot.

Primer Eslabón

El primer eslabón es en similitud de un insecto a su coxa, que está articulada con el primer motor, el cual está fijo en el soporte central; este eslabón soporta al segundo motor, una línea imaginaria trazada de la flecha del segundo motor al centro medio del motor es en similitud en el insecto a su trochanter, de forma que, el trochanter en sí está fijo al fémur, para el eslabón el trochanter está incluido en este. Figura 5.5.

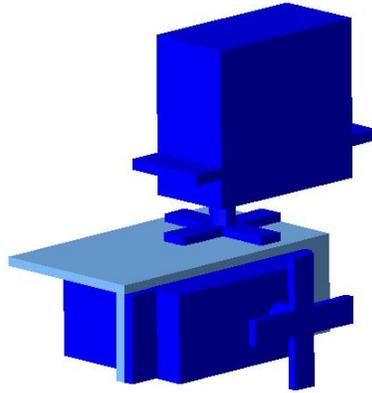


Figura 5.5: Primer eslabón. Primer motor que actúa en eslabón y segundo motor que es soportado por el primer eslabón.

Segundo Eslabón

El segundo eslabón es en similitud de un insecto a su fémur, este está unido al primer eslabón, separado por una distancia respecto a la flecha de la primera articulación, esta separación en los insectos es el trochanter. El segundo eslabón se mantiene unido desde la flecha de la articulación del segundo motor, que es soportado por el primer eslabón, a la flecha de la articulación del tercer motor, que es soportado por el tercer eslabón. El segundo eslabón es, en sí, el más largo respecto al primer y tercer eslabón y no soporta ningún motor. Figura 5.6.

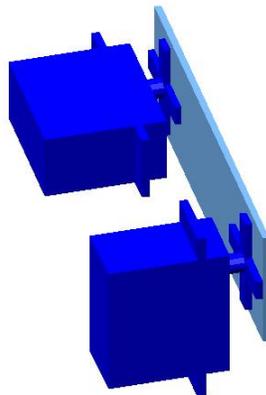


Figura 5.6: Segundo eslabón. Segundo y tercer motor que actúan en él.

Tercer Eslabón

El tercer eslabón es en similitud de un insecto a su tibia, este está unido al segundo eslabón por la flecha de articulación del tercer motor, que está soportado por este mismo, así como el sensor en su parte extrema contraria, este eslabón es el que se mantiene un pivote en su extremo final para caminar. Figura 5.7.

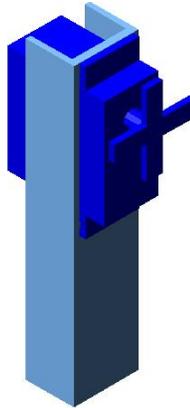


Figura 5.7: Tercer Eslabón. Tercer motor que es soportado por este.

5.4. Rangos de Movimiento

Una de las partes mas importantes en la robótica es hacer uso de los diferentes rangos de movimiento, esto nos permite conocer las diferentes trayectorias y espacio de trabajo en los robots, y así también nos permite saber cual es su alcance, en los robots caminantes, nos permite conocer las capacidades de movimiento, así como su capacidad de velocidad de desplazamiento. También las posibilidades de cambiar la trayectoria y su capacidad de realizar diversas tareas. Para este robot, los rangos de movimiento dependen de la colocación de la flecha y su horn ¹ con el eslabón, y que dependen estos del rango de movimiento de 90^0 del servomotor, así la colocación de los eslabones en su punto cero se cambie en la posición deseada y que esta no exceda en sentido de rotación los rangos de movimiento de construcción, presentados en esta sección.

Para cada pata las distancias del primer, segundo y tercer eslabón son las mismas, de manera que los rangos de movimiento desde el eje de rotación del primer motor, son las mismas, esto nos permitirá en un futuro realizar un mas fácil modelo matemático y cambiar en sus diferentes posiciones los eslabones para diferentes rangos de movimiento, Para el trazo de un rango de libertad, es necesario trazarlo en diferentes planos, en los

¹Pieza de union de la flecha estriada de los servomotores con su respectivo eslabón

que actúan los eslabones y el efector final, para este análisis se realiza en dos planos, para el primer plano se encuentra, que el segundo motor, el segundo eslabón, el tercer motor, tercer eslabón, y actuador final, tienen el mismo plano de rotación, y no así su posición en la que se coloquen. Como se muestra en la Figura 5.8

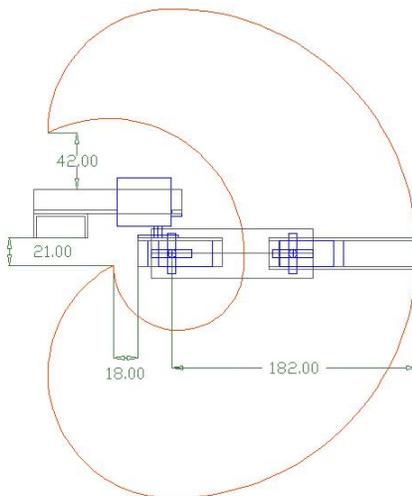


Figura 5.8: Vista lateral. Rango de movimiento del efector final.

La rotación del tercer y segundo eslabón sobre los ejes de los motores da como resultado que el efector final trace una línea envolvente imaginaria, la cual limita un área en la que el efector final tiene rango de posición, como se puede ver en la Figura 5.9.

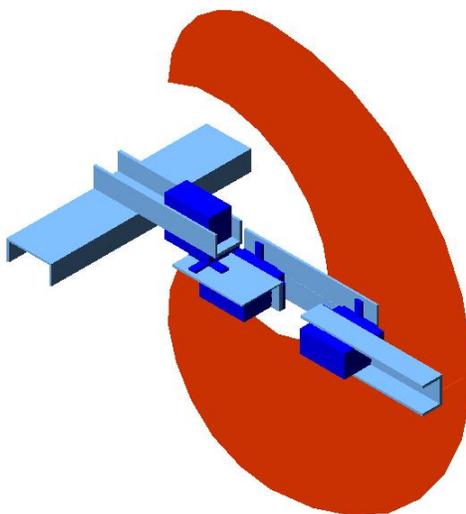


Figura 5.9: Vista tridimensional. Rango de movimiento del efector final en el primer plano.

Para el segundo plano, para que los rangos de movimiento del efector final de cada pata, sean máximos, las dos patas mas cercanas izquierda y derecha de la pata, se colocan

en posición tal que permitan a esta pata rotar lo máximo posible en los límites de la estructura, así permite conocer el alcance de cada pata, de forma que si es simétrica en cada pata en el par de patas, se necesitan conocer únicamente tres rangos de movimiento, la diferencia entre los rangos de movimiento, entre el par de patas laterales en el soporte principal, radica en la colocación del segundo eslabón en el par de patas centrales.

Para el rango de movimientos en la pata central tenemos que la posición de par de patas laterales en el soporte principal se colocan en la siguiente posición, que es la máxima en la estructura del insecto robot, como se observa en la Figura 5.10. El rango de movimiento de la pata central es la máxima rotación en dirección mostrada en la estructura en el segundo plano, en las Figuras 5.11 y 5.12. Para una mejor apreciación del rango de la pata central véase la Figura 5.13.

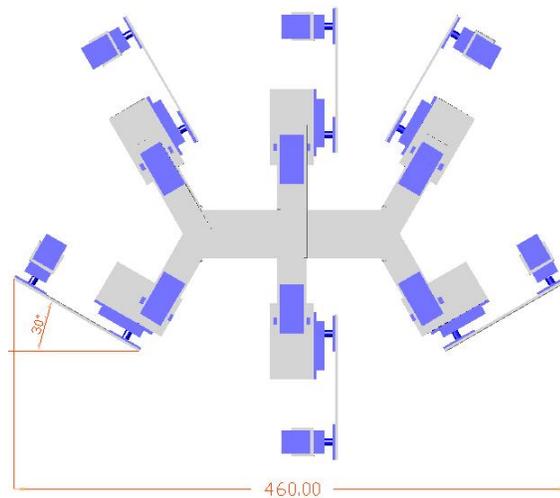


Figura 5.10: Vista tridimensional. Rango de movimiento del efector final en el primer plano.

Para el rango de movimientos en la pata lateral sin colocar los segundos motores en posición contraria se mantienen las patas más cercanas a esta en las siguientes posiciones. Para un máximo rango de movimiento en la estructura del insecto robot, estas son en las Figuras 5.14 y 5.15. Para una mejor apreciación del rango de rotación véase la Figura 5.16.

Para el rango de movimientos en la pata lateral cuando se colocan los segundos motores en posición contraria, el rango máximo en la estructura del robot se observa en la Figura 5.18 y la siguiente máxima posición se aprecia en la Figura 5.17. Para una mejor apreciación del rango de rotación véase la Figura 5.19.

Contemplando que se obtendrá un modelo dinámico y cinemático, el diseño del insecto robot mantuvo una simetría, en un futuro, esto le permitirá realizar tareas que los insectos comunes no realizan. Muchos de los diseños en robots con seis y con ocho patas en la

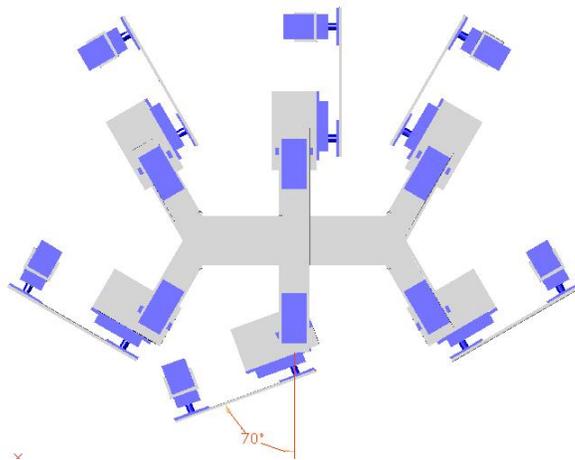


Figura 5.11: Posición maxima en esta dirección de rotación de la pata central en el segundo plano.

actualidad mantienen la simetría estructural para un mejor desempeño de tareas. Para el siguiente capítulo se verá que los controladores se relacionan con la entomología, así, se diseñará el tipo de control electrónico necesario para la comunicación entre las patas y el software de control del prototipo para realizar tareas como el caminar. Para la realización de los dibujos de este capítulo y los detalles de las piezas que se encuentran en el Apéndice A se usó el programa de computadora AutoCAD.

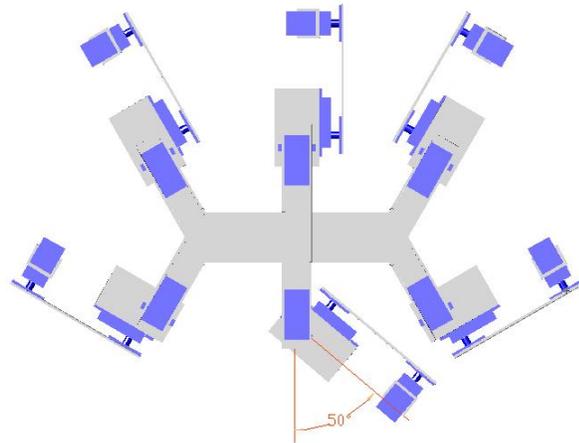


Figura 5.12: Posición maxima en esta dirección de rotación de la pata central en el segundo plano.

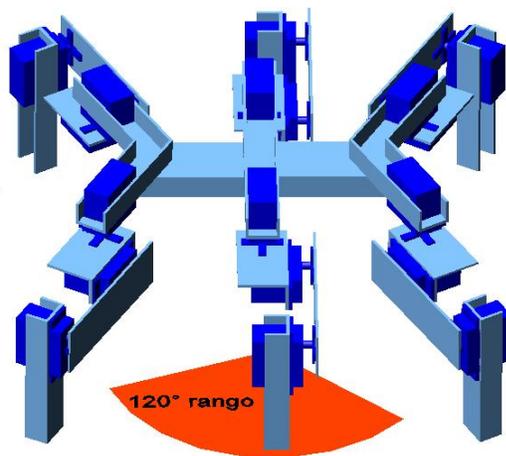


Figura 5.13: Vista tridimensional. Rango de movimiento de la pata central en el segundo plano.

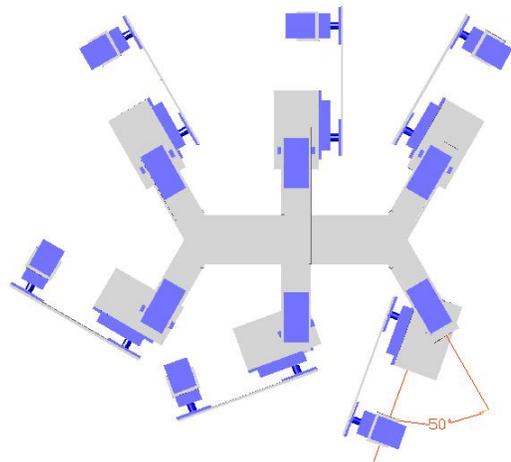


Figura 5.14: Posición maxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.

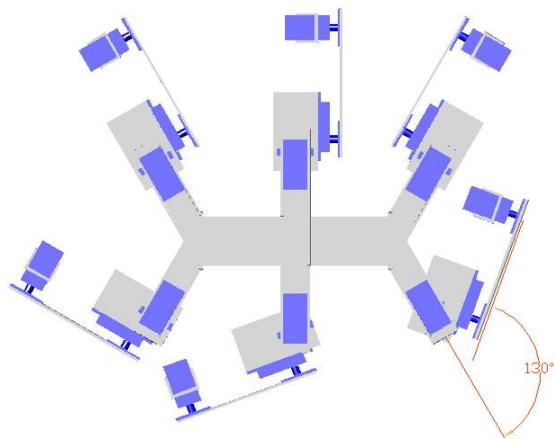


Figura 5.15: Posición maxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.

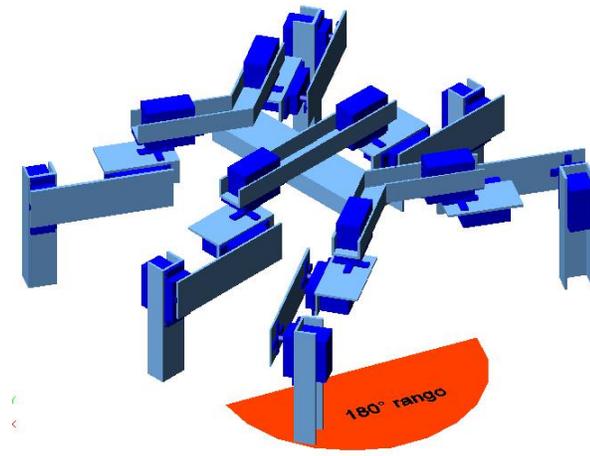


Figura 5.16: Vista tridimensional. Rango de movimiento de la pata en el segundo plano.

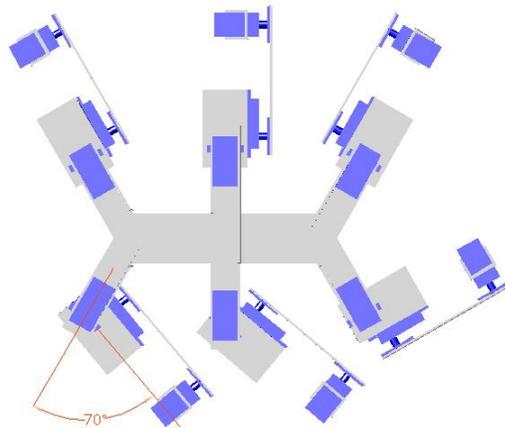


Figura 5.17: Posición maxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.

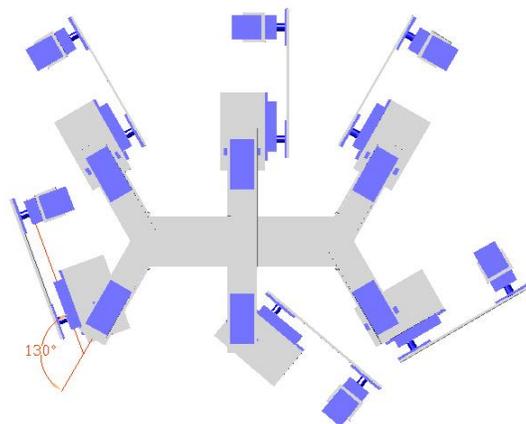


Figura 5.18: Posición máxima en esta dirección de rotación de la pata en el segundo plano.

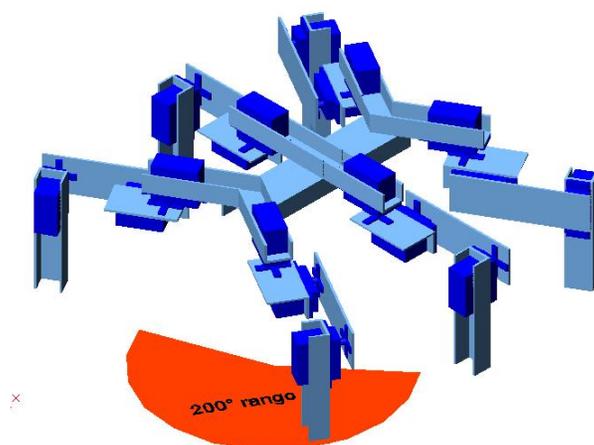


Figura 5.19: Vista tridimensional. Rango de movimiento de la pata central en el segundo plano.

Capítulo 6

Controladores

Para el diseño de los sistemas electrónicos del insecto robot se debe tomar en cuenta el funcionamiento del sistema nervioso de un insecto real. Este capítulo describirá el proceso de diseño de dichos sistemas electrónicos. La organización del capítulo es la siguiente: la primera sección presenta material introductorio donde se incluye una sección que explica la selección de los actuadores, así como algunas de sus características y detalles de su funcionamiento. La segunda sección describirá el proceso de diseño de un sistema de control basado en un datos sobre el sistema nervioso de un insecto.

6.1. Introducción

En esta sección se presenta el proceso de selección de los actuadores para la construcción del insecto robot. Posteriormente se analizará su funcionamiento, esto será de ayuda para diseñar controladores que permitan a una unidad de mando mover los actuadores con el fin de cambiar la posición de los miembros del insecto robot.

6.1.1. Actuadores

Los actuadores son dispositivos capaces de generar un movimiento a partir de energía eléctrica o un gas o fluido a presión. En la robótica comúnmente se usan tres tipos de actuadores:

1. Actuadores eléctricos
2. Actuadores hidráulicos

3. Actuadores neumáticos

Los actuadores eléctricos son aquellos que convierten la energía eléctrica en un movimiento que generalmente es rotatorio. En los actuadores hidráulicos el movimiento rotatorio o lineal es generado por la presión de un fluido. Los actuadores neumáticos utilizan un gas a presión para generar movimiento lineal o rotatorio.

Cada uno de estos actuadores tiene ventajas y desventajas de acuerdo a su uso. Los factores que mas influyen la elección del actuador para el insecto robot son:

1. La relación peso potencia
2. Las dimensiones físicas
3. Facilidad de implementación
4. Precisión

En relación con los puntos anteriores se eligen 3 candidatos, dos de ellos eléctricos y uno neumático, sus ventajas y desventajas se resumen en la tabla 6.1 donde la relación peso-potencia se desea buena, las dimensiones reducidas y finalmente fácil de usar.

La relación peso-potencia de un motor de C.D. es buena si se le compara con la de un motor a pasos cuyo torque es reducido y tiene un peso similar al del motor de C.D. Por otra parte, un actuador neumático tiene un torque elevado con un peso relativamente pequeño.

Existen motores de C.D. y a pasos pequeños al igual que actuadores neumáticos, sin embargo, estos últimos utilizan mangueras para conducir un gas a presión para alimentarlos, este hecho limita su capacidad de implementación en espacios reducidos.

Los motores de C.D. y a pasos requieren solamente de un circuito electrónico de control y otro de potencia simples para su uso a diferencia de los actuadores neumáticos que requieren de válvulas además de los circuitos de control y potencia. Los motores eléctricos usan cables para recibir energía de la fuente mientras que los neumáticos utilizan mangueras.

Por su diseño los motores a pasos pueden rotar solo a posiciones establecidas, a diferencia de los motores de C.D. y actuadores neumáticos que pueden generar un movimiento continuo a lo largo del recorrido de su flecha.

Los resultados favorecen el uso de un motor de C.D.

Tabla 6.1: Ventajas y desventajas de los actuadores propuestos.

Actuador	Relación peso - potencia	Dimensiones	Complejidad del controlador	Precisión
Motor a pasos	Mala	Reducidas	Simple	Mala
Motor de C.D.	Buena	Reducidas	Regular	Buena
Actuador neumático	Buena	Regulares	Regular	Regular

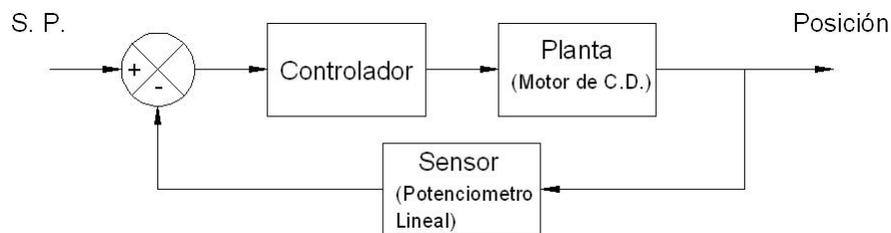


Figura 6.1: Diagrama a bloques de un servomotor.

6.1.2. Servomotores

Los actuadores elegidos tienen la función de mover los diferentes eslabones que conforman las patas del prototipo, para ello, estos actuadores deben mover su flecha en diferentes posiciones de acuerdo al S.P. que reciben y mantener esa posición hasta que se cambie el S.P. Como ya se trató en el ejemplo ??, un motor de C.D. necesita de un controlador para realizar la tarea descrita anteriormente. A este arreglo de motor de C.D. y un control de posición se le denomina *servomotor*, su diagrama a bloques se muestra en la figura 6.1.

Existen varios tipos de servomotores de acuerdo con el tipo de sensor que usan. Uno de los más comunes utiliza un potenciómetro lineal, estos motores son usados comúnmente en robótica y aeromodelismo. En el mercado se encuentran distintos modelos que varían en sus características, sin embargo, casi todos tienen un diseño similar a los que se muestran en la figura 6.2.

Existen numerosas ventajas del uso de estos actuadores para el diseño del insecto robot,



Figura 6.2: Servomotor estándar.

la primera es que las dimensiones del actuador son reducidas permitiendo que varios actuadores se coloquen muy cerca sin que puedan interferir el movimiento de los demás. Otra gran ventaja es el hecho de que el controlador en lazo cerrado está incluido en su diseño, es decir, que a los actuadores solo se les indica el S.P.¹ y buscarán su posición inmediatamente. Esta característica simplifica enormemente el diseño del circuito electrónico de control.

El S.P. de los servomotores consiste en una señal eléctrica periódica con una forma de onda cuadrada y modulada en el ancho del semiciclo “on” (T_1) como se muestra en la figura 6.3 y que es descrita por la ecuación 6.1. Donde T_1 corresponde al tiempo de duración en “on” y que puede variar en el intervalo de 1 a 2 milisegundos, mientras que T_2 puede variar entre 10 y 20 milisegundos. Así, la posición de la flecha del motor es proporcional a la duración del pulso positivo T_1 y no depende de la duración del tiempo en cero T_2 .

De igual forma la flecha tiene también un rango de posiciones limitado por el diseño del servomotor. Si se mide un ángulo desde un punto cualquiera de la flecha con respecto a un punto cualquiera de un objeto fijo con respecto a la carcasa del motor, este ángulo puede variar desde 0° a 180° .

Todo lo anterior se puede resumir en la tabla 6.2 donde se dan tres ejemplos de posiciones obtenidas con entradas diferentes, cuando la señal de entrada tiene un ancho del pulso positivo con duración de un milisegundo la flecha del servomotor adoptará la posición extrema izquierda, cuando la duración del pulso positivo sea de 1.5 milisegundos la flecha se posiciona a la mitad del recorrido; finalmente, cuando la señal tenga un ancho de pulso positivo igual a 2 milisegundos la flecha adopta la posición extrema derecha.

¹Set point.

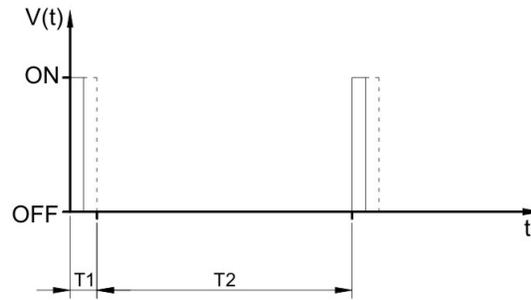


Figura 6.3: Señal de set point de los servomotores.

$$V(t) = \begin{cases} V_{ON} & 0 < t < \mathbf{T}_1 \\ V_{OFF} & \mathbf{T}_1 < t < \mathbf{T}_2 \end{cases} \quad (6.1)$$

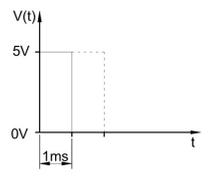
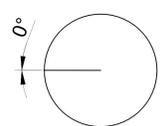
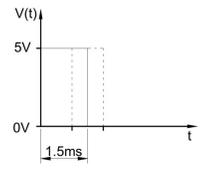
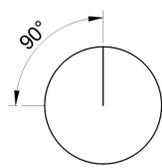
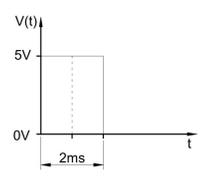
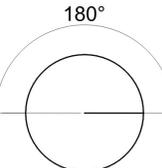
Ya que se ha descrito detalladamente las características y el funcionamiento de los actuadores elegidos el siguiente paso es el diseño de sistemas electrónicos que permitan su uso. El proceso de diseño de los sistemas electrónicos mencionados anteriormente se desarrolla en la siguiente sección.

6.2. Sistema Electrónico de Control

Los insectos al igual que todos los animales que utilizan patas como medio de locomoción llevan a cabo diferentes procesos para ejecutar los movimientos coordinados que les permiten caminar como ya se trató en el capítulo 1. Se sabe también que estos procesos no están centralizados, es decir, no se realizan solamente en una área específica del cerebro, sino que, órganos como lo son los ganglios torácicos realizan funciones básicas del caminar sin ayuda del cerebro (capítulos 1 y 3). Lo anterior es algo para considerar si se realiza un robot basado en la naturaleza.

En el caso del insecto robot, un sistema superior debe desempeñar funciones que sean relativas al comportamiento de él como tal, ya sea moverse hacia adelante y después hacia la derecha para seguir una trayectoria o esquivar un objeto, pero no debe ocuparse en realizar operaciones básicas de los dispositivos como son: cálculos para encontrar el ancho de pulso específico para cada uno de los motores de una pata con el fin de que esta se levante o realizar una lectura y codificación de las señales que envían los sensores.

Tabla 6.2: Posición de la flecha del servomotor para diferentes señales de S.P.

Señal de S.P.	Posición de la Flecha
 <p>A graph showing a square pulse signal V(t) versus time t. The pulse has a constant amplitude of 5V and a duration of 1ms. The y-axis is labeled V(t) with 5V and 0V markers. The x-axis is labeled t with a 1ms scale bar.</p>	 <p>A diagram of a circle representing a servo motor's rotation. A horizontal line from the center to the right edge represents the arrow's position. An arc indicates a 0° angle from the horizontal reference line.</p>
 <p>A graph showing a square pulse signal V(t) versus time t. The pulse has a constant amplitude of 5V and a duration of 1.5ms. The y-axis is labeled V(t) with 5V and 0V markers. The x-axis is labeled t with a 1.5ms scale bar.</p>	 <p>A diagram of a circle representing a servo motor's rotation. A vertical line from the center to the top edge represents the arrow's position. An arc indicates a 90° angle from the horizontal reference line.</p>
 <p>A graph showing a square pulse signal V(t) versus time t. The pulse has a constant amplitude of 5V and a duration of 2ms. The y-axis is labeled V(t) with 5V and 0V markers. The x-axis is labeled t with a 2ms scale bar.</p>	 <p>A diagram of a circle representing a servo motor's rotation. A horizontal line from the center to the left edge represents the arrow's position. An arc indicates a 180° angle from the horizontal reference line.</p>

En cuestión de programación el diseño basado en una arquitectura no centralizada implica que el usuario de este prototipo didáctico que desee implementar algoritmos de inteligencia artificial no tenga que incluir en su programa código para manejar dispositivos específicos del robot.

6.2.1. Diagrama a Bloques del Sistema de Control

Para el diseño de un sistema de control electrónico para los actuadores del insecto robot se toma en cuenta el funcionamiento y la anatomía del sistema neurosensorial de un insecto real descrito en el capítulo 3. En la figura 4.10 se observa la anatomía de este sistema y se pueden identificar las partes principales de cada tagma. Como ya se mencionó anteriormente, solo se reproducirá el tagma correspondiente al tórax ya que es el encargado de la locomoción del insecto, entonces, las partes del sistema neurosensorial que se encuentran en el abdomen y la cabeza, excepto por el cerebro, no se construirán.

Las partes restantes que se diseñan y construyen son: el cerebro y los ganglios torácicos.

Para determinar en que componentes o tecnología estarán basados el cerebro y los ganglios electrónicos del insecto robot se debe tener en cuenta que cada uno de estas cuatro unidades debe cumplir con las siguientes características:

- Debe comunicarse de forma rápida y sencilla con las otras unidades.
- Debe poseer múltiples entradas y salidas.
- Debe poder actualizarse posteriormente para incluir características y funciones nuevas.

Además se debe de considerar el hecho de que a diferencia de los ganglios, el cerebro, tendrá que llevar a cabo una mayor cantidad de tareas y tener la posibilidad de que cada una de estas tareas se pueda programar y monitoriar con facilidad.

Evaluando todo lo anterior, se propone un diseño basado en una computadora que realiza las funciones del cerebro, un conjunto de tres microcontroladores que conforman los ganglios electrónicos del insecto robot y un cuarto microcontrolador que tiene las funciones de leer y codificar las señales de los sensores. Las cinco unidades se comunican entre sí con un sistema serial asíncrono de ocho bits. La computadora se comunica con los ganglios usando una sola línea (la misma para los tres ganglios), usa esta línea para mandar la posición de cada actuador y los ganglios calculan y generan las señales de PWM necesarias para que el actuador se posicione donde la computadora especificó. Por otra parte, el microcontrolador cuatro y una interfaz serial constituyen una red de interneuronas, el microcontrolador 4 recibe las señales de los diferentes sensores y las manda a la interfaz serial y esta al cerebro de forma codificada por otra línea. Todo lo descrito anteriormente se puede observar en la figura 6.4, donde, en la parte derecha se muestra el diagrama a bloques del sistema electrónico del insecto robot comparado con la parte izquierda en donde se muestra la anatomía de la cabeza y tórax de un insecto real.

En las secciones posteriores se describe detalladamente el diseño de cada una de las unidades electrónicas para el sistema de control del insecto robot.

6.3. Diseño de las Unidades Electrónicas de Control

6.3.1. Ganglios Electrónicos

Como ya se trató en el capítulo 3, hay tres ganglios torácicos, el protorácico, mesotorácico y metatorácico. Cada uno de ellos está encargado de generar señales eléctricas

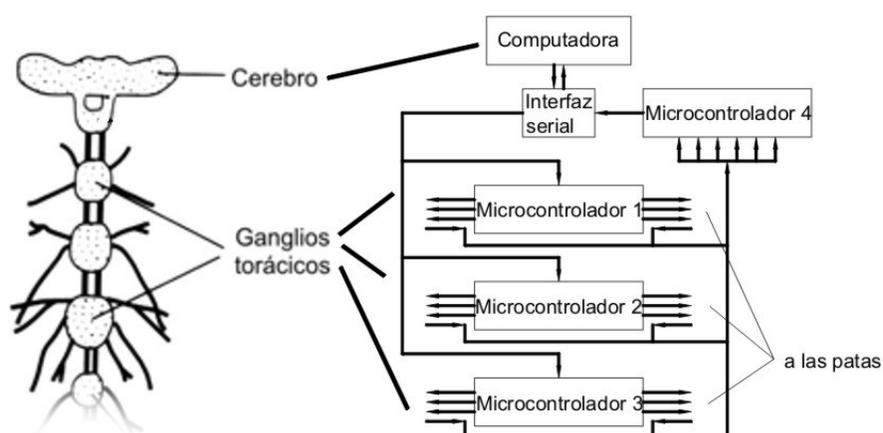


Figura 6.4: Diagrama a bloques de los sistemas electrónicos del insecto robot.

para estimular los músculos de un par de patas del insecto. Estas señales se generan aunque el cerebro esté ausente.

En el caso del insecto robot las unidades que tienen una función similar a la de los ganglios de un insecto, se denominan “ganglios electrónicos”. La función cada ganglios electrónico es generar seis señales con forma de onda cuadrada y moduladas en ancho de pulso en base a tramas de ocho bits que reciben desde el puerto serial de una computadora. Cada una de estas seis señales indica el S.P. de un servo motor. Las tramas de información sobre la posición de los motores pueden estar ausentes y sin embargo estas unidades son capaces de indicar el S.P. a los servo motores.

Circuito Electrónico

El diseño de cada ganglio está basado en un microcontrolador 16F688 de la marca “Microchip”, el cual ofrece numerosas ventajas de diseño como son: facilidad de uso, dimensiones físicas reducidas, requiere un mínimo de componentes adicionales. El circuito de un ganglio electrónico tiene una entrada serial y seis salidas digitales.

La entrada serial esta conectada a un dispositivo interno del microcontrolador llamado USART ², el cual constituye una de las interfaces seriales mas usadas y el uso mas común que se le puede dar es el de comunicar al microcontrolador con el puerto serial de una computadora usando el protocolo RS232. La función principal del USART es transmitir o recibir datos seriales. Su operación se puede dividir en dos categorías: operación síncrona y operación asíncrona. La operación síncrona una una línea de reloj y otra de datos mientras que la asíncrona usa una línea de datos y es capaz de trabajar sin la línea de reloj. Existen

²Siglas de “Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter”

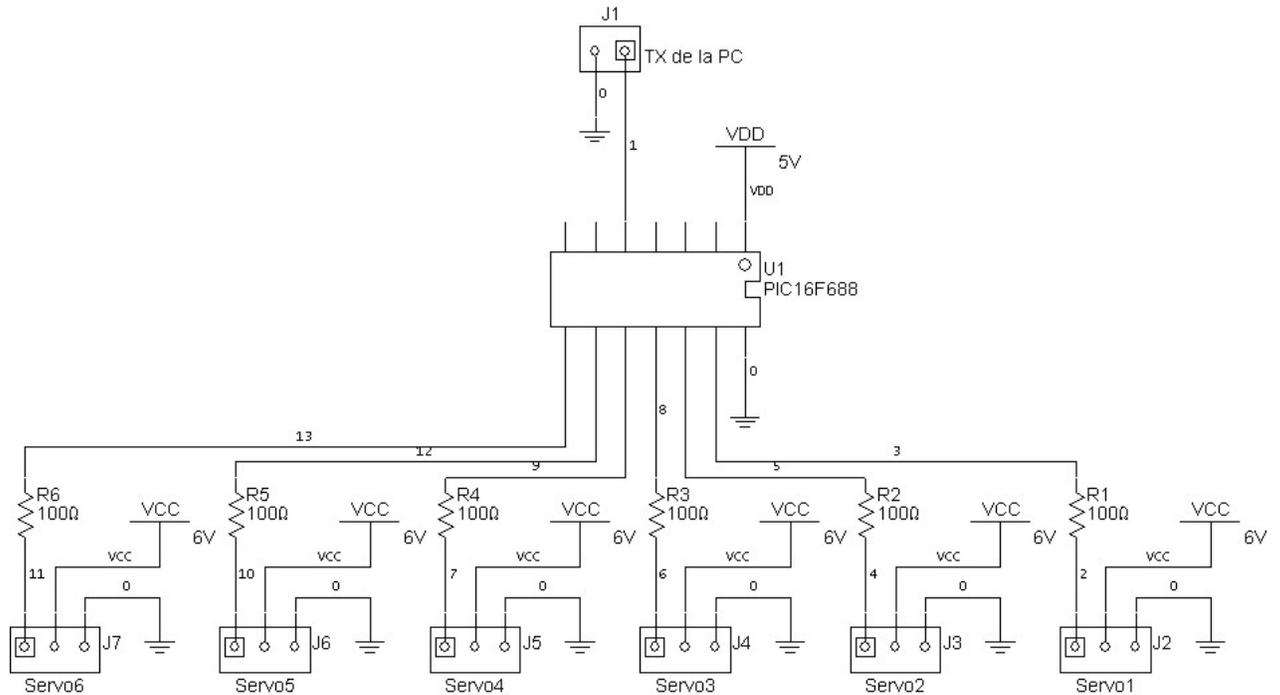


Figura 6.5: Circuito electrónico de un ganglio.

grandes diferencias entre ambos modos de operación pero en este circuito se usa el modo asíncrono por ser ideal para trabajar junto con el puerto serial de una computadora.

Las salidas están conectadas a los motores por medio de una resistencia que limita la corriente, teóricamente esta resistencia no es necesaria porque la entrada del S.P. del motor tiene una impedancia muy alta pero en la práctica es útil para reducir el consumo de energía.

Estas salidas son pines de entrada o salida de propósito general del microcontrolador. Cada uno de estos pines de propósito general puede tener dos estados: cero y uno y el estado de cada pin puede cambiarse en el código de programa del microcontrolador. Cuando un pin tiene estado “cero” significa que este pin está conectado a tierra, mientras que cuando está en “uno” tiene un potencial de cinco volts con respecto a la tierra.

El diagrama electrónico descrito anteriormente se observa en la Figura 6.5. Se observa que el microcontrolador se alimenta con cinco volts (V_{CC}), mientras que el voltaje de los motores es de seis volts (V_{DD}).

Programa del Microcontrolador

El programa del microcontrolador tiene dos funciones principales, la primera de ellas es recibir los datos desde el puerto serial de la computadora e interpretarlos, la segunda función es la de generar seis señales con forma de onda cuadrada las cuales podrán cambiar su ancho de pulso positivo en base a la información recibida.

La función de recibir datos está basada en el USART, este dispositivo transmite o recibe ocho bits en cada trama. Si se tuviera un solo motor por microcontrolador, el valor recibido se pondría a disposición de una función que generaría un ancho de pulso correspondiente. En este caso cada microcontrolador maneja tres servomotores de una pata izquierda y otros tres de una pata derecha, por lo que se realiza un algoritmo que ocupe dos transmisiones de 8 bits, dos bytes, un byte indica el motor al que afectará el siguiente byte, que es el que indica la posición.

Lo anterior implica que el algoritmo reciba datos en conjuntos de dos bytes. En teoría esto es posible y fácil de programar, si embargo, en la práctica, este algoritmo es propenso a tener errores por el hecho de que si se genera una recepción accidental (por un error en el código de la computadora o por ruido presente en la línea) se perdería un orden en la secuencia motor-posición, este error repercutiría en todas las transmisiones posteriores a la que tuvo el error. Para corregir este problema se implementa un algoritmo adicional que se activa cuando se recibe un primer byte, este algoritmo se encarga de esperar el segundo byte pero solo por un tiempo limitado, si el segundo byte no llega, el algoritmo sale de la rutina y espera un primer carácter de nuevo. En el caso de recibir el segundo byte a tiempo, el programa continua una rutina que permitirá entregar el valor de posición recibido a la variable del PWM correspondiente.

La sección siguiente del programa de recepción es la encargada de direccionar los datos recibidos hacia las variables que contienen el ancho de pulso de cada motor. Esto se logra por la secuencia de comparaciones mostrada en la Figura 6.7. Esta parte del código es diferente en cada uno de los ganglios, ya que el primero maneja los motores del 0 al 5, el segundo los motores del 6 al 11 y el tercero los motores del 12 al 17. Esta numeración se realiza porque los tres ganglios escuchan la misma línea que viene del puerto serial de la computadora, así cuando la computadora envíe los comandos necesarios para que se mueva un motor correspondiente a un ganglio, los tres ganglios escucharán pero solo uno responderá realizando el cambio de posición del motor. Cuando esta sección del programa de recepción de datos finalice, el programa esperará un nuevo par de bytes.

La segunda función de los ganglios electrónicos es generar los canales de PWM. Muchos microcontroladores incluyen PWM's, pero en la mayoría de los casos solo son uno o dos y para esta aplicación se necesitan seis por lo que se implementan por medio de software. Esto se realiza con un algoritmo que está basado en el uso de interrupciones generadas por un temporizador. El temporizador es un dispositivo que permite al programador generar

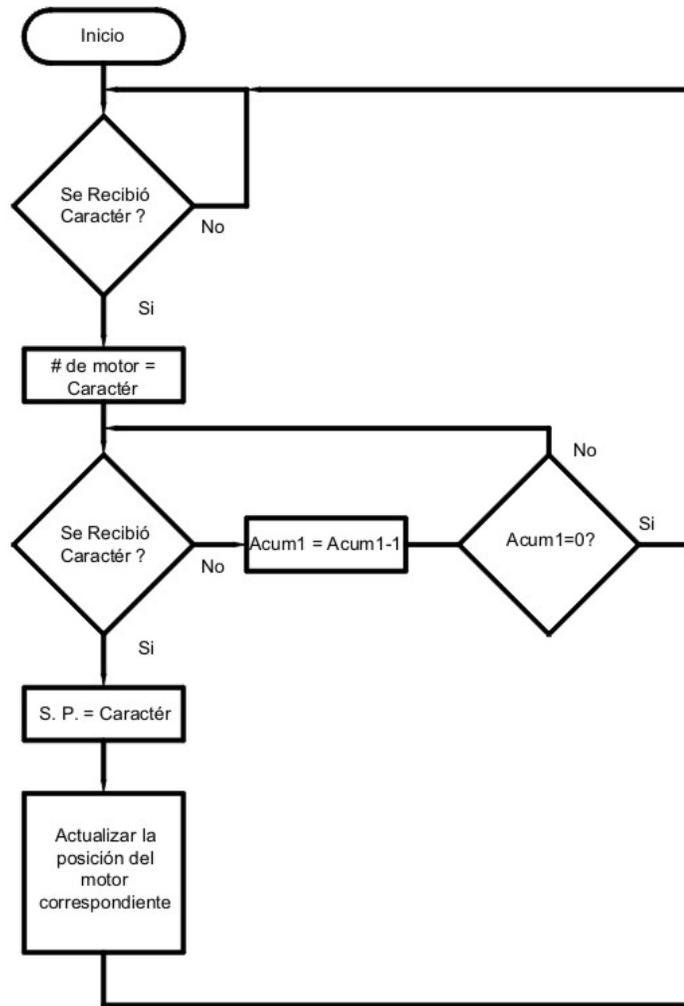


Figura 6.6: Diagrama de flujo del algoritmo de recepción de los ganglios.

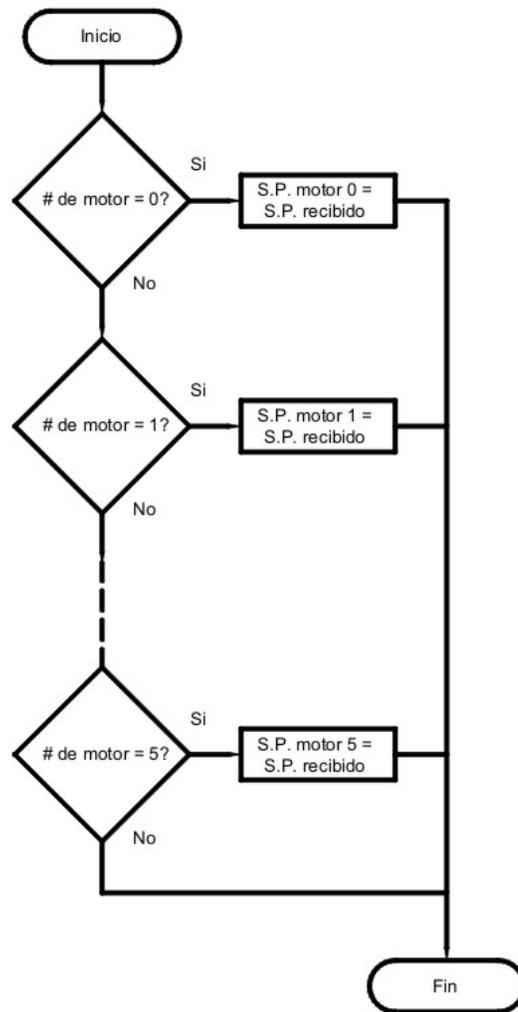


Figura 6.7: Diagrama de flujo del algoritmo de selección de motor.

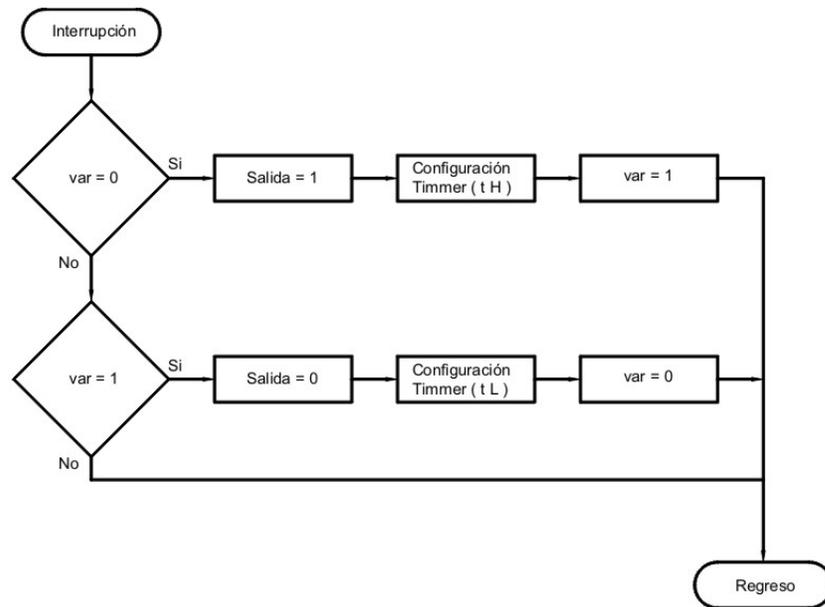


Figura 6.8: Diagrama de flujo del algoritmo de para generar un canal de PWM.

un evento después de un intervalo de tiempo exacto, el cual depende de la velocidad del reloj del microcontrolador y algunas variables de control.

La Figura 6.8 muestra el algoritmo para generar un canal de PWM que se ejecuta cada que el timer genera una interrupción. Su funcionamiento es el siguiente: este programa está encargado de cambiar el valor de una salida digital a intervalos específicos. Cuando el tiempo del timer se agota, se genera una interrupción, esta lee el estado de una variable de control, si esa variable contiene un valor “cero” la salida digital al igual que la variable de control se cambian a “uno”, y se configura el timer para que ejecute una interrupción después de un intervalo de tiempo equivalente al tiempo T_{ON} de la señal PWM; en el caso contrario, la variable y la salida digital están en “uno” y se vuelven “cero” y el timer se configura para que ejecute una interrupción después de un tiempo equivalente a T_{OFF} . Al final de cada caso el programa regresa a la rutina para recibir datos descrita anteriormente.

El algoritmo anterior es muy simple y para lograr los seis canales de PWM simplemente se repite seis veces. De forma que el microcontrolador está multiplexando las señales con respecto al tiempo como se muestra en la Figura 6.9.

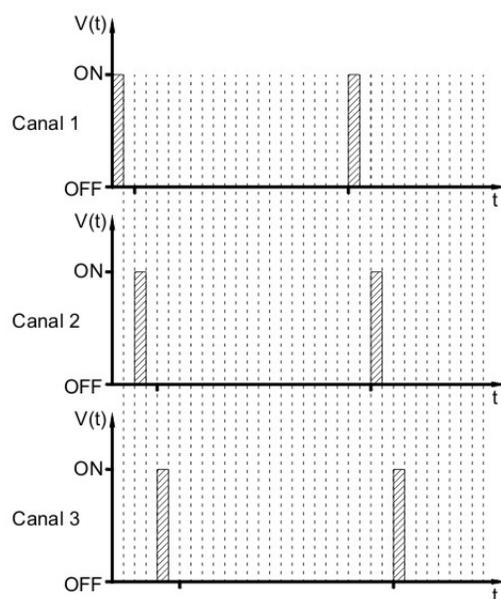


Figura 6.9: Multiplexaje de los primeros tres canales de PWM.

6.3.2. Interfaz Serial

La interfaz serial tiene como función adaptar los voltajes que utilizan la computadora y los microcontroladores con el fin de que puedan comunicarse entre sí.

El puerto serial de la computadora utiliza una codificación binaria de datos denominada *código de nivel de no retorno a cero* ó NRZ ³; la transmisión del símbolo 1 se realiza emitiendo un pulso de tensión constante $+V$ y la transmisión de un símbolo 0 con la emisión de un pulso de tensión de nivel $-V$ como se muestra en la Figura 6.10 a). El puerto serial de los microcontroladores opera con niveles de voltaje diferentes, para indicar un 1 se emite un pulso de valor $+V$ y para emitir un cero un pulso de nivel 0 como se muestra en la Figura 6.10 b).

En el mercado existes numerosos circuitos que ofrecen solución a este problema. El circuito que se usa en el insecto robot como interfaz serial es el ST232. Este circuito incluye cuatro canales seriales, dos canales de transmisión y dos de recepción, no requiere de una alimentación de voltaje simétrica y cumple con los estándares de comunicación EIA/TIA-232 y V.28.

³Siglas en inglés de “non return to zero”

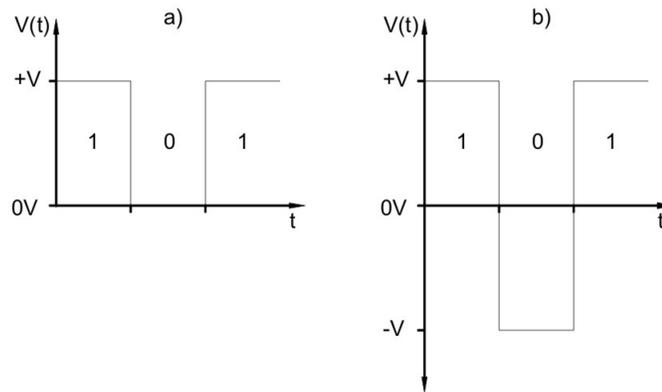


Figura 6.10: Códigos seriales. a) Código NRZ del puerto serial de una PC. b) Código del puerto serial de un microcontrolador Microchop.

Circuito Electrónico

El uso del circuito integrado ST232 tiene como ventaja principal que el circuito de la interfaz electrónica tiene pocos componentes adicionales. El circuito completo consta de el circuito integrado ST232 y cuatro capacitores, estos últimos se utilizan para generar voltajes de $12V$ y $-12V$ a partir del voltaje de alimentación del circuito integrado que es de $5V$. El circuito de la interfaz serial se muestra en la Figura 6.11.

6.3.3. Sistema Sensorial

Los sensores que incluye el prototipo son un conjunto de contactores ubicados uno en cada pata de forma que detectan si esta está o no en contacto con el suelo. Cada uno de estos contactores está conectado a un microcontrolador, cuya única función es leer el estado de cada sensor y codificarlo de forma serial para enviarlo a la computadora.

Circuito Electrónico

Por su construcción, los contactores son sensores digitales, pueden indicar solo dos estados, “hay contacto con el suelo” o “no hay contacto con el suelo”, por lo tanto el microcontrolador solo necesita leer uno de sus puertos paralelos y enviarlos al puerto serial (USART) a intervalos de tiempo regulares.

Cada contactor necesita de una resistencia conectada a tierra para asegurar que cuando esté en estado abierto el microcontrolador lea un “cero”. El microcontrolador solo necesita una alimentación de $5V$. El circuito se muestra en la Figura 6.12.

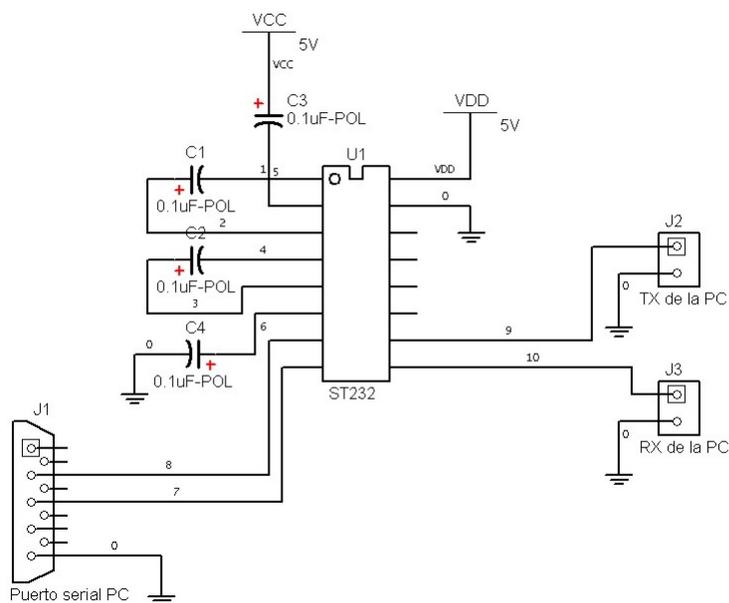


Figura 6.11: Circuito electrónico de la interfaz serial.

Los sistemas de control que se describieron se diseñaron con el fin de que puedan modificarse en el futuro por medio de software. Esto puede ser útil para agregar funciones al insecto robot e incluso dotarlo de cierta autonomía. En el diseño también se buscó hacer cada etapa de forma sencilla para que puedan construirse con dimensiones reducidas y poco peso para que no influyan demasiado en el comportamiento dinámico del prototipo.

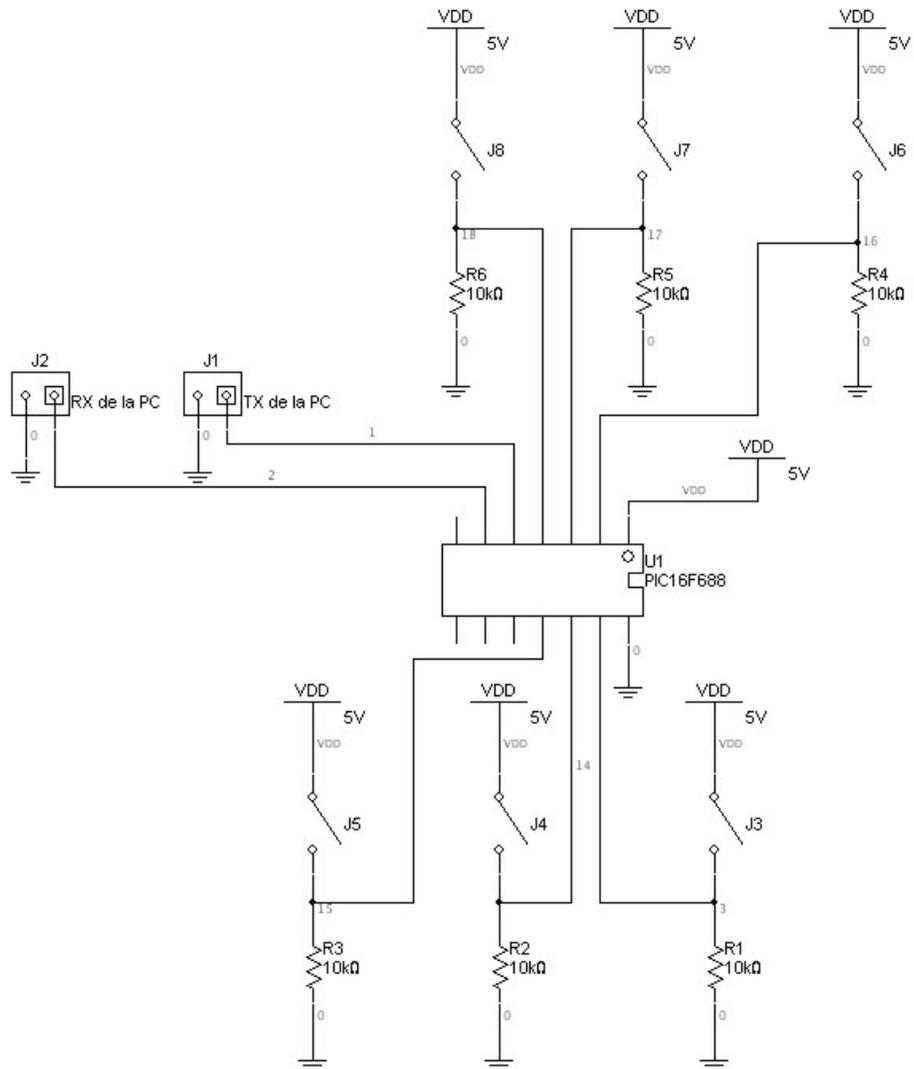


Figura 6.12: Circuito electrónico del sistema sensorial.

Capítulo 7

Software de Control

7.1. Introducción

En este capítulo se van a incluir algunos conceptos básicos como son: software, programación, lenguaje de programación así como una pequeña introducción del lenguaje de programación usado para desarrollar el software del insecto robot.

La organización de este capítulo se da de la siguiente manera: La primera sección presenta una introducción de los conceptos básicos ya mencionados antes. La segunda sección es acerca de Visual Basic, el lenguaje de programación usado para la manipulación del insecto robot. La tercera sección hace referencia mas en concreto a los diagramas de flujo y algunas partes del código y muestra la imagen del programa una vez que está ejecutándose. El código del programa completo estará en un apéndice al final de este trabajo.

7.1.1. Software

El **software**, también conocido como programática o equipamiento lógico, es el conjunto de programas que pueden ser ejecutados por el hardware para la realización de las tareas de computación a las que están destinadas.

El término software fue usado por primera vez en 1957 por John W. Turkey, ingeniero en ciencias de la computación. Surge por analogía con la palabra hardware, el sustrato físico donde se ejecuta el software.

Probablemente la definición más formal de software es la atribuida a la IEEE en su estándar 729: la suma total de los programas de cómputo, procedimientos, reglas [,] doc-

umentación y datos asociados que forman parte de las operaciones de un sistema de cómputo (Ver IEEE Std 729-1993, IEEE Software Engineering Standard 729-1993: Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE Computer Society Press, 1993).

7.1.2. Programación

Se llama **programación** a la creación de un programa de computadora, un conjunto concreto de instrucciones que una computadora puede ejecutar. El programa se escribe en un lenguaje de programación, aunque también se puede escribir directamente en lenguaje de máquina, con cierta dificultad. Un programa se puede dividir en diversas partes, que pueden estar escritas en distintos lenguajes.

7.1.3. Lenguaje de Programación

Un lenguaje de programación es una técnica estándar de comunicación que permite expresar las instrucciones que han de ser ejecutadas en una computadora. Consiste en un conjunto de reglas sintácticas y semánticas que definen un programa informático.

Un lenguaje de programación permite especificar a un programador de manera precisa sobre qué datos debe operar una computadora, cómo deben ser almacenados y transmitidos dichos datos y qué acciones debe tomar bajo una amplia gama de circunstancias. Todo esto, a través de un lenguaje que intenta estar relativamente próximo al lenguaje humano o natural tal como sucede con el lenguaje léxico.

El lenguaje de programación usado para la manipulación del insecto-robot es Visual Basic.

7.2. Software de control del Insecto Robot

El diseño de aplicaciones ha cambiado drásticamente en los últimos años y consecuentemente los estilos de programación. De una programación secuencial se pasó a una programación modular, para llegar a una programación estructurada con muy buenos resultados. A partir de la programación estructurada los esfuerzos se centraron en potenciar la modularidad y la reutilización del código, lo que condujo a la programación orientada a objetos que se complementa con una programación basada en componentes de software. Pero que los estilos hayan cambiado, no significa que el último elimine a los anteriores; al contrario, se apoya en los anteriores.

7.2.1. Visual Basic

Visual Basic es el lenguaje de programación más sencillo que permite crear aplicaciones para Windows. Este lenguaje soporta la abstracción, encapsulación, polimorfismo y reutilización de código.

Los objetos de Visual Basic están encapsulados; es decir, contienen su propio código y sus propios datos. Dichos objetos de Visual Basic tienen propiedades, métodos y eventos. Las propiedades son los datos que describen un objeto. Los eventos son hechos que pueden ocurrir sobre un objeto. Un método agrupa el código que se ejecuta en respuesta a un evento.

Al conjunto de propiedades y métodos se le llama interfaz. Además de su interfaz predeterminada, los objetos pueden implementar interfaces adicionales para proporcionar polimorfismo. El polimorfismo permite manipular muchos tipos diferentes de objetos sin preocuparse de su tipo.

La ventaja principal de este lenguaje de programación es su sencillez para programar aplicaciones de cierta complejidad para Windows. Su desventaja es la necesidad de archivos adicionales además del ejecutable y cierta lentitud en comparación con otros lenguajes.

Hoy en día este último factor es cada vez menos determinante debido a la gran capacidad de las computadoras de última generación.

Debido a la ventaja antes mencionada, se utilizó Visual Basic para la programación del código del insecto robot, ya que este es principalmente un prototipo cuyo propósito es dejarlo a investigaciones futuras, por esta razón se utilizó lo más sencillo, para que en el momento en que alguien desee considerarlo para seguir con una investigación, no exista complicación alguna.

7.2.2. Software de Control

El software de control del insecto robot que se implementó con el fin de realizar pruebas al prototipo se diseñó con el fin de que fuera sencillo de usar y de comprender, así que no tiene características avanzadas, solo realiza tres funciones básicas. Estas funciones son:

1. Enviar datos necesarios para mover los actuadores a posiciones que el usuario desee.
 2. Recibir los datos que envía el conjunto de sensores y mostrarlos al usuario.
-

3. Generar una secuencia de posiciones de los actuadores para que el robot pueda caminar.

La primera de las tareas mencionadas anteriormente permite al usuario especificar la posición de cada uno de los dieciocho actuadores del robot con el fin de realizar ajustes a la posición del mismo, probar controladores, o poder observar las respuestas de los actuadores. La segunda tarea comprende la adquisición de los datos que representan el estado de los sensores, estos datos se visualizan en la ventana del programa. La última tarea consiste en enviar una secuencia de diferentes posiciones del robot las cuales le permiten imitar los movimientos que los insectos utilizan para caminar usando el paso del trípode. La realización y el funcionamiento del software se describe en las secciones siguientes.

7.2.3. Programación del Software de Control

Como ya se mencionó al comienzo de este capítulo visual basic basa su funcionamiento en pequeños paquetes de software que pueden realizar tareas y generar eventos, estos paquetes son llamados controles, así mismo cada uno de estos controles de parámetros de configuración que determinan su comportamiento los cuales se denominan propiedades del control. Al describir la programación usando visual basic comúnmente se usan los términos mencionados anteriormente por lo cual se deben conocer de las propiedades, métodos y eventos de cada control.

Control MSComm

En el Capítulo 6 ya se explicó que el insecto robot se comunica con la computadora usando el puerto serial, usando el canal de transmisión de la computadora para enviar información que permite mover los actuadores y el canal de recepción para adquirir información sobre el estado de los sensores. Visual basic incluye un control que sirve de interfaz entre el puerto serial y el programa, este control se llama **MSComm**.

A continuación se mencionan las propiedades del control MSComm que se usaron para la realización del programa junto con una breve descripción de cada propiedad:

CommPort: Establece y devuelve el número del puerto de comunicaciones.

Settings: Establece y devuelve la velocidad en baudios, paridad, bits de datos y bits de parada en forma de cadena.

PortOpen: Establece y devuelve el estado de un puerto de comunicaciones. El estado puede ser abierto o cerrado.

Output: Escribe una cadena de caracteres en el búfer de transmisión.

Input: Devuelve el contenido del búfer de recepción en forma de cadena.

Control Knob

El control **Knob** permite al usuario ver y especificar el valor a un objeto o variable y además generar un evento que ejecute cierto código cuando cambie alguna de sus propiedades. Estos controles se usan en el software de control con el fin de que el usuario pueda introducir las posiciones manuales de cada actuador y además enviarlas al robot por medio del control MSCComm.

Command Button

El control del **Command Button** o botón de comando, se utiliza para comenzar, para interrumpir o para terminar un proceso. Cuando se presiona, este invoca un comando que se ha escrito en el código.

La mayoría de las aplicaciones de Visual Basic tienen Command Buttons que permiten al usuario presionar el botón para poder realizar la acción. Para esta aplicación, el Command Button se usa para ejecutar el movimiento de las patas del insecto.

Control Timer

El control **Timer** es afectado por el paso del tiempo. Este tipo de control no depende del usuario y puede ser programado para que ejecute acciones a intervalos periódicos de tiempo. Un uso común es comprobar la hora del sistema para ver si en ese momento se tiene que ejecutar alguna tarea. En el caso del insecto robot es usado para determinar el intervalo de tiempo durante el cual se moverá cada pata.

El control Timer tiene una propiedad **Interval** que indica el número de milisegundos que han transcurrido entre un evento del cronómetro y el siguiente. El control Timer sigue recibiendo un evento (llamado evento Timer) a intervalos iguales de tiempo, a menos que esté desactivado.

La propiedad Interval presenta algunas limitaciones que deben ser tomadas en cuenta:

- El intervalo puede estar entre 0 y 64767, o en los dos, lo que quiere decir que incluso el mayor intervalo no puede ser mucho mayor de un minuto.
- El sistema genera 18 pasos de reloj por segundo, eso significa que aunque la propiedad Interval se mide en milisegundos, la precisión real del intervalo no es mayor que una decimoctava parte de segundo.

Para inicializar el control Timer hay que tener en cuenta dos propiedades principales:

Enabled: Si se quiere que el cronómetro empiece a funcionar en cuanto el formulario se cargue, se establece esta propiedad a **True**. En caso contrario, se deja la propiedad establecida en **False**. En este último caso puede que otro evento externo sea el que inicie el funcionamiento del cronómetro, como hacer click en un botón de comando.

Interval: Esta propiedad establece el número de milisegundos transcurridos entre los eventos Timer.

El evento Timer es periódico. La propiedad Interval no determina la duración sino la **frecuencia**. La duración del intervalo depende de la precisión que deseada. Como existe cierta posibilidad de errores, hay que hacer que la precisión del intervalo sea el doble de la deseada.

7.3. Algoritmo de la Secuencia para Caminar

Como ya se trató en el Capítulo 2 y en el Capítulo 4, los insectos utilizan básicamente dos secuencias de pasos para caminar, la secuencia más simple de estas es la que se conoce como “paso del trípode”. Se implemento esta secuencia en el software de control para comprobar que el prototipo es capaz de desplazarse de forma eficiente.

Analizando esta secuencia se puede dividir cada ciclo completo en seis movimientos básicos de los dos grupos de patas. Estos movimientos son:

1. Movimiento que comprende la elevación del primer grupo de tres patas.
 2. Movimiento hacia atrás del segundo grupo de patas y movimiento hacia adelante del primer grupo de patas.
 3. Movimiento de descenso del primer grupo de patas.
 4. Movimiento de elevación del segundo grupo de patas.
-

5. Movimiento hacia atrás del primer grupo de patas y movimiento hacia adelante del segundo grupo de patas.
6. Movimiento de descenso del segundo grupo de patas.

Estos movimientos se realizan mandando los datos de posicionamiento al insecto como ya se describió en el Capítulo 6.

7.4. Conclusiones y Comentarios

El software de control se implementó con el fin de realizar pruebas y ajustes al prototipo. No incluyó funciones complejas, solo realiza las acciones básicas para poder usar el prototipo. Este software podrá servir de ejemplo para la realización de otra versión que pueda dotar de autonomía al insecto robot usando técnicas de computación inteligente. En el futuro, incluso se puede sustituir a la computadora con otro dispositivo de dimensiones reducidas y que tenga un bajo consumo energético.

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se realizó el diseño, la construcción y el control del primer prototipo de un robot hexápodo que se podrá usar con fines didácticos. También se programó un algoritmo secuencial que representa los movimientos básicos que realiza un insecto al caminar sobre una superficie.

8.1. Conclusiones

A continuación, se describen los aspectos mas relevantes que se desarrollaron en los capítulos donde trató sobre el diseño, la construcción y el control del insecto robot.

En el Capítulo 5 se realizó una comparativa entre varios materiales de construcción de robots usados comúnmente con el fin de elegir uno que cumpliera con las características que se deseaban para la construcción del insecto robot. Se eligió la utilización de perfiles de aluminio por su baja densidad, facilidad de trabajo y disponibilidad. Posteriormente se diseñaron piezas simples para facilitar su manufactura y además reducir la complejidad de un modelo matemático que se podría realizar posteriormente.

En el Capítulo 6 se seleccionaron los actuadores que se usarían en el insecto robot tomando en cuenta características como: la relación peso-potencia, las dimensiones físicas, la complejidad del controlador y la precisión. Se eligió la utilización de servo motores estándar principalmente por sus dimensiones físicas reducidas y su excelente relación peso potencia. Posteriormente, se diseñaron circuitos para controlar los actuadores, estos circuitos están basados en microcontroladores lo que permite que se actualicen en el futuro con nuevos algoritmos. También se diseñó un sistema de adquisición de datos para usar con sensores que se ubicaron en las patas del robot, así como, un sistema de comunicación

basado en el protocolo RS-232.

El Capítulo 7 describe de manera superficial la programación de un software que permitió probar el prototipo, en este software también se programó el algoritmo de movimientos secuencial que permiten que el insecto robot camine de forma similar como lo haría un insecto. La secuencia que se programó es conocida como el “paso del trípode” la cual se trató en el Capítulo 2 y en el Capítulo 4.

8.2. Trabajo Futuro

Las posibilidades de trabajo futuro sobre esta tesis son numerosas, a continuación se describen algunas de ellas.

- **Obtener un modelo matemático del insecto robot.** La obtención de un modelo matemático de este prototipo es una tarea compleja debido a su gran número de grados de libertad. Sin embargo, este modelo serviría para realizar simulaciones o aplicar técnicas de control que requieren de un modelo matemático de la planta.
 - **Diseño de controladores usando técnicas de control modernas.** Los servo motores usados en el insecto robot incluyen un controlador PD lo cual es útil porque los sistemas de control reducen su complejidad, en el futuro se pueden reemplazar estos controladores por algunos que se diseñen usando técnicas de control modernas.
 - **Otorgar autonomía al prototipo.** Sería conveniente dotar al prototipo de un sistema de administración de energía que le permita funcionar con baterías y también agregar comunicación inalámbrica.
 - **Mejorar el sistema sensorial del insecto robot.** Agregar distintos tipos de sensores al prototipo si se desea que pueda desplazarse por un terreno accidentado con eficiencia.
-

Apéndice A

Piezas Mecánicas

El presente apéndice muestra las dimensiones de las piezas del robot, todas las distancias de las piezas se encuentran en milímetros, así como los ejes de rotación.

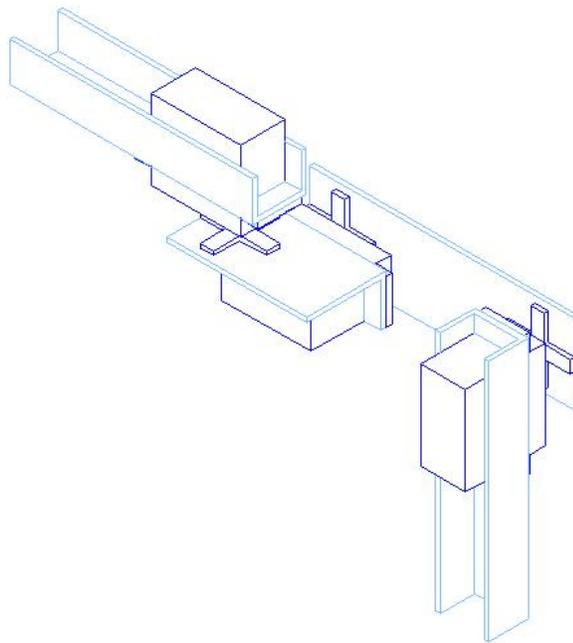


Figura A.1: Vista tridimensional. Pata insecto robot.

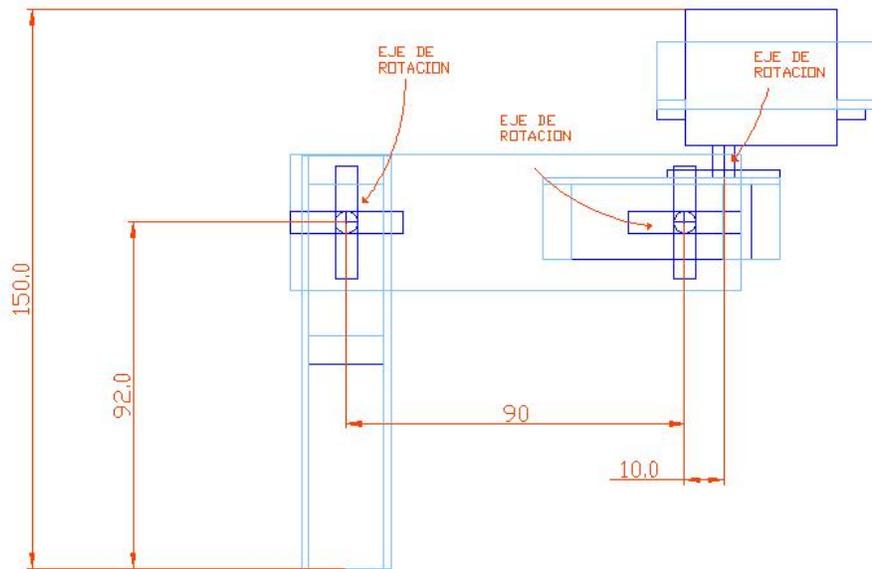


Figura A.2: a) Vista lateral. Distancias entre ejes rotatorios .

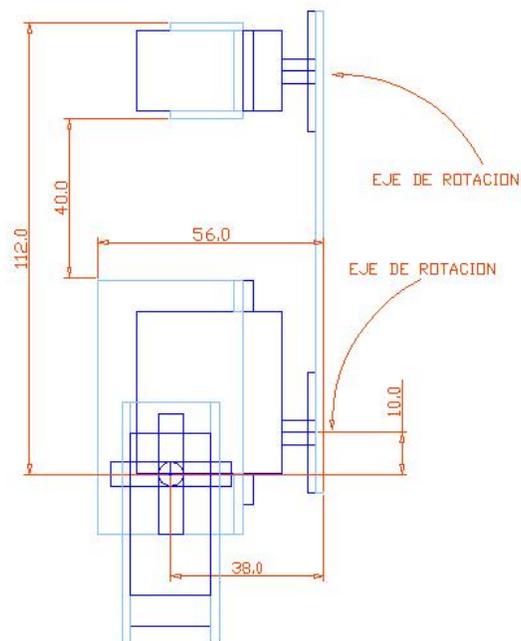


Figura A.3: b) Vista superior. Distancias entre ejes rotatorios.

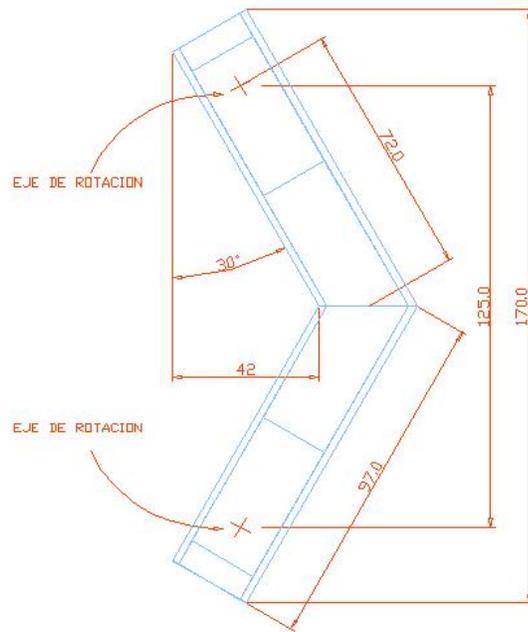


Figura A.4: 1a) Vista superior. Pieza de soporte.

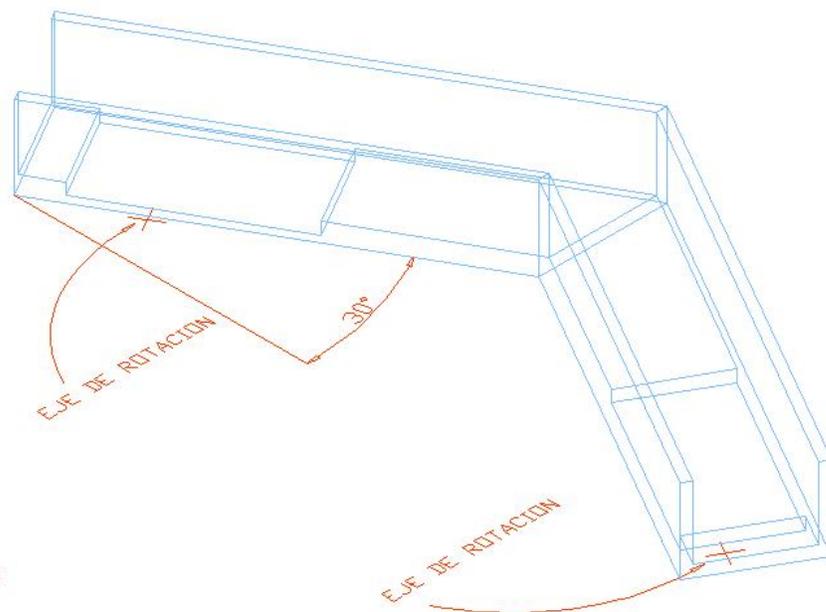


Figura A.5: 1b) Vista tridimensional. Pieza de soporte.

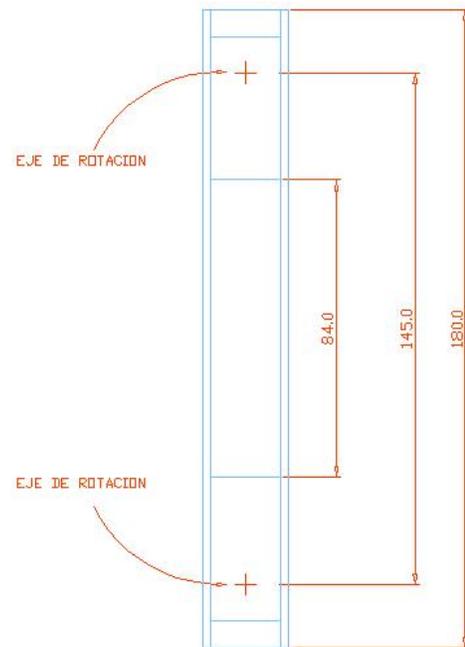


Figura A.6: 2a)Vista superior. Pieza soporte central.

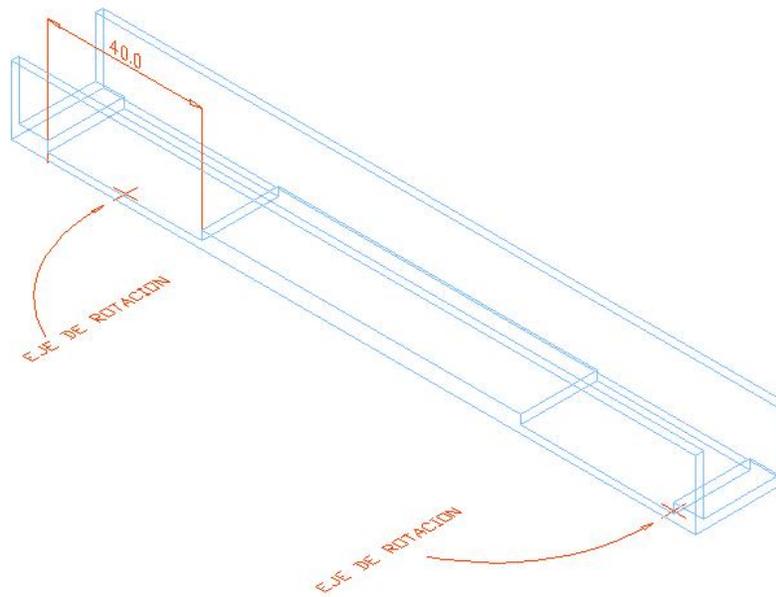


Figura A.7: 2b)Vista tridimensional. Pieza soporte central .

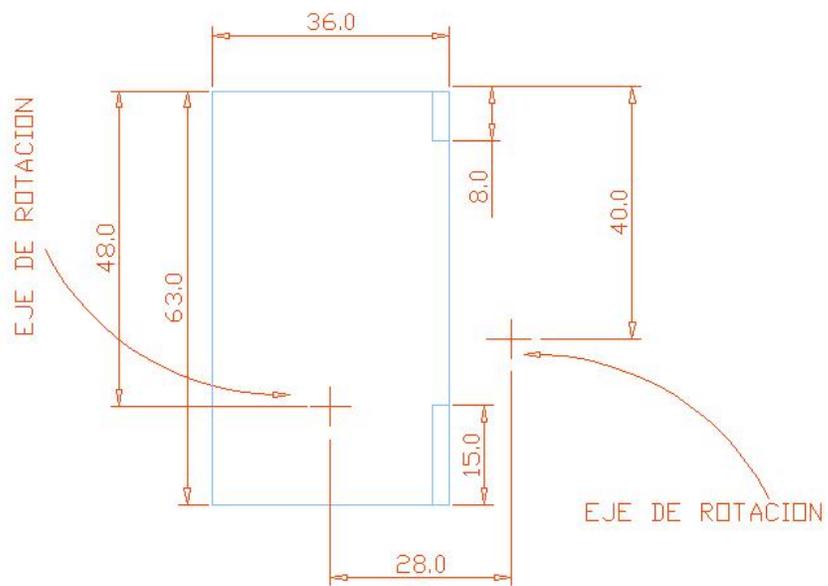


Figura A.8: 3a)Vista superior. Eslabón uno.

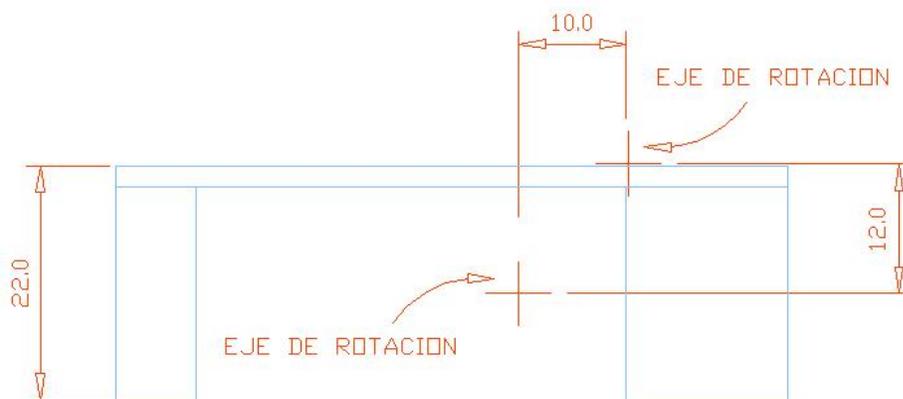


Figura A.9: 3b)Vista lateral. Eslabón uno.

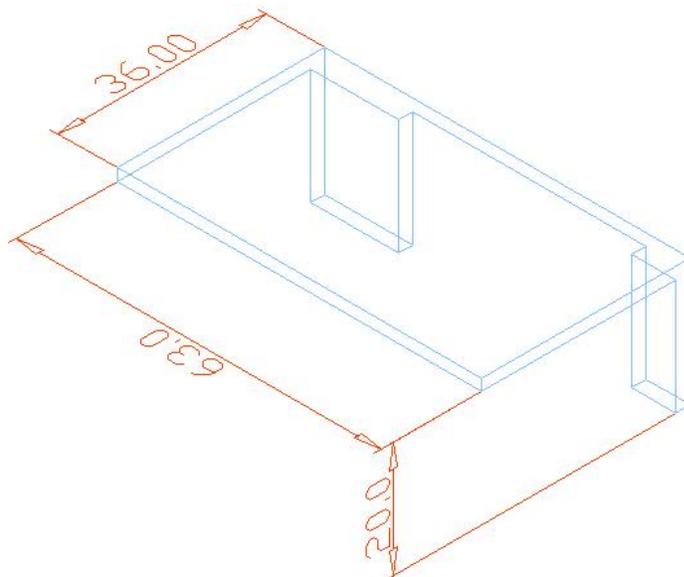


Figura A.10: 3c)Vista tridimensional. Eslabón uno.

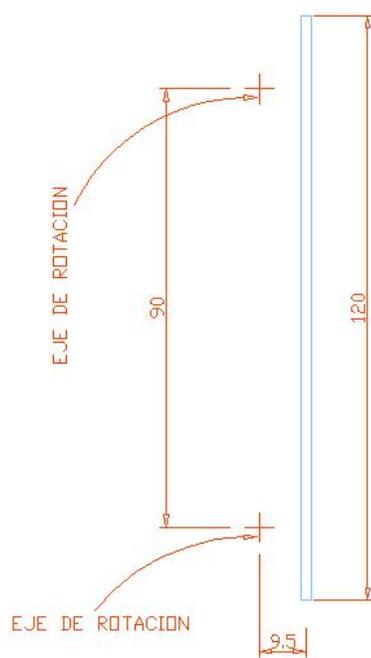


Figura A.11: 4a)Vista superior. Eslabón dos.

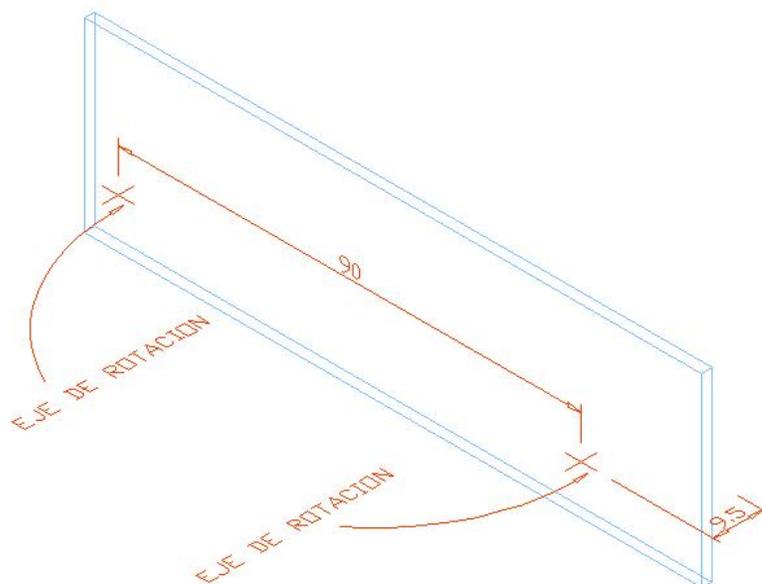


Figura A.12: 4b) Vista tridimensional. Eslabón dos.

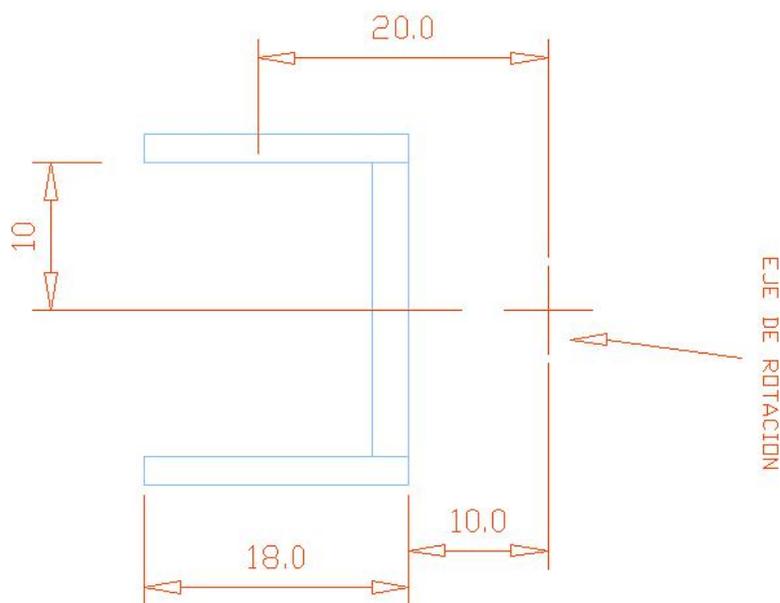


Figura A.13: 5a) Vista superior. Eslabón tres.

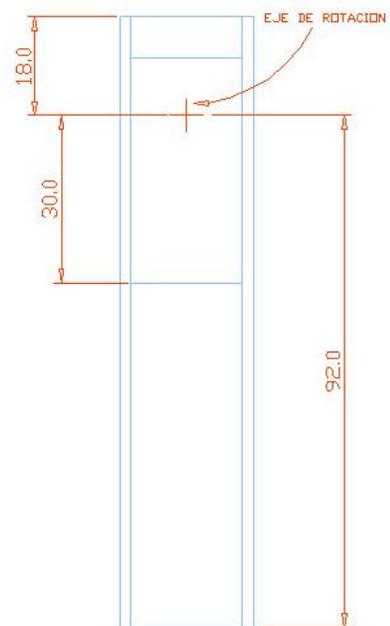


Figura A.14: 5b)Vista lateral. Eslabón tres.

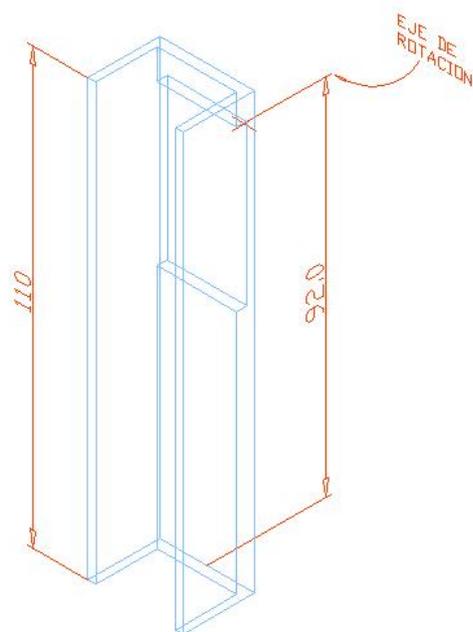


Figura A.15: 5c)Vista tridimensional. Eslabón tres.

Apéndice B

Códigos de los Programas de los Microcontroladores

En este apéndice se presenta el código fuente que corresponde a los programas que se ejecutan en los microcontroladores de los sistemas de control descritos en el Capítulo 6. Estos códigos están escritos en lenguaje assambler para el compilador MPASM para ejecutarse en el modelo PIC16F688, ambos, el compilador y el microcontrolador son de la marca “Microchip”.

B.1. Programa de los Microcontroladores 1, 2 y 3

Este programa es el encargado de generar una señal se S.P. para cada servomotor del insecto robot. Dependiendo de el número de microcontrolador que ejecute este programa se deben hacer unos pequeños cambios que son indicados en un comentario ¹ en el siguiente código. Estos cambios se deben a que cada motor tiene asignado un valor que servirá para direccionar los valores de posición como ya se trató en el Capítulo 6 y cada microcontrolador maneja seis motores y cada motor tiene asignado un valor de dirección distinto.

```
list p=16f688
include "p16f688.inc"
cblock 0x20
    var1
```

¹Los comentarios son las notas que están después del caracter “;” en cada línea, este caracter le indica al compilador que debe ignorar esta linea.

```
    var2
    act1
    act2
    act3
    act4
    act5
    act6
    stp
    cont
endc
org 0x00
goto start
org 0x04
goto interrupt
org 0x05
start

    movlw 0x07    ;apaga comparadores
    movwf CMCON0 ;para poder usar el porta

    clrf PORTA
    clrf PORTC

    bsf STATUS,RP0
    bcf STATUS,RP1 ;cambia los bits para trabajar en el banco 1

    movlw 0x77
    movwf OSCCON ;usa cristal interno de 8Mhz

    movlw 0xF8
    movwf TRISA ;RA0-3 salidas

    movlw 0x28
    movwf TRISC ;

    clrf ANSEL ;todos los pines de porta
                ;son digitales
    clrf PIE1

    movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
    movwf OPTION_REG
```

```
movlw 0x60
movwf ADCON1 ;configura el convertidor A/D
```

```
bcf STATUS,RP0
bcf STATUS,RP1 ;cambia al banco 0
```

```
movlw 0xFF
movwf stp
```

```
movlw 0x24
movwf TXSTA
movlw 0x90
movwf RCSTA
clrf BAUDCTL
movlw 0x19 ;25 ó 19h para 19.2 Kb
movwf SPBRG
clrf SPBRGH
```

```
movlw 0x7F
movwf act1
movwf act2
movwf act3
movwf act4
movwf act5
movwf act6
```

cicle

```
movlw 0xE0
movwf INTCON ;habilita las interrupciones
```

```
    btfss PIR1,5
    goto $-1 ;rcif=0? no=regresa, si=salta
;   clrf INTCON ;para interrupciones
    movf RCREG,W
    movwf var1 ;lo recibido a var1
```

```

movlw 0xFF
nop      ;$-7
nop      ;$-6
movwf cont ;$-5
decfsz cont,W;$-4
goto $+2 ;$-3
goto cicle ;$-2 $+1
btfss PIR1,5 ;$-1 $+2
goto $-7 ;rcif=0? no=regresa, si=salta
movf RCREG,W
movwf var2 ;lo recibido a var2

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;;Estos son los cambios que deben realizarse ;;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;en las lineas siguientes ;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

;primero direcciones de 00h al 05h

;segundo direcciones de 06h al 0Bh

;tercero direcciones del 0Ch al 11h

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

movf var1,W
xorlw 0x00 ;primera dirección
btfsc STATUS,Z
goto at1

movf var1,W
xorlw 0x01 ;segunda dirección
btfsc STATUS,Z
goto at2

movf var1,W
xorlw 0x02 ;tercera dirección
btfsc STATUS,Z
goto at3

movf var1,W
xorlw 0x03 ;cuarta dirección

```

```
    btfsc STATUS,Z
    goto at4

    movf var1,W
    xorlw 0x04 ;quinta dirección
    btfsc STATUS,Z
    goto at5

    movf var1,W
    xorlw 0x05 ;sexta dirección
    btfsc STATUS,Z
    goto at6

    goto cicle

at1
    movf var2,W
    movwf act1
    goto cicle
at2
    movf var2,W
    movwf act2
    goto cicle
at3
    movf var2,W
    movwf act3
    goto cicle
at4
    movf var2,W
    movwf act4
    goto cicle
at5
    movf var2,W
    movwf act5
    goto cicle
at6
    movf var2,W
    movwf act6
    goto cicle

;;;;;;;;;;;;;;;;;;

    goto cicle ;regresa al ciclo
```

```
;;;;;;;;;;;;;;;;;
```

```
interrupt
```

```
    clrf INTCON ;detiene interrupciones
```

```
    incf stp,W
```

```
    movwf stp
```

```
    xorlw 0x0C
```

```
    btfsc STATUS,Z
```

```
    clrf stp
```

```
    movf stp,W
```

```
    addwf PCL,f
```

```
    goto t1 ;stp=0
```

```
    goto th ;=1
```

```
    goto t2 ;=2
```

```
    goto th ;=3
```

```
    goto t3 ;=4
```

```
    goto th ;=5
```

```
    goto t4 ;=6
```

```
    goto th ;=7
```

```
    goto t5 ;=8
```

```
    goto th ;=9
```

```
    goto t6 ;=A
```

```
    goto th ;=B
```

```
    goto cicle ;....
```

```
;;;;;;;;;;;;;;;;; t1
```

```
    clrf PORTC
```

```
    movlw 0x01
```

```
    movwf PORTA ;1
```

```
    movf act1,W
```

```
    movwf TMRO ;lo que está en act1 se pasa al timer
```

```
    bsf STATUS,RPO
```

```
    movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
```

```
    movwf OPTION_REG
```

```
    bcf STATUS,RPO
```

```
    bcf INTCON,2
```

```
    movlw 0xE0
```

```
    movwf INTCON ;reinician interrupciones
    return

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;; t2
    clrf PORTC
    movlw 0x02
    movwf PORTA
    movf act2,W
    movwf TMRO
    bsf STATUS,RP0
    movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
    movwf OPTION_REG
    bcf STATUS,RP0
    bcf INTCON,2
    movlw 0xE0
    movwf INTCON
    return

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;; t3
    clrf PORTC
    movlw 0x04
    movwf PORTA
    movf act3,W
    movwf TMRO
    bsf STATUS,RP0
    movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
    movwf OPTION_REG
    bcf STATUS,RP0
    bcf INTCON,2
    movlw 0xE0
    movwf INTCON
    return

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;; t4
    clrf PORTA
    movlw 0x01
    movwf PORTC
    movf act4,W
    movwf TMRO
    bsf STATUS,RP0
    movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
    movwf OPTION_REG
    bcf STATUS,RP0
```

```
bcf INTCON,2
movlw 0xE0
movwf INTCON
return
```

```
;;;;;;;;;;;;;; t5
clrf PORTA
movlw 0x02
movwf PORTC
movf act5,W
movwf TMR0
bsf STATUS,RPO
movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
movwf OPTION_REG
bcf STATUS,RPO
bcf INTCON,2
movlw 0xE0
movwf INTCON
return
```

```
;;;;;;;;;;;;;; t6
clrf PORTA
movlw 0x04
movwf PORTC
movf act6,W
movwf TMR0
bsf STATUS,RPO
movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
movwf OPTION_REG
bcf STATUS,RPO
bcf INTCON,2
movlw 0xE0
movwf INTCON
return
```

```
;;;;;;;;;;;;;; th
clrf TMR0
bsf STATUS,RPO
movlw 0x02 ; asigna el preescaler "por 16" del timer0
movwf OPTION_REG
bcf STATUS,RPO
bcf INTCON,2
movlw 0xE0
```

```
bcf STATUS,RP1

movlw 0x24
movwf TXSTA
movlw 0x90
movwf RCSTA
clrf BAUDCTL
movlw 0x19 ;25 ó 19h para 19.2 Kb
movwf SPBRG
clrf SPBRGH

cicle
  movf PORTA,W
  movwf var1
  bcf var1,7
  bcf var1,6
  movf var1,W
  movwf TXREG
  btfss PIR1,1
  goto $-1

  goto cicle
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

end
```

Apéndice C

Código del Software de Control

En este apéndice se incluye el código fuente que corresponde al programa de control del insecto robot. Este código fuente está escrito en lenguaje Basic para ser compilado con *Microsoft Visual Basic 6.0* y también está incluido en el CD que acompaña este trabajo junto con los archivos necesarios para poder ejecutarlo en el compilador mencionado.

```
Dim a, b, c, g, z, m(17), X(17) As Byte Public d, e, f As Boolean
Public i, j, k As Integer

Private Sub Command1_Click()
    For i = 0 To 2
        MSComm1.Output = Chr$(i)          'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(Knob1(i).Position) 'manda la posición de cada motor
    Next
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    For i = 3 To 5
        MSComm1.Output = Chr$(i)          'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(Knob1(i).Position) 'manda la posición de cada motor
    Next
End Sub

Private Sub Command3_Click()
    For i = 6 To 8
        MSComm1.Output = Chr$(i)          'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(Knob1(i).Position) 'manda la posición de cada motor
    Next
```

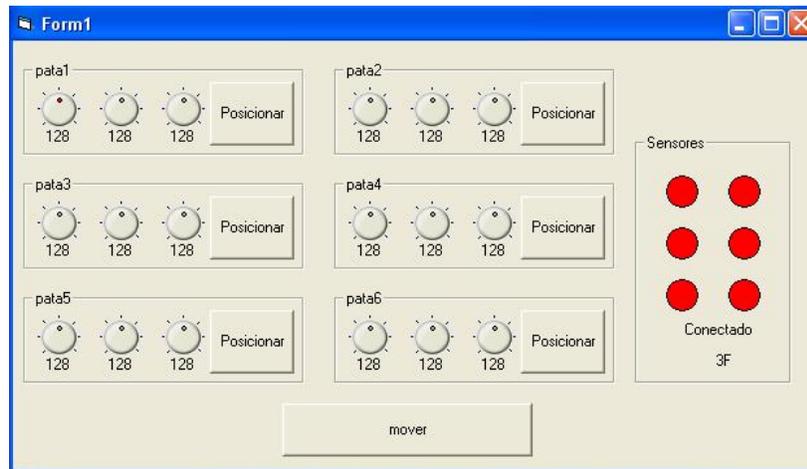


Figura C.1: Formulario del programa principal.

End Sub

```
Private Sub Command4_Click()
    For i = 9 To 11
        MSComm1.Output = Chr$(i)          'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(Knob1(i).Position) 'manda la posición de cada motor
    Next
End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()
    For i = 12 To 14
        MSComm1.Output = Chr$(i)          'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(Knob1(i).Position) 'manda la posición de cada motor
    Next
End Sub
```

```
Private Sub Command6_Click()
    For i = 15 To 17
        MSComm1.Output = Chr$(i)          'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(Knob1(i).Position) 'manda la posición de cada motor
    Next
End Sub
```

```
Private Sub Command7_Click()
    If d = False Then

        g = 0
```

```
    Timer2.Enabled = True
    Command7.Caption = "detener"
    d = True

    For i = 0 To 5
        Frame1(i).Enabled = False
    Next

    For i = 0 To 17
        Knob1(i).Visible = False
    Next

    Command1.Enabled = False
    Command2.Enabled = False
    Command3.Enabled = False
    Command4.Enabled = False
    Command5.Enabled = False
    Command6.Enabled = False

ElseIf d = True Then

    Timer2.Enabled = False
    Command7.Caption = "mover"
    d = False

    For i = 0 To 5
        Frame1(i).Enabled = True
    Next

    For i = 0 To 17
        Knob1(i).Visible = True
    Next

    Command1.Enabled = True
    Command2.Enabled = True
    Command3.Enabled = True
    Command4.Enabled = True
    Command5.Enabled = True
    Command6.Enabled = True

End If
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
    MSComm1.CommPort = 4           'puerto serie com1
    MSComm1.Settings = "19200,N,8,1" '9600bauds, paridad ninguna, bits, bit de parada
    MSComm1.PortOpen = True       'se abre el puerto serial
    For i = 0 To 17
        X(i) = Knob1(i).Position   'guarda todos los valores iniciales para
                                   'resetear las posiciones al final en el vector x
        MSComm1.Output = Chr$(i)   'manda el numero de motor
        MSComm1.Output = Chr$(X(i)) 'manda la posición de cada motor
    Next
    Timer1.Enabled = True
    Timer2.Enabled = False

    Command7.Caption = "mover"
End Sub Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer) Timer1.Enabled =
False For i = 0 To 17
    MSComm1.Output = Chr$(i)       'manda el numero de motor
    MSComm1.Output = Chr$(X(i))    'manda la posición de cada motor
Next
MSComm1.PortOpen = False
End Sub

Private Sub Timer1_Timer() b = MSComm1.Input

If b = "" Then
    Label1.Caption = "No hay conexión"
    Label2.Caption = "---"
    b = 0
    For i = 0 To 5
        Shape1(i).BackStyle = 0
    Next
Else
    Label1.Caption = "Conectado"
    b = Asc(b)
    Label2.Caption = Hex(b)

    c = b And &H1
    If c = &H1 Then
        Shape1(0).BackStyle = 1
    Else
        Shape1(0).BackStyle = 0
    End If
End If
```

```
c = b And &H2
If c = 2 Then
    Shape1(1).BackStyle = 1
Else
    Shape1(1).BackStyle = 0
End If

c = b And &H4
If c = &H4 Then
    Shape1(2).BackStyle = 1
Else
    Shape1(2).BackStyle = 0
End If

c = b And &H8
If c = &H8 Then
    Shape1(3).BackStyle = 1
Else
    Shape1(3).BackStyle = 0
End If

c = b And &H10
If c = &H10 Then
    Shape1(4).BackStyle = 1
Else
    Shape1(4).BackStyle = 0
End If

c = b And &H20
If c = &H20 Then
    Shape1(5).BackStyle = 1
Else
    Shape1(5).BackStyle = 0
End If

End If

End Sub

Private Sub Timer2_Timer()

    If g = 0 Then
        sw1_1
```

```
    g = 1
  ElseIf g = 1 Then
    mov1
    g = 2
  ElseIf g = 2 Then
    sw1_pos2
    g = 3
  ElseIf g = 3 Then
    sw2_1
    g = 4
  ElseIf g = 4 Then
    mov2
    g = 5
  ElseIf g = 5 Then
    sw2_pos1
    g = 0
  End If
```

```
End Sub Public Sub sw1_1()
```

```
'esta función se encarga de subir las patas 2, 3 y 6
```

```
'pata2
```

```
'z=3
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
z = 4
```

```
MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
MSComm1.Output = Chr$(X(z) + 40)
```

```
'z=5
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata3
```

```
'z=6
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
z = 7
```

```
MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
MSComm1.Output = Chr$(X(z) - 40)
```

```
'z=8
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata6
'z=15
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
z = 16
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) + 40)
'z=17
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

End Sub Public Sub mov1() 'esta función se encarga de mover las patas 2, 3 y 6 que están levantadas 'hacia adelante y las patas 1, 4 y 5, que estan el el piso, hacia atrás

```
'pata2
z = 3
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) + 15)
'z = 4
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
'z=5
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata3
z = 6
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) - 15)
'z = 7
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
'z=8
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata6
z = 15
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) + 15)
'z = 16
'MSComm1.Output = Chr$(z)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
'z=17
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata1
z = 0
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) + 15)
'z = 1
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
'z=2
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata4
z = 9
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) - 15)
'z = 10
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
'z=11
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
'pata5
z = 12
MSComm1.Output = Chr$(z)
MSComm1.Output = Chr$(X(z) + 15)
'z = 13
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
'z=14
'MSComm1.Output = Chr$(z)
'MSComm1.Output = Chr$(X(z))
```

```
End Sub Public Sub sw1_pos2()
```

```
'pata6
'MSComm1.Output = Chr$(15) 'motor
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(16) 'valor

MSComm1.Output = Chr$(16)
MSComm1.Output = Chr$(X(16))

'MSComm1.Output = Chr$(17)
'MSComm1.Output = Chr$()

'pata2
'MSComm1.Output = Chr$(3)
'MSComm1.Output = Chr$(190)

MSComm1.Output = Chr$(4)
MSComm1.Output = Chr$(X(4))

'MSComm1.Output = Chr$(5)
'MSComm1.Output = Chr$()

'pata4
'MSComm1.Output = Chr$(9)
'MSComm1.Output = Chr$(150)

MSComm1.Output = Chr$(10)
MSComm1.Output = Chr$(X(10) + 1)

'MSComm1.Output = Chr$(11)
'MSComm1.Output = Chr$()

End Sub

Public Sub sw2_1()
  'pata3
  'MSComm1.Output = Chr$(6) 'motor
  'MSComm1.Output = Chr$(190) 'valor

  MSComm1.Output = Chr$(7)
  MSComm1.Output = Chr$(X(7) - 15)

  'MSComm1.Output = Chr$(8)
  'MSComm1.Output = Chr$()

  'pata5
  'MSComm1.Output = Chr$(12)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(160)

MSComm1.Output = Chr$(13)
MSComm1.Output = Chr$(X(13) + 10)

'MSComm1.Output = Chr$(14)
'MSComm1.Output = Chr$()

'pata1
'MSComm1.Output = Chr$(0)
'MSComm1.Output = Chr$(210)

MSComm1.Output = Chr$(1)
MSComm1.Output = Chr$(X(1) + 15)

'MSComm1.Output = Chr$(2)
'MSComm1.Output = Chr$()
End Sub

Public Sub mov2() 'pata3
  MSComm1.Output = Chr$(6) 'motor
  MSComm1.Output = Chr$(X(6) + 5) 'valor

  'MSComm1.Output = Chr$(7)
  'MSComm1.Output = Chr$(110)

  'MSComm1.Output = Chr$(8)
  'MSComm1.Output = Chr$()

  'pata5
  MSComm1.Output = Chr$(12)
  MSComm1.Output = Chr$(X(12) - 1)

  'MSComm1.Output = Chr$(13)
  'MSComm1.Output = Chr$(210)

  'MSComm1.Output = Chr$(14)
  'MSComm1.Output = Chr$()

  'pata1
  MSComm1.Output = Chr$(0)
  MSComm1.Output = Chr$(X(0) + 3)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(1)
'MSComm1.Output = Chr$(110)

'MSComm1.Output = Chr$(2)
'MSComm1.Output = Chr$()

'pata6
MSComm1.Output = Chr$(15) 'motor
MSComm1.Output = Chr$(X(15) + 5) 'valor

'MSComm1.Output = Chr$(16)
'MSComm1.Output = Chr$(185)

'MSComm1.Output = Chr$(17)
'MSComm1.Output = Chr$()

'pata2
MSComm1.Output = Chr$(3)
MSComm1.Output = Chr$(X(3) - 1)

'MSComm1.Output = Chr$(4)
'MSComm1.Output = Chr$(135)

'MSComm1.Output = Chr$(5)
'MSComm1.Output = Chr$()

'pata4
MSComm1.Output = Chr$(9)
MSComm1.Output = Chr$(X(9) + 3)

'MSComm1.Output = Chr$(10)
'MSComm1.Output = Chr$(190)

'MSComm1.Output = Chr$(11)
'MSComm1.Output = Chr$()
End Sub

Public Sub sw2_pos1()

'pata3
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(6) 'motor  
'MSComm1.Output = Chr$(190) 'valor
```

```
MSComm1.Output = Chr$(7)  
MSComm1.Output = Chr$(X(7))
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(8)  
'MSComm1.Output = Chr$()
```

```
'pata5  
'MSComm1.Output = Chr$(12)  
'MSComm1.Output = Chr$(160)
```

```
MSComm1.Output = Chr$(13)  
MSComm1.Output = Chr$(X(13))
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(14)  
'MSComm1.Output = Chr$()
```

```
'pata1  
'MSComm1.Output = Chr$(0)  
'MSComm1.Output = Chr$(210)
```

```
MSComm1.Output = Chr$(1)  
MSComm1.Output = Chr$(X(1) + 1)
```

```
'MSComm1.Output = Chr$(2)  
'MSComm1.Output = Chr$()
```

```
End Sub
```

Bibliografía

- [1] Pearson, Keir. 1976. *“The Control of Walking”*. Scientific American; 235: 72-86.
- [2] Raibert, Marc H.; Sutherland, Ivan E. 1983. *“Machines That Walk”*; “Scientific American”.
- [3] Slotine, J. J. E. Asada, H. 1986. *“Robot Analysis and Control”*
- [4] Ogata, Katsuhiko. 1998. *“Ingeniería de Control Moderna”* Prentice Hall.
- [5] Ogata, Katsuhiko. 1996. *“Sistemas de Control en Tiempo Discreto”* Prentice Hall.
- [6] University of Michigan. 2000. *“Control Tutorials for Matlab”*
- [7] Borror; Triplehorn; Johnson. 1989. *“An Introduction To The Study Of Insects”*
- [8] Chapman, R.F. 1982. *“The Insects, Structure And Functions”*. Elsevier Inc.
- [9] Hickman, Cleveland; Roberts, Larry; Larson, Allan. 2005. *“Integrated Principles of Zoology”*. McGraw-Hill.
- [10] Toro, Harnoldo. 2002. *“Principios de Entomología”*. Universidad Católica de Valparaíso.
- [11] Sears, Francis; Zemansky, Mark W.; Young, Hugh D.; Freedman, Roger A. 1997. *“Física Universitaria”* Vol. 1. University of California.
- [12] Tipsa *“<http://www.tipsa.com.mx/>”*
- [13] Futaba RC. *“<http://www.futaba-rc.com/>”*
- [14] Futaba RC. 2002. *“Digital FET Servos”*.
- [15] Garbutt, Mike. 2000. *“Asynchronous Communications with the PICmicro® US-ART”*. Mirochip Technology Inc.
- [16] Mirochip Technology Inc. 2003. *“PIC16F688 Data Sheet”*