

7



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

298329

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
ROBOT DE DESPLAZAMIENTO
DISCRETO.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A N :
MARCO ANTONIO HURTADO ESPÍNDOLA
EDUARDO SÁEZ MONROY



DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA

CUIDAD UNIVERSITARIA, 2001.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Dedico este trabajo a mis padres, Eduardo y Pilar.
Por su amor, compañía y comprensión sin límites,
durante buenos y malos momentos, constituyen
una parte esencial de mi vida GRACIAS.*

*A mis hermanos, Arturo y Coral,
gracias por su apoyo incondicional
y por soportarme durante estos años.*

*A mis abuelitas, Concepción e Isaura,
por sus cariños y cuidados hacia mí gracias.*

Con cariño LALO.

A mis padres, por el amor,
confianza e interés en mi desarrollo.

A mi abuela, por que
gracias a su apoyo y consejo he
alcanzado esta meta.

A mi hermana Bárbara,
por su apoyo incondicional y estímulo.

Los últimos pero no por eso menos importantes.
A todos mis amigos y familiares
por brindarme su amistad y cariño.

Marco

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo I <i>ASPECTOS GENERALES</i>	3
1.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA	3
1.2 CARACTERÍSTICAS DE UN ROBOT	6
1.2.1 Definición de robot	6
1.2.2 Sistemas constitutivos de un robot	6
1.2.3 Definición de máquina inteligente	7
1.2.4 Sistema de decisión	9
1.2.5 Sistema de usuario máquina	9
1.2.6 Sistema de percepción	9
1.2.7 Sistema mecánico	10
1.2.8 Actuadores	11
1.3 REFERENCIAS	16
Capítulo II <i>ROBOTS CAMINANTES</i>	17
2.1 INTRODUCCIÓN HACIA LOS ROBOTS MÓVILES	17
2.2 LOS ROBOTS CAMINANTES	18
2.3 CARACTERÍSTICAS PARTICULARES	18
2.3.1 Secuencia de pisadas	19
2.3.2 Estabilidad	20
2.3.3 Marcha	21
2.4 ESTADO ACTUAL DE LOS ROBOTS CAMINANTES	26
2.5 REFERENCIAS	30
Capítulo III <i>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</i>	31
3.1 INTRODUCCIÓN	31
3.2 DISEÑO CONCEPTUAL	32
3.3 DESCRIPCIÓN DE LA EXTREMIDAD	34
3.3.1 Propuesta de mecanismo y grados de libertad	34
3.3.2 Sistema de ascenso - descenso	34
3.3.3 Sistema de apertura - cierre	35
3.3.4 Sistema de rotación	36

3.4	TRANSMISIÓN DE POTENCIA	37
3.4.1	Engranajes cónicos, piñón-rueda	37
3.4.2	Tornillo de potencia	40
3.5	ESTABILIDAD ESTÁTICA	42
3.6	MANUFACTURA	46
3.7	REFERENCIAS	50
Capítulo IV ANÁLISIS DE POSICIÓN, CINEMÁTICO, Y DINÁMICO		51
4.1	ANÁLISIS DE POSICIÓN	51
4.1.1	Sistema de referencia	57
4.1.2	Posición	57
4.2	ANÁLISIS CINEMÁTICO	62
4.2.1	Análisis de velocidad	62
4.2.2	Análisis de aceleración	64
4.3	ANÁLISIS DE FUERZAS	66
4.4	PERFIL DE TRAYECTORIA	72
4.5	ANÁLISIS EN EL ESPACIO	74
4.6	RESULTADOS DEL ANÁLISIS	76
4.7	SELECCIÓN DEL ACTUADOR	79
4.8	REFERENCIAS	80
Capítulo V COMPONENTES ELECTRÓNICOS, CONTROL Y PROGRAMACIÓN		81
5.1	SISTEMA DE DECISIÓN	81
5.2	SISTEMA DE PERCEPCIÓN	84
5.2.1	Sistema de percepción interno	84
5.2.2	Sistema de percepción externo	87
5.3	ELECTRÓNICA DE POTENCIA	89
5.4	FUENTE DE PODER	92
5.5	CONTROL DE LA SECUENCIA DE CAMINADO	93
5.6	PROGRAMACIÓN	99
5.7	REFERENCIAS	101
Capítulo VI CONCLUSIONES		102
6.1	INTRODUCCIÓN	102
6.2	SISTEMA MECÁNICO	103
6.3	SISTEMA ELECTRÓNICO	105
6.4	SISTEMA DE CONTROL	105
6.5	CONCLUSIONES FINALES	106

APÉNDICE A	<i>DIMENSIONES FINALES</i>	107
APÉNDICE B	<i>PLANOS DE CONJUNTO Y DE DETALLE</i>	109
APÉNDICE C	<i>LISTADO DEL PROGRAMA DEL ANÁLISIS DE FUERZAS</i>	125
APÉNDICE D	<i>DIAGRAMAS ELECTRÓNICOS</i>	133
APÉNDICE E	<i>LISTADO DEL PROGRAMA DE CONTROL</i>	138



Introducción

El rápido y explosivo desarrollo de los microcontroladores, y las drásticas reducciones en tamaño y costo de los circuitos integrados en los últimos años, han permitido abrir un espacio nuevo y amplio para la creación de sistemas inteligentes. Gracias a este avance, la robótica tanto científica como tecnológicamente, ha experimentado un crecimiento desde principios de los ochentas a nivel global, y probablemente a una tasa mayor que otros campos de la ingeniería. Aunque este crecimiento no ha implicado cambios radicales en la ciencia básica, ha extendido significativamente su teoría y el conocimiento de sus implicaciones.

Sin embargo, a pesar de los avances en tecnologías vinculadas con la robótica, ésta no ha logrado brindar todo su potencial. Actualmente está en gestación una generación de robots capaces de sentir y reaccionar a su entorno; yendo un poco más adelante en la evolución de estos sistemas se encuentran los robots capaces de interactuar con el ser humano.

Los robots simbolizan un alto nivel de industrialización de una sociedad, estos tienen por objetivo mejorar la productividad, reducir costos y mejorar la calidad en la manufactura de los productos. En México, la construcción y el diseño de robots han estado muy limitados, ya que los factores que contribuyen al avance de estas áreas, dependen tanto de la industria manufacturera prevalecientes en cada país, así como del nivel de mecanización de la industria.

El objetivo de este trabajo es diseñar y ensamblar un sistema robótico, con el fin de proporcionar un ejemplo útil para la investigación y la docencia en la aplicación de los sistemas mecatrónicos.

Para alcanzar lo anterior es necesario conjuntar los conocimientos adquiridos para desarrollar un proyecto sinérgico, que involucre e integre distintas ramas como son ingeniería mecánica, electrónica y de computación.

La meta de este trabajo es diseñar y construir un robot de desplazamiento discreto cuadrúpedo capaz de llevar a cabo una marcha satisfactoriamente, con flexibilidad



estructural. Tal diseño puede ser base de otros proyectos, para su mejoramiento y perfección, o para total reingeniería del mismo.

La hipótesis es demostrar la conveniencia que presenta un robot cuadrúpedo con respecto a otras configuraciones en cuanto a movilidad, velocidad, potencia, y flexibilidad en direccionamiento. Todo esto enfocado hacia un adecuado desempeño de la marcha.

La tesis consta de seis capítulos y cinco apéndices que contienen los planos de detalle y de conjunto referentes al diseño mecánico del robot móvil de desplazamiento discreto, los listados de los programas utilizados para su control, así como los diagramas de los circuitos electrónicos diseñados para el prototipo.

Los dos primeros capítulos son introductorios, en el primero se tratan los aspectos generales de la robótica, tales como definiciones, sistemas constitutivos de los robots, aspectos mecánicos y sistemas de actuación.

En el capítulo 2 se presentan las generalidades y criterios de diseño que intervienen en la integración de una máquina caminante, la descripción y metodología para llevar a cabo el diseño del prototipo.

En el capítulo 3, se ve a detalle la configuración mecánica, la descripción de las piezas y mecanismos que intervienen en la configuración de los pares cinemáticos. Así mismo, se evalúan los grados de libertad, la secuencia de marcha y los patrones de pisadas.

El capítulo 4 es el análisis de la posición, la cinemática y la dinámica del esqueleto del robot. La metodología está basada en los teoremas de Euler y Chasles¹, la meta principal del análisis consiste en determinar las fuerzas y torques requeridos por el sistema. Para posteriormente realizar la selección de los actuadores.

Una vez decidido el diseño mecánico del robot en particular y el medio de impulso, el siguiente paso es seleccionar un sistema de control que regule la marcha seleccionada. Este tema se estudia en el capítulo 5 conjuntamente con el sistema de percepción previsto para el robot.

Finalmente, se incluye un capítulo de conclusiones, en el cual se lleva a cabo una evaluación del prototipo construido, la respuesta de su funcionamiento, y propuestas para un futuro trabajo de perfeccionamiento del mismo.

¹ McGhee, R.B. y Frank, A. A. "On the stability properties of quadruped creeping gaits". Math. Science. 1969.



Capítulo I

ASPECTOS GENERALES

1.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA

La idea de un robot puede decirse que nació en la Grecia clásica, ya que en el siglo cuarto a. C. Aristóteles escribió: “si cada instrumento pudiera llevar a cabo su propio trabajo, obedeciendo o anticipando la voluntad de los demás... no se necesitarían siervos ni esclavos”. Para el siglo XVIII la revolución industrial dió como resultado la proliferación de nuevas fuentes de energía, nuevas herramientas, nuevas industrias, mecanismos, que derivó en la creación de máquinas capaces de controlar la secuencia total de acciones de un proceso; Sin embargo el verdadero comienzo de la era de las máquinas se perfiló hacia finales del siglo XIX. En donde las máquinas fueron logros de la tecnología, capaces de sustituir o de amplificar las capacidades humanas. Estas máquinas requerían la operación humana para detectar variaciones en el ambiente o en los objetivos requeridos.

La primera guerra mundial trajo muchos cambios, ya que el poder destructivo de las máquinas hizo ver al hombre como disponible y sustituible, esta idea se transmitió en la posguerra en la obra de checo Karel Capek en 1921, *Rossum's Universal Robots*. La palabra robot fue derivada del término eslavo *robot*, que significa trabajo pesado. En la obra los robots concebidos por Capek, fueron hechos para reemplazar el trabajo de los obreros en las fábricas. La trama comienza cuando la tecnología se desarrolla a tal grado que los robots se tornaron sofisticados, inteligentes y desafortunadamente independientes del ser humano, en el sentido de que destruyen al hombre y a su civilización creada, porque los ideales de las máquinas eran contrarios a los del hombre.

Dada la probabilidad de que los robots tendrían algún día inteligencia artificial, Isaac Asimov¹, en 1940 formuló las tres leyes del comportamiento de los robots:

1. Un robot no podrá dañar a un ser humano, ni por pasividad permitir el daño a un ser humano.
2. Un robot debe obedecer las órdenes dadas por un ser humano, excepto aquellas que entren en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, mientras esta protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

¹ Asimov, Isaac. “I, robot”. 1950.



Actualmente las áreas en que los robots pueden aplicarse son muy variadas y van más allá del nivel industrial, pueden ocuparse en ambientes nocivos donde el hombre no es capaz de sobrevivir. Por ejemplo a grandes profundidades en el mar, o en misiones del espacio exterior.

A continuación se mencionan ejemplos de aplicaciones industriales para los robots:

- Transportación de materiales en una línea de producción.
- Ensamble de piezas (partes automotrices, microelectrónica, etc.).
- Procesos de manufactura (soldadura, pintura, forja, fundición, etc.).
- Procesos de corte de materiales (corte con láser, con agua a presión, etc.).

Algunas aplicaciones no industriales se enumeran a continuación:

Medicina: transplante de órganos, partes biomecánicas, manipuladores para discapacitados o cuadrapléjicos.

Minería: máquinas automáticas para extracción de carbón.

Protección humana: robots móviles para exploración en incendios, campos minados, zonas agresivas para la salud humana.

Milicia: misiles teledirigidos, sistemas de navegación autónomos en aviones.

Al contrario de lo que pasa en las aplicaciones en el ámbito industrial, el desarrollo en estas áreas solamente satisface necesidades específicas, más que necesidades económicas, es decir, ayudan a resolver problemas importantes en cada área. Sin embargo a nivel global, la frecuencia de uso es pequeña como para reflejar un impacto económico, como lo que sucede en las aplicaciones de tipo industrial.

Argumentos a favor y en contra del uso de los robots.

Los argumentos a favor y en contra de los sistemas robóticos en la industria están íntimamente relacionados con los de la automatización en general. Algunos de los factores que motivan la utilización de los robots, son mencionados y agrupados a continuación:

Factores técnicos: Las capacidades humanas no son suficientes para satisfacer los requerimientos modernos de precisión, velocidad, durabilidad, resistencia, uniformidad, etc. Los autómatas pueden ofrecer:

- Alta flexibilidad en tipos de productos y variaciones, además de menores pérdidas por tiempo de preparación de procesos con respecto a la automatización convencional.
- Mejor calidad del producto, menores rechazos y disminución de desperdicios.



Factores económicos: Los sistemas robóticos incrementan la productividad de una empresa con base en:

- Máxima utilización del capital debido a la producción intensiva.
- Reducción de pérdidas por interrupciones, ausencias y días no laborables.
- Reducción de inventarios.
- Reducción de tiempos de manufactura.

Factores sociales: Muchas tareas indeseables pueden ser llevadas a cabo por robots, lo cual puede ser benéfico en varios aspectos. Por ejemplo, se puede mencionar el trabajo en ambientes peligrosos o insalubres, actividades monótonas, y tareas de trabajo pesado. Entre los beneficios se pueden mencionar:

- Reducción de accidentes.
- Eliminación del trabajo humano en condiciones peligrosas para su salud.
- Disminución de horas de trabajo en el personal de operación.
- Incremento en el nivel de vida.

Esta industria robótica también ofrece la oportunidad de nuevas plazas de empleo, tanto en la operación, chequeo y mantenimiento, como en el diseño e implementación de tales sistemas. Sin embargo, también existen argumentos en contra, entre los cuáles se encuentran:

1. La reducción de la fuerza laboral, con el desempleo resultante.
2. La reducción en el poder adquisitivo como consecuencia del punto 1.
3. Alto costo en inversión inicial, en equipos de alta tecnología.
4. Cambio en la nómina al emplear personal más capacitado tecnológicamente, tanto para mantenimiento, como para operación.
5. Inversión en la capacitación para responsables del proceso robotizado, así como en las licencias del software para la operación.

La respuesta a tales cuestiones no se presenta de fácil solución. Sin embargo algunos de los sindicatos, como en el caso de la United Auto Workers en Estados Unidos, entienden que la introducción de los sistemas robóticos y de automatización incrementa la productividad de las empresas, y por lo tanto perfilan un progreso económico en vías de los salarios, las horas de trabajo y las utilidades, además de proporcionar seguridad y de relevarlos de tareas en ambientes peligrosos.

A pesar de esto, la automatización y la robótica promueven el despido de los trabajadores a cierto nivel, cuyas actividades son suprimidas por algunos medios, y por esto se establece a esta tecnología en un término ambivalente, que genera polémica en la opinión pública y que debe ser tratado con cuidado antes de establecer conclusiones adelantadas y mal evaluadas, ya que el principio fundamental del robot es servir al hombre y evitar su daño, y no lo contrario.



Actualmente muchas empresas utilizan sistemas robóticos para agilizar, flexibilizar y aumentar la calidad tanto de sus procesos como de sus productos, en respuesta a la competencia no sólo regional, sino a nivel global, por lo tanto la presencia de sistemas inteligentes en el campo productivo es ya una realidad, y va penetrando cada vez dentro de las diferentes tipos de industrias.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE UN ROBOT

1.2.1 Definición de robot

En la literatura técnica los robots pueden ser definidos o entendidos como máquinas capaces de llevar a cabo, de una manera independiente, tareas complejas de naturaleza física y mental. Éste debe interactuar a su vez, con su ambiente, y debe ser capaz de almacenar experiencia a partir de las tareas que llevan a cabo. El Instituto de Robots de América (RIA, por sus siglas en inglés) define a un robot como:

Un robot es un manipulador programable y multifuncional, diseñado para mover materiales, partes, herramientas o artículos especiales mediante movimientos variables programados, para cumplir una variedad de tareas².

Esta definición se aplica a manipuladores, refiriéndose a robot en general se podría definir a este como:

Un robot es un dispositivo mecánico (un brazo manipulador, manos mecánicas, vehículos rodantes o con piernas, plataforma de libre vuelo, etc.), equipado con actuadores y sensores bajo el control de un sistema computacional, el cual opera en un espacio de trabajo dentro del mundo real. Este espacio de trabajo está poblado por objetos físicos y sujeto a las leyes de la naturaleza. El robot realiza tareas por medio de movimientos controlados en tal espacio de trabajo³.

Esta definición implica un arreglo de actuadores que permitan uno o varios manipuladores versátiles comandados por una computadora, la cual puede ser programada de tal manera que envíe la señal correcta para activar a los motores en la secuencia requerida y en el tiempo apropiado para ejecutar un una tarea previamente definida.

1.2.2 Sistemas constitutivos de un robot

Los sistemas constitutivos de un robot son los siguientes: Sistema de comunicación usuario máquina, sistema de decisión, sistema mecánico y sistema de percepción. El sistema de percepción puede estar formado por sensores del tipo interno y/o del tipo externo, o simplemente no existir y, sin embargo, el sistema completo sigue siendo considerado como robot. En la figura 1.1 se muestra un esquema de bloques representando los sistemas constitutivos de un robot.

²Gordon McComb, "The builder's Bonanza: 99 inexpensive Robotics Projects", McGraw Hil, E.E.U.U.1987.

³LaTombe Jean Claude. "Robots Motion Planning". Kluwer Academics Boston 1991.

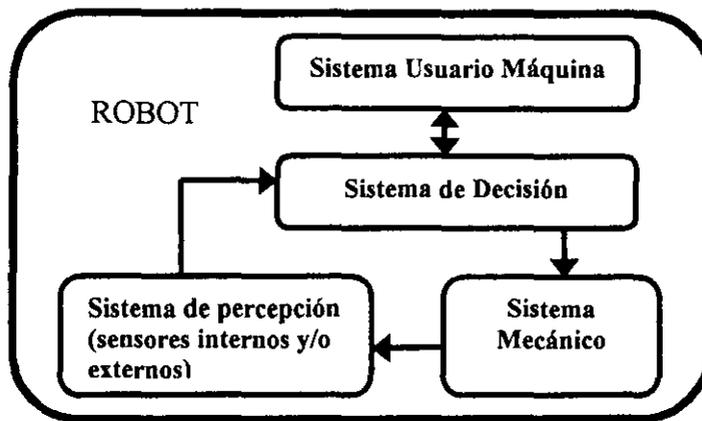


Figura 1.1 Sistemas constitutivos de un robot.

Existen robots más ‘complicados’ los cuales pueden tener unidades de movimiento, tales como ruedas, vías, o piernas, las cuales permiten el movimiento de un punto a otro. Estos pueden tener sensores para percibir cambios en sus tareas o en el ambiente, incorporando esta información, para después almacenarla y automáticamente reprogramar al sistema de control del robot; esto en esencia es un robot móvil. Una clasificación de los robots según el tipo de configuración y de desplazamiento se muestra en la siguiente figura.

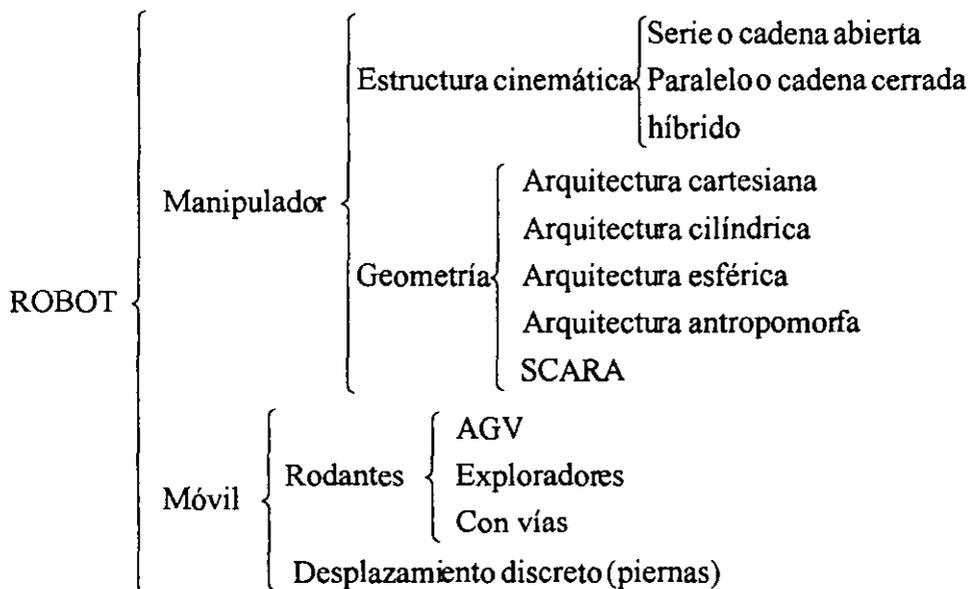


Figura 1.2

Existen máquinas robóticas que tienen la habilidad de resolver ciertos problemas complejos, utilizando funciones de manipulación, además de tener las capacidades de toma de decisiones autónomas y planeación de tareas. Tal inteligencia reside en la computadora del robot, específicamente en el software de programación. Es debido principalmente a los



programas de computación, diseñados de acuerdo a los principios de inteligencia artificial, lo que proporciona al robot el grado de autonomía requerido.

1.2.3 Definición de máquina inteligente

Una máquina es considerada inteligente cuando cumple con las siguientes condiciones:

- Capacidad de percibir su ambiente.
- Capacidad de tomar decisiones a partir de la información obtenida de su entorno.

En la actualidad existen tres tipos de robots atendiendo a su grado de inteligencia, estos son:

1. Aquellos que carecen de todo tipo de sistema sensorial, primera generación. Fig. 1.3
2. Aquellos que integran sensores del tipo interno, segunda generación. Figura 1.4.
3. Y aquellos que integran un sistema sensorial completo y complejo (sensores internos y externos), tercera generación. Figura 1.5.

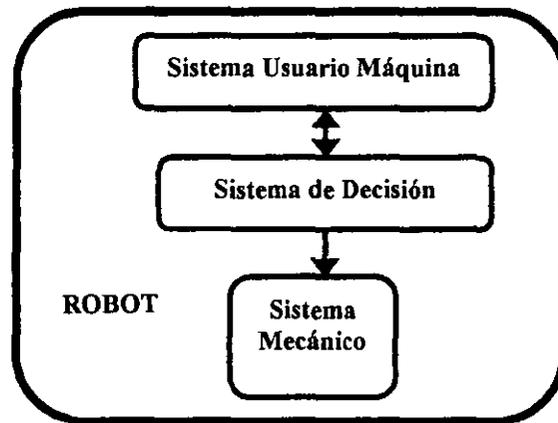


Figura 1.3 Tipo a) Robot sin sistema de percepción.

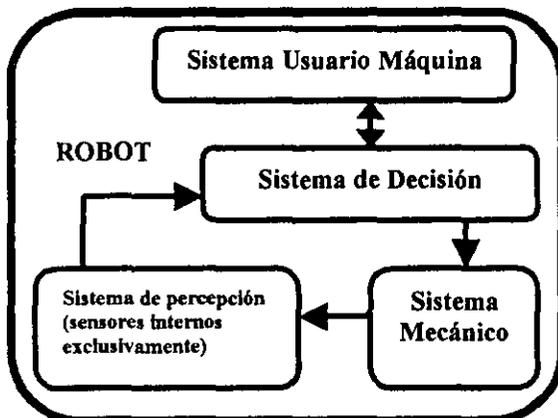


Figura 1.4 Tipo b) Robot con sensores internos, sistema sensorial únicamente.

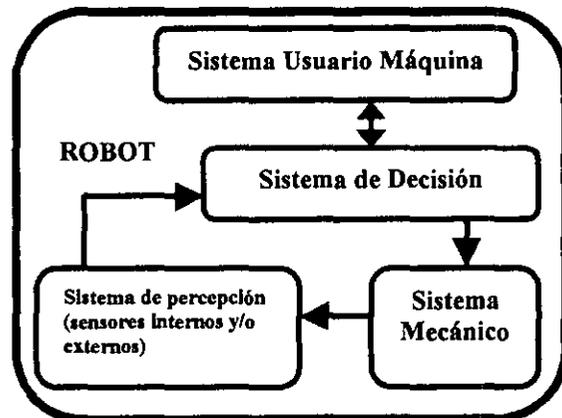


Figura 1.5 Tipo c) Robot con sensores internos y externos, sistema sensorial completo y complejo.



Según la definición anterior los robots tipo c son los únicos posibles inteligentes, siempre y cuando tengan la suficiente capacidad de tomar decisiones a partir de la información de sus sensores externos. El robot propuesto en este trabajo de tesis pertenece a este grupo.

La evolución de los robots conduce a una generación que incorpora los sentidos de la vista, el tacto, el oído e, incluso el olfato y el gusto. En la actualidad las aplicaciones crecen rápidamente y muchos sistemas de visión artificial y una gran variedad de sensores se encuentran disponibles en el mercado.

Una vez equipados los robots con sentidos parecidos a los humanos, y habiendo incorporado a éstos una amplia variedad de características antropomorfas, con el actual desarrollo de la microelectrónica es posible pensar que se puede enseñar a una máquina a pensar como el hombre.

1.2.4 Sistema de decisión

Este sistema tiene que ver con el procesamiento de la información proporcionada por el sistema de percepción y el sistema usuario máquina. Este sistema contiene las instrucciones de operación y algoritmos definidos para el sistema y control de las operaciones a realizar.

En general, este sistema está formado por microprocesadores o microcontroladores, los cuales llevan a cabo las tareas de recolección, reconocimiento, almacenamiento, control, procesamiento y transmisión de la información. Las acciones que lleva a cabo un microprocesador están en función de ciertas instrucciones almacenadas en memoria. A las series de instrucciones grabadas en memoria se le conoce con el nombre de "programa". Un programa es una secuencia lógica de operaciones las cuales son determinísticas y repetibles, útiles para la implementación de funciones y procesamiento de señales basados en algoritmos matemáticos y/o lógicos.

1.2.5 Sistema de usuario máquina

Este sistema tiene que ver con la transferencia de la información entre los diferentes niveles y proporciona la interfase hombre-máquina para la transferencia de la información del usuario. Cuenta con un sistema gráfico para visualizar la comunicación (es decir una pantalla), otro sistema para ingresar códigos de operación (un teclado o botonera), un programa para transformar estos códigos en señales eléctricas para la máquina (software de comunicación), y un cable que transporte a estas últimas al sistema de decisión.

1.2.6 Sistema de percepción

Este sistema tiene que ver con la obtención de información acerca del comportamiento del robot, los parámetros de entrada del sistema son ciertas propiedades o variables físicas mientras que los parámetros de salida están relacionados con la información por transmitir. El sistema de percepción lo integran los sensores tanto internos como externos.



Los sensores internos miden el estado propio del robot sin tomar en cuenta el entorno en que se encuentra. Generalmente se utilizan para medir la posición relativa que guardan puntos de referencia, ya sean eslabones o el desplazamiento en alguna articulación. Dentro este tipo de sensores tenemos a los codificadores tanto analógicos como digitales.

Algunos robots se auxilian de sensores del tipo externo, este tipo de sensores son aquellos que hacen captar o “sentir” el entorno al robot, y le informan al sistema de decisión el estado del mismo. Las cámaras de visión, sensores de tacto y esfuerzo, proximetros, sonares son algunos ejemplos de sensores externos.

1.2.7 Sistema mecánico

En un robot, el sistema mecánico está constituido por la estructura del esqueleto y el conjunto de cadenas cinemáticas formadas por los eslabones y articulaciones.

Un mecanismo es un medio para transmitir, controlar o restringir los movimientos relativos. Existen diversas configuraciones de mecanismos para realizar los movimientos de las articulaciones del robot y obtener la posición y la orientación final a la que se desea llegar.

Para los eslabones existe una clasificación según el número de articulaciones que contenga: primario, si tiene una articulación, secundario si tiene dos articulaciones y ternario, si posee tres articulaciones, etc. Una articulación es el punto, línea o área entre dos cuerpos que permite o no el movimiento relativo entre ellos.

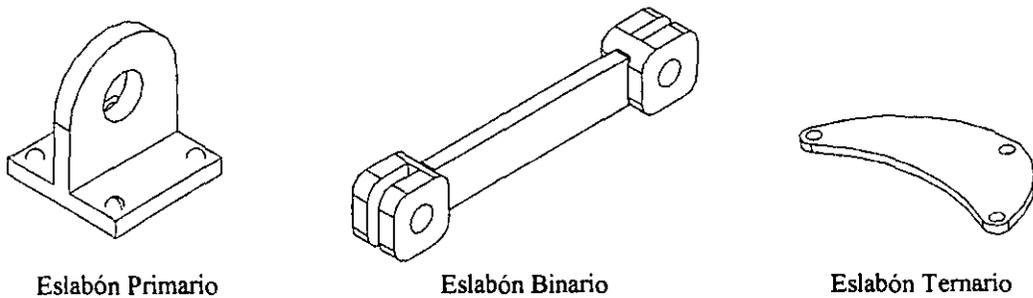
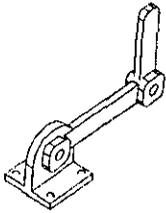


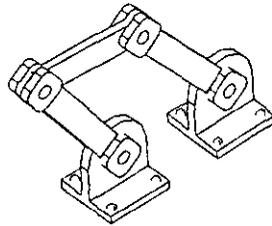
Figura 1.6 Tipos de eslabones.

Una cadena cinemática abierta es aquella que contiene dos eslabones que son primarios o unitarios y están colocados en los extremos, mientras que los eslabones internos son binarios.

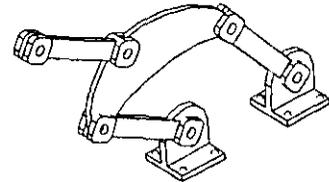
La cadena cinemática cerrada contiene únicamente eslabones binarios y la cadena cinemática compuesta es aquella que tiene combinaciones de ambas cadenas (abierta y cerrada) y eslabones con tres o más articulaciones.



Cadena Abierta



Cadena Cerrada

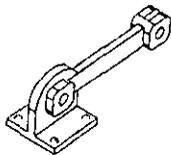


Cadena Compuesta

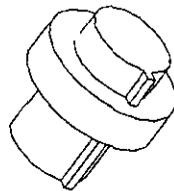
Figura 1.7 Cadenas cinemáticas.

Las articulaciones que permiten el movimiento se llaman pares cinemáticos. En el enlace, si dos elementos aparejados están en contacto superficial, se dice que forma un par inferior; si el contacto se da en un punto a lo largo de una línea, el par se conoce como par superior.

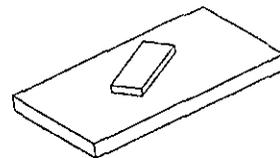
En la figura 1.8 se presentan los seis tipos diferentes de pares cinemáticos posibles, los dos primeros son los básicos, y los restantes se construyen a través de éstos.



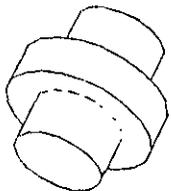
Rotacional
1 Grado de Libertad



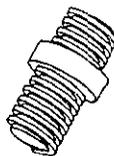
Prismática
1 Grado de Libertad



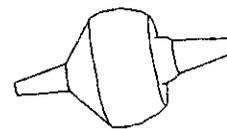
Plana
3 Grados de libertad



Cilíndrica
2 Grados de Libertad



Helicoidal
1 Grado de Libertad



Esférica
3 Grados de Libertad

Figura 1.8 Pares cinemáticos.

1.2.8 Actuadores

Los sistemas de accionamiento o impulso suministran al robot la potencia necesaria para su movimiento. Son dispositivos para conversión de energía, que transforman una potencia eléctrica, hidráulica o neumática en una potencia mecánica. Los elementos básicos



de accionamiento pueden clasificarse en actuadores rotacionales o lineales; los primeros son capaces de presentar rotación continua, como por ejemplo los motores, mientras que los segundos tienen un movimiento lineal limitado, como por ejemplo los pistones neumáticos.

Accionamiento hidráulico.

Una de las principales ventajas del accionamiento hidráulico es la capacidad para generar fuerzas de gran magnitud, lo cual es posible dadas las elevadas presiones de trabajo de los actuales sistemas hidráulicos. La elevada relación fuerza-peso es otra importante ventaja del accionamiento hidráulico que resulta en particular atractiva en situaciones donde el peso es una característica fundamental de la actividad, como en el caso de aeronaves, misiles y robots. Los motores hidráulicos son mucho más pequeños que los motores eléctricos con la capacidad necesaria para generar la misma potencia del sistema hidráulico. Para una potencia dada, un actuador hidráulico que trabaja a alta-presión requiere una velocidad de flujo de aceite muy baja; y, por lo tanto, puede ser bastante pequeño.

La rigidez de un accionador hidráulico es otra ventaja importante. El aceite es, para fines prácticos, incompresible, lo que hace que los actuadores hidráulicos sean insensibles a alteraciones en la carga. Esta es otra razón más para su gran popularidad en las industrias aeroespacial y de maquinado. La elevada rigidez también permite lograr un control muy preciso.

Las ventajas de gran potencia, elevada relación peso / potencia, gran rigidez y facilidad de control son opacadas hasta cierto punto por varios problemas prácticos, siendo los más serios:

- Los sistemas hidráulicos son costosos: la precisión en manufactura debe ser alta para mantener distancias de separación muy pequeñas entre las partes fijas y las partes móviles. Esto es necesario si se desea minimizar las fugas (y desperdicios de potencia).
- Dado que existe la posibilidad de fugas, puede resultar poco conveniente usar sistemas hidráulicos en entornos donde la higiene es importante, por ejemplo, al tratarse de alimentos.
- Es necesario contar con espacio para la tubería requerida por el sistema.

Accionamiento neumático.

Los primeros sistemas neumáticos utilizaban aire como elemento de trabajo, pero en la actualidad en algunas aplicaciones se emplean gases inertes y gases calientes. Las presiones de trabajo están por lo general limitadas a 10 bar. La ineficiencia en la compresión de los gases y los peligros inherentes al almacenamiento de gases a alta presión hacen necesarias estas limitaciones.



El uso de aire comprimido como fuente de energía ha aumentado rápidamente, en la actualidad se acepta en todas las ramas de la industria. Sus ventajas, muchas de las cuales son compartidas por los sistemas hidráulicos, pueden resumirse de la siguiente manera:

- Los componentes neumáticos son poco costosos.
- Los componentes son de fácil adquisición. La gama de válvulas es extensa y existe una gran variedad de tamaños de cilindros.
- Los componentes son confiables y su mantenimiento es sencillo y económico. El servicio por lo general puede llevarse a cabo en el campo, dado que solamente es necesario cambiar los sellos de las válvulas o los cojinetes de los cilindros.
- Los actuadores neumáticos no se queman cuando se atoran. Los actuadores hidráulicos también presentan esta ventaja.
- No existen riesgos de incendio cuando se emplea accionamiento neumático. Por ejemplo, pueden usarse en situaciones en donde el riesgo de una explosión impediría el uso de electricidad.
- El aire comprimido no es inflamable y, por lo tanto, el equipo neumático puede usarse bajo condiciones de alta temperatura en donde el uso de sistemas hidráulicos o eléctricos podría resultar peligroso o excesivamente costoso. La mayoría del equipo puede trabajar a temperaturas de hasta 80 a 90 °C, pero logra tolerar temperaturas más elevadas si se emplean sellos resistentes al calor.
- Los sistemas neumáticos son limpios.

Por supuesto también existen ciertas desventajas asociadas a los sistemas neumáticos y es necesario considerarlas cuidadosamente antes de instalar equipo neumático:

- La producción de aire comprimido es costosa y esto debe tomarse en cuenta si la planta no cuenta todavía con una compresora. Desde el punto de vista de la potencia, ésta es considerablemente más costosa que la eléctrica o la hidráulica.
- Es difícil lograr una precisión adecuada de alimentación debido a la naturaleza elástica del aire comprimido⁴. En este aspecto no puede competir con los sistemas hidráulicos o eléctricos.
- La transmisión de señales de aire a través de la tubería es mucho más lenta que la transmisión de señales eléctricas a través de cables. Por lo tanto, si los tiempos de señalización son críticos y las líneas son de gran extensión (más de 10 metros), deben utilizarse sistemas eléctricos.
- Los cilindros neumáticos ocupan gran cantidad de espacio y resultan costosos si se desea obtener potencias considerables. Pueden generarse potencias más grandes en forma más conveniente mediante el uso de sistemas hidráulicos.
- Los sistemas a base de aire comprimido pueden ser muy ruidosos.

Accionamiento eléctrico.

Con respecto a su aplicación a los robots, la energía eléctrica ofrece varias ventajas:

⁴ W. Deppert, K. Stoll, "Aplicaciones de la Neumática". Editorial Marcombo Boixareau



- Los actuadores eléctricos de corriente directa son fáciles de controlar: proporcionan un rápido control de la posición y de la velocidad con un elevado nivel de precisión.
- Se obtienen fácilmente y son poco costosos.
- Es más fácil diseñar un sistema de cableado.
- Los actuadores eléctricos tienen un funcionamiento silencioso.
- Los sistemas eléctricos son limpios.

Pero, nuevamente, como en todas las áreas tecnológicas, existen varias desventajas por considerar:

- Las relaciones peso / potencia y peso / par son reducidas, en comparación con los actuadores anteriores.
- Los torques pequeños requieren una gran cantidad de engranes y, debido al juego, se provocan problemas de control adicionales.

Comparación de sistemas de accionamiento.

Las propiedades de los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos descritas anteriormente permiten llegar a ciertas conclusiones relativas al uso potencial de cada una de estas formas de actuadores en el campo de los robots. Primero, es necesario distinguir entre actuadores directos e indirectos. Los impulsores directos no tienen enlaces mecánicos entre el actuador y el eslabón del impulsor. Los cilindros y motores hidráulicos y neumáticos pueden usarse como actuadores directos debido a sus elevadas capacidades de generación de fuerzas y pares. Los directos tienen varias ventajas: son compactos, lo cual permite su instalación en las articulaciones de los robots; son sencillos y fáciles de mantener.

Los impulsores indirectos requieren una transmisión mecánica entre el actuador y el elemento impulsado, generalmente con el propósito de incrementar la fuerza y el par de salida. Estas transmisiones pueden adoptar la forma de engranes, tornillos sinfin, impulsores armónicos, bandas, cadenas, etc. La relación de engranes de los impulsores indirectos se encuentra generalmente en el rango de 50:1 a 100:1 y esto produce un sistema más rígido, un sistema con transmisión de movimiento prácticamente unidireccional. Esta es una característica deseable en aplicaciones de maquinado y en aplicaciones que requieren movimientos rápidos a lo largo de distancias cortas.

Los impulsores directos con base en potencia hidráulica muestran una cierta compresibilidad del fluido, característica particular de los sistemas neumáticos y ésta puede ser una desventaja en aplicaciones de precisión. Una de las principales desventajas del impulsor indirecto es el volumen y el costo de las transmisiones mecánicas asociadas. Además, el juego mecánico en estas transmisiones puede afectar la repetitividad y la estabilidad en el movimiento. Como las transmisiones están diseñadas para la reducción de velocidad de los motores eléctricos, los impulsores indirectos rara vez resultan adecuados para los robots de gran tamaño que requieren movimientos a alta velocidad. En la tabla 1.1 se hace una comparación entre diferentes tipos de accionamiento. En ella se describen las ventajas y desventajas de las tres fuentes de poder.



	NEUMÁTICA	HIDRÁULICA	ELÉCTRICA
Producción de energía	Por medio de compresores estacionarios o móviles, accionados con motores eléctricos o motores de combustión interna. Sistema de compresores a elegir según la presión y el caudal necesario. En todas partes existe aire en cantidades ilimitadas para su compresión	En grupos motobomba estacionarios o móviles accionados por motores eléctricos o en casos excepcionales con motor de combustión interna. Pequeñas instalaciones con accionamiento manual. Las instalaciones móviles son excepcionales.	A nivel nacional generalmente, dependiendo de la localización (hidráulica, térmica, atómica).
Almacenaje de energía	El almacenaje en grandes cantidades es posible sin demasiados esfuerzos. El aire comprimido almacenado es transportable	El almacenaje es limitado, con aire como medio auxiliar, sólo es económico en pequeñas cantidades.	La acumulación resulta muy difícil y costosa: en la mayoría de los casos sólo es practicable en cantidades muy reducidas (baterías).
Transporte de la energía	Fácilmente transportable en líneas hasta aproximadamente de 1000 m. (pérdida de presión)	Transportable en líneas hasta aproximadamente 100 m (pérdidas de presión).	Fácilmente transportable a distancias ilimitadas.
Fugas	Aparte de la pérdida de carga no existen otras inconvenientes: el aire comprimido se expulsa a la atmósfera	Pérdida de energía y polución del ambiente debido al aceite (peligro de accidentes).	Sin conexión con otras piezas, no hay pérdida de energía (peligro de muerte con alta tensión).
Influencias ambientales	El aire comprimido es insensible a los cambios de temperatura: no hay peligro d incendio o de explosión, aún sin medidas especiales de protección. Con una gran cantidad de humedad en el aira, elevadas velocidades de flujo y bajas temperaturas ambientales existe el peligro de congelación	Sensible a cambios de temperatura, cuando hay fugas existe peligro de incendio.	Insensible a cambios de temperatura(zona normal material de aislamiento). En zonas peligrosas es necesario un dispositivo de protección contra incendio y explosión.
Costo de la energía	Bastante alto comparado con la hidráulica y la electricidad.		Mínimo costo de energía.
Movimiento lineal	Fácil de obtener con cilindros, gran aceleración y reducción de velocidad.	Fácil de obtener con cilindros, muy buena regulación con velocidades reducidas.	Sólo para recorridos cortos, motor lineal.
Giratorio	Con cilindros, cremallera y piñones, es fácil obtener hasta 360° con cilindros giratorios.	Fácil obtener hasta 360° o más mediante cilindros, cremallera y piñones.	Obtención de movimientos giratorios con elementos mecánicos.
Rotativo	Motores neumáticos en diferentes tipos de construcción, elevado número de r.p.m., sencilla inversión del sentido de giro.	Motores hidráulicos en diferentes tipos de construcción, con menos r.p.m. que los neumáticos, mayor regulabilidad a velocidades reducidas.	Rendimiento óptimo con accionamientos rotativos.
Fuerza lineal	Reducida potencia debido a la baja presión, sobrecargable hasta el paro, en cuya posición no se consume energía; esfuerzos económicos según la presión del aire y tamaño del cilindro.	Gran desarrollo de potencia debido a la alta presión, sobrecargable hasta el límite de seguridad (válvula de seguridad); para fuerzas estáticas (parado) consumo continuo de energía.	Poca eficiencia debido a los elementos mecánicos postconectados, no sobrecargable, gran consumo de energía con marcha en vacío.
Fuerza rotativa	Momento de giro total, incluso en la posición de paro sin consumo de aire, sobrecargable hasta el paro sin consecuencias negativas, reducida potencia, mayor consumo de energía con marcha en vacío.	Momento de giro total, incluso en la posición de paro, mayor consumo de energía, sobrecargable hasta el límite de seguridad (válvula d seguridad) gran desarrollo de potencia.	Bajo momento de giro en la posición de paro, no sobrecargable, pequeño desarrollo de potencia.
Regulabilidad	Fuerza: según presión (válvula reductora de presión) en la zona 1:10 pendiente de carga. Velocidad: por válvula estranguladora o de escape rápido, velocidad constante difícil.	Fuerza: según la presión con amplio margen poco dependiente de la carga Velocidad: muy buena y constante en trabajos lentos.	Solo posibilidades reducidas, muy costoso.
Manejo	Con pocos conocimientos se obtienen buenos resultados. El montaje y puesta en servicio de sistemas de mando es simple, buen instrumento de enseñanza.	Más difícil que con neumática, seguridad con altas presiones. Líneas d fuga y de retorno, problema de densidad.	Sólo con conocimientos profesionales, peligro de cortocircuito, una conexión equivocada puede destruir los elementos y el mando.
Ruidos	Ruidos del aire de escape desagradables; se reducen mucho con silenciadores.	Con altas presiones, ruido de las bombas y se producen vibraciones en la tubería.	Los contactores y los electroimanes producen ruido al ser conectados.

Tabla 1.1 Comparación de distintos factores de actuadores.



1.3 REFERENCIAS

- (1) D.McCloy, D.M.J. Harris. "Robótica, una introducción". Editorial Limusa. México 1993.
- (2) Gordon McComb, "The robot builder's Bonanza: 99 inexpensive Robotics Projects", editorial McGraw Hil, E.E,U.U.1987.
- (3) José M. Ángulo Usategui, "Robótica Práctica, Tecnología y aplicaciones". Editorial Paraninfo. Madrid 1986.
- (4) José M. Ángulo Usategui, Rafael Aviles, "Curso de Robótica". Editorial Paraninfo. Madrid 1986.
- (5) W. Deppert, K. Stoll, "Aplicaciones de la Neumática". Editorial Marcombo Boixareau.
- (6) LaTombe Jean Claude. "Robots Motion Planning". Kluwer Academics Boston 1991.



Capítulo II

ROBOTS CAMINANTES

2.1 INTRODUCCIÓN

Usualmente el campo de desarrollo de los robots se ha enfocado primordialmente a los robots manipuladores para las tareas de producción en la industria, sin embargo, tanto dentro como fuera de ella, existen diversas tareas que pueden ser llevadas a cabo por otro tipo de robots, llamados robots "móviles". Estos robots pueden llevar a cabo funciones tales como la exploración espacial y terrestre, búsqueda de yacimientos minerales, mantenimiento o reparación de equipos en ambientes difíciles o peligrosos (como en plantas nucleares), dentro de la agricultura, etc.

La investigación en el tema de los robots móviles tiene el potencial de abrirse espacio en todos estos campos, y presentar soluciones por medio o con base en microcontroladores, sensores, percepción, modelado del entorno y toma de decisiones.

Existen dentro de los robots móviles dos formas de locomoción o desplazamiento, el continuo y el discreto. Los robots de desplazamiento continuo son aquellos que utilizan ruedas o rieles como sistema de locomoción; su nombre se debe a que su medio de soporte se encuentra siempre en contacto con la superficie en la cual se desplaza el vehículo. Los robots de desplazamiento discreto, por otro lado, utilizan extremidades para soportarse. En este sentido, los robots con ruedas son por mucho los más populares por muchas razones prácticas, siendo la primera de ellas es que son más fáciles de construir y operar.

Los sistemas con piernas o robots caminantes, generalmente requieren un equipo más complejo respecto a los rodantes para tener la misma capacidad de carga. Sin embargo, como regla, un vehículo rodante tiene problemas para operar si la altura de los objetos por los cuales debe pasar excede el radio de las ruedas, siendo una solución simple pero impráctica el uso de ruedas mucho más grandes que cualquier obstáculo en su camino.



2.2 LOS ROBOTS CAMINANTES

Los robots caminantes ofrecen ventajas sobre los sistemas con desplazamiento mediante ruedas, ya que el campo de acción de los robots con ruedas está restringido a superficies lisas o planas donde no encuentren obstáculos que puedan impedir su desplazamiento.

Para el caso cuando los robots deben operar en un terreno accidentado, los rodantes no parecen ser una buena opción. Los robots caminantes o de movimiento discreto por medio de piernas, son una solución adecuada para el trabajo en éste tipo superficies, y además son capaces de maniobrar en espacios confinados, subir escaleras y transportar cargas.

Actualmente existe interés en el diseño de máquinas caminantes para ayudar a personas discapacitadas y para su empleo en usos industriales, agrícolas y militares. Su compleja estructura mecánica y sus problemas en el control han restringido su desarrollo en laboratorios.

Los robots caminantes, exhiben características similares con los manipuladores, particularmente en los sistemas mecánicos y de control. La anatomía de ambos puede evaluarse con las mismas ecuaciones, y dada una tarea de locomoción del caminante, establecida por la traslación de un punto a otro, da pie a la secuencia de movimiento de las piernas o extremidades, y entonces se pueden obtener las variables articulares, las cuales son reducidas en los robots caminantes por medio de la introducción del concepto de "pasos".

2.3 CARACTERÍSTICAS PARTICULARES

Los robots caminantes tienen que estar mecánicamente bien diseñados de acuerdo a las necesidades de control y movimiento para operar con eficiencia. Estos sistemas trasladan su cuerpo de un lado a otro por medio del movimiento de sus piernas a través de una secuencia repetida. Típicamente, cada pierna es levantada, para después moverla hacia delante, hacer que toque el piso, y finalmente empujar al cuerpo sobre ésta para darle al sistema el movimiento hacia delante. Esto es denominando el ciclo de movimiento de una pierna. Si esto se realiza repetidamente, el movimiento se realizará entonces mediante oscilaciones.

Estos movimientos de cada pierna no son independientes de los de las otras piernas, ya que están acopladas de tal forma que sus movimientos tienen tres restricciones¹:

¹ ASCE Specialty Conference on Robotics for challenging environments. "Robotics for challenging environments, proceedings of RCE II, New Mexico, June 1-6, 1996" American Society of Civil Engineers. New York. 1996.



- *Restricción de frecuencia.*- todos los ciclos de las piernas tienen la misma frecuencia, es decir presentan los mismos movimientos durante los tiempos dados para cada ciclo.
- *Restricción de fase.*- todas las piernas tienen una relación de fase con las demás para su operación. Los ciclos de movimientos que presentan las piernas son iguales pero se encuentran desfasados con cierta relación de acuerdo al número de piernas.
- *Restricción de amplitud.*- todas las piernas tienen una longitud definida y de igual magnitud para el paso que genera el ciclo de cada pierna.

De las tres anteriores, la restricción de fase es la más importante, ya que existe evidencia de que los animales con el mismo número de piernas tienden a exhibir un comportamiento similar de restricciones de fase. El número de tales relaciones de fase es usualmente pequeño, y es referido como pasos característicos, o pasos en forma abreviada.

2.3.1 Secuencia de pisadas

Para mayor comprensión, y con el fin de ilustrar la complejidad de las máquinas caminantes, se introduce la notación utilizada para la secuencia de las pisadas y sus posibles variaciones. Se toma como ejemplo un robot bípedo, como es el caso del ser humano. Para un bípedo existen dos secuencias posibles: el salto sobre dos piernas y la caminata o carrera, en la cual las piernas funcionan en forma secuencial.

Si las piernas se enumeran como 1 y 2, podemos describir estas secuencias como (1-2) y (1,2) respectivamente, en donde un guión entre los números indica un funcionamiento simultáneo y una coma indica un funcionamiento secuencial.

Usando esta notación pueden listarse seis secuencias posibles de funcionamiento de las patas en el caso de un trípodo:

1-2-3	Salto con tres patas.
$\left. \begin{array}{l} 1, 2-3, \\ 2, 1-3, \\ 3, 1-2 \end{array} \right\}$	Dos patas que se mueven como una.
$\left. \begin{array}{l} 1, 2, 3, \\ 2, 1, 3 \end{array} \right\}$	Una pata por vez: debe notarse que (3, 1, 2) y (2, 3, 1) son idénticos a (1, 2,3) ya que a lo largo de una serie de ciclos el orden de funcionamiento de las patas es el mismo.

Para los cuadrúpedos existen 26 secuencias posibles para el funcionamiento de las patas. La primera (1-2-3-4) es el salto sobre cuatro patas y en ella la acción es parecida al de una máquina con una sola pata, las otras secuencias se enumeran en la tabla 2.1.



Bessonov y Umonov² han usado métodos combinados para determinar el número de secuencias de movimiento de las patas para cualquier número de patas. Sus resultados, hasta para 10 patas, se muestran en la tabla 2.2.

Funciona efectivamente como bípedo	Funciona Efectivamente como trípedo		Cuadrúpedo
1,2-3-4	1,2,3-4	1,3-4,2	1,2,3,4
2,1-3-4	1,3,2-4	1,2-4,3	1,2,4,3
3,2-1-4	1,4,2-3	1,2-3,4	1,3,2,4
4,1-2-3	2,3,1-4	1,1-4,3	1,3,4,2
1-2,3-4	2,4,1-3	2,1-3,4	1,4,2,3
1-3,2-4	3,4,1-2	3,1-2,4	1,4,3,2
1-4,2-3			

Tabla 2.1 Secuencias posibles de funcionamiento de las patas en el caso de un cuadrúpedo.

2.3.2 Estabilidad estática

En la última columna de la Tabla 2.2 se enumeran las secuencias potencial y estáticamente estables. Un paso estáticamente estable es aquél en el cual el centro de gravedad está siempre contenido dentro de un área imaginaria definida por las patas de soporte, cuando el robot está en movimiento. Para lograr la estabilidad estática es necesario, por lo tanto, que cuando menos tres patas estén siempre en contacto con el piso. Esto requiere que una máquina andante estáticamente estable tenga al menos cuatro patas, es decir, tres patas que le sirvan de apoyo mientras la cuarta se levanta y se hace avanzar. En la tabla 2.2 se muestra que existen seis secuencias cuadrúpedas que satisfacen este requerimiento: en cada una de las seis solamente se mueve una pata por vez. Sin embargo, aun cuando las seis proporcionan tres bases para apoyo, se verá más adelante que sólo tres de ellas dan por resultado pasos que contienen siempre el centro de gravedad dentro de la zona de apoyo.

Número De patas	Número de secuencias	Número de secuencias que potencialmente presentan estabilidad estática
1	1	0
2	2	0
3	6	0
4	26	6
5	150	114

² Bessonov, A. P. y Umonov, N. W. "Choice o geometric parameters of walking machines", Mech. Mach. Theory 18. 1976.



Número De patas	Número de secuencias	Número de secuencias que potencialmente presentan estabilidad estática
6	1,082	1,030
7	9,366	9,295
8	94,586	94,493
9	1,091,670	1,091,552
10	14,174,522	14,174,376

Tabla 2.2 Resultados de las secuencias de Bessonov y Umonov

Las máquinas de una, dos y tres patas no son estáticamente estables. La máquina de una sola pata, o bastón saltarín, debe mantenerse constantemente en movimiento ya que de lo contrario, se cae. Básicamente, la máquina de un pata logra una estabilidad dinámica al saltar en la misma dirección en que se inclina. Así, aun cuando es estáticamente inestable, puede ser al mismo tiempo dinámicamente estable.

Napier³ describe la marcha humana como una actividad única durante la cual el cuerpo, paso a paso, vacila al borde de una catástrofe. El movimiento rítmico hacia adelante moviendo primero una pierna y después la otra, evita que caigamos de golpe. Aun cuando somos estáticamente inestables, no dejamos de ser dinámicamente estables. Varios investigadores han tratado de reproducir esta estabilidad dinámica en máquinas andantes bípedas, recurriendo a complejas fórmulas matemáticas y poderosas computadoras. Es interesante destacar que en julio de 1997, Honda Motor Company muestra al público su robot bípedo. Este robot posee un avanzado sistema de control y de locomoción que emula de manera muy aproximada la marcha humana.

Honda Human Robot	Información Técnica							
	<i>Nombre de la máquina caminante o proyecto: Honda Human Robot</i> <i>Fecha de comienzo y fin del proyecto: Diciembre 1996 - Julio 1997</i>							
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía	
	Largo	-----	Velocidad Máxima	0.85 m/s	Número de piernas	2	Actuadores	-----
	Ancho	-----	Peso	210 kg	Grados de Libertad Activos	12	Fuente de Energía	Batería 136V 7Ah (NiZn)
	Alto	1.8 m	Carga	5 kg por mano	Grados de Libertad Pasivos	-----	Consumo de Energía	-----

Tabla 2.3 Información técnica del Robot Honda.

³ Napier, J. "The antiquity of human walking", 1967.



2.3.3 Marcha

La marcha de una máquina andante define la trayectoria característica de las pisadas. En la marcha debe considerarse la duración de cada fase de la secuencia. Tanto la secuencia como la duración pueden tomarse en cuenta si la marcha se define en forma matricial. Si el estado elevado de un pie se designa por un 1 y el estado de asentamiento por un 0, entonces es posible construir una matriz que muestre el estado de todas las patas en todas las fases a través de todo el ciclo de una marcha.

Por ejemplo, la matriz de la marcha para el caminar de un bípedo se construye de la siguiente manera:

$$\begin{array}{rcc}
 & \text{Pata2} & \text{Pata1} \\
 \text{Fase 1} & 0 & 0 \\
 \text{Fase 2} & 0 & 1 \\
 \text{Fase 3} & 0 & 0 \\
 \text{Fase 4} & 1 & 0
 \end{array} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Al inicio de la fase 1, ambas patas están apoyadas sobre el piso ; en la fase dos se levanta la pata 1; en la fase tres la pata 1 se apoya nuevamente de manera que ambas patas estén sobre el piso; en la fase cuatro se levanta la pata 2 y se regresa la fase uno cuando la pata 2 se apoya nuevamente. Existen cuatro eventos en el caminar de un bípedo, dos levantamientos y dos asentamientos, y es por ello que la matriz del paso tiene cuatro renglones, el hecho de que sólo cambie un número al pasar de un renglón al siguiente prueba que estos eventos son distintos e independientes dentro de la marcha. Considérese, por otro lado, la matriz de marcha para el salto sobre dos patas;

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

En este caso, los levantamientos y asentamientos ocurren en forma simultánea de manera que son dos los numerales que cambian al pasar de un renglón al siguiente. Esta marcha se conoce como marcha singular. La marcha como la de los bípedos, en las cuales no ocurre el levantamiento y asentamiento simultáneo de los pies, se denominan no singulares. En general puede demostrarse que existen $(2n - 1)!$ marchas no singulares para una máquina con n patas.

Para el caso de los cuadrúpedos, se mencionó anteriormente que existen 26 secuencias posibles distintas para el movimiento de las patas y, de ellas, en 20 hay el movimiento simultáneo de dos o más patas. Por lo tanto las seis secuencias restantes forman la base de las marchas cuadrúpedas no singulares. Existen $7! = 5040$ marchas cuadrúpedas no singulares, cada una de las cuales involucra ocho fases: cuatro levantamientos y cuatro asentamientos. El gran número de marchas no singulares se reduce



drásticamente si se exige, con el fin de mantener la estabilidad estática, que tres patas estén en el piso en cualquier momento dado. Esta limitación reduce el número de marchas cuadrúpedas a seis (conocidas como marchas reptantes) con las secuencias:

- (a) 1, 2, 4, 3,
- (b) 1, 3, 4, 2,
- (c) 1, 4, 2, 3,
- (d) 1, 2, 3, 4,
- (e) 1, 3, 2, 4,
- (f) 1, 4, 3, 2,

La figura 2.1 ilustra los patrones de pisadas para las seis marchas reptantes de un cuadrúpedo.

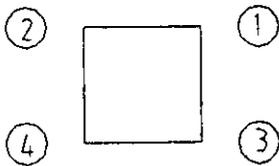
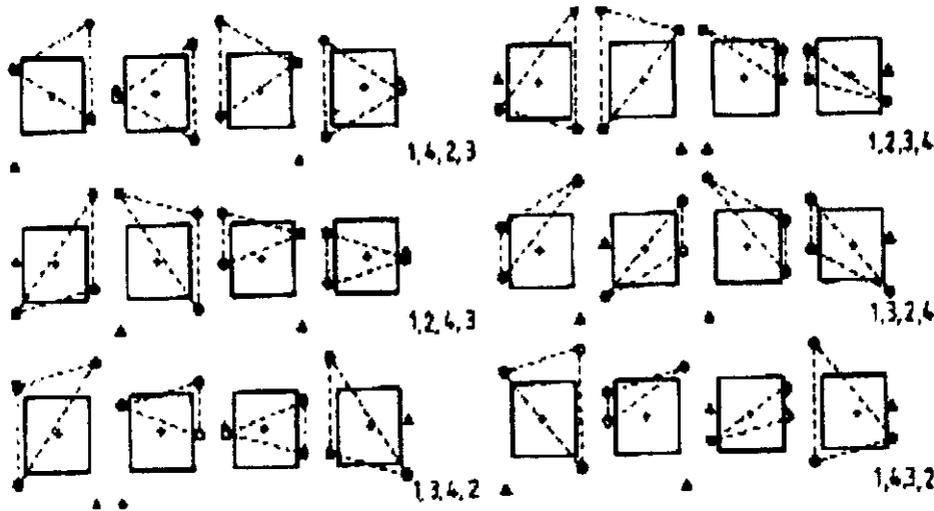


Diagrama de numeración de las patas

Figura 2.1 Marchas reptantes de un cuadrúpedo.

La marcha (1,4,2,3) de la figura 2.1 representa los patrones de pisada de la marcha para el gateo de un cuadrúpedo, cuya matriz de marcha es la siguiente:



	Pata 4	Pata 3	Pata 2	Pata 1	
Fase 1	0	0	0	0	=
Fase 2	1	0	0	0	
Fase 3	0	0	0	0	
Fase 4	0	0	1	0	
Fase 5	0	0	0	0	
Fase 6	0	1	0	0	
Fase 7	0	0	0	0	
Fase 8	0	0	0	1	

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al inicio de la fase 1, todas las patas se encuentran apoyadas sobre el piso; en la fase 2 se levanta la pata 4; en la fase 3 la pata 4 se apoya nuevamente de manera que todas están apoyadas en el piso; en la fase 4 se levanta la pata 2 y en la fase 5 se vuelve apoyar. En las demás fases se sigue una secuencia similar con las patas que restan. Por último cuando la fase 8 es realizada se regresa a la fase 1. El gateo cuadrúpedo es simplemente la alternancia entre las posturas en tres y cuatro patas.

La estabilidad de una marcha no puede determinarse sólo a partir de la matriz de marcha; también debe conocerse el instante en el cual se inicia cada fase y tomar en consideración los siguientes parámetros:

El factor de trabajo β se define como la cantidad de tiempo, como proporción del periodo T , que una pata permanece sobre el suelo. De aquí que en una marcha regular todas las patas tengan los mismos factores de trabajo, t_j es el tiempo normalizado con respecto al periodo T , en el cual la pata j se apoya. Se debe notar que transcurre un intervalo $(1 - \beta)T$ entre el levantamiento de un pie y su asentamiento.

Ahora se añade otra restricción al requerir, como lo hace la naturaleza, que las marchas sean simétricas, es decir, que el movimiento de una pata derecha (j)(non) esté desfasado medio periodo con respecto a la pata izquierda correspondiente ($j + 1$)(par). Por lo tanto, para el gateo de un cuadrúpedo.

$$t_2 = t_1 + 0.5 \quad \text{y} \quad t_3 = t_4 + 0.5$$

Si se selecciona $t_j = 0$; $t_4 = 0.25$; $\beta = 11/12$, se llega a la progresión mostrada en la figura 2.2. En este diagrama es importante distinguir entre paso y marcha. Un paso se define aquí como la distancia que la máquina avanza mientras una pata dada está en contacto con el suelo. El tranco es la distancia que se avanza durante un ciclo completo de una marcha en particular. La relación entre paso y tranco puede determinarse de la siguiente manera: si la máquina avanza a una velocidad constante V entonces, como cada pata está en el suelo un tiempo βT , la máquina avanzará βTV mientras se apoya un pie, es



decir, el paso S es βTV . Por otra parte, el tranco L , tiene una longitud TV . Por lo tanto, el tranco $L = S/\beta$.

Así, en la figura 2.2, el tranco = $(12/11)$ veces el paso. En la figura se muestra que la pata 1 se apoya en $t_1 = 0$. La pata 4, entonces, se levanta en $2T/12$ cuando la máquina se ha movido $L/6$ hacia adelante. La pata 4 se apoya de nuevo en $3T/12$ cuando la máquina ha llegado al punto $L/4$ y así sucesivamente. Los apoyos alternativos entre tres y cuatro patas y un análisis de la figura muestran que el centro de gravedad está siempre dentro de la base suministrada por las patas de apoyo. La máquina es siempre estáticamente estable durante esta marcha. Se ha demostrado que esta estabilidad es óptima para esta marcha cuando $\beta = 11/12$, $t_1 = 0$, $t_4 = 5/12$, $t_2 = 1/2$, $t_3 = 11/12$ y, con la configuración de la figura 2.2, cuando el paso es el doble de la distancia axial entre el centro de gravedad y el punto de fijación de la pata⁴.

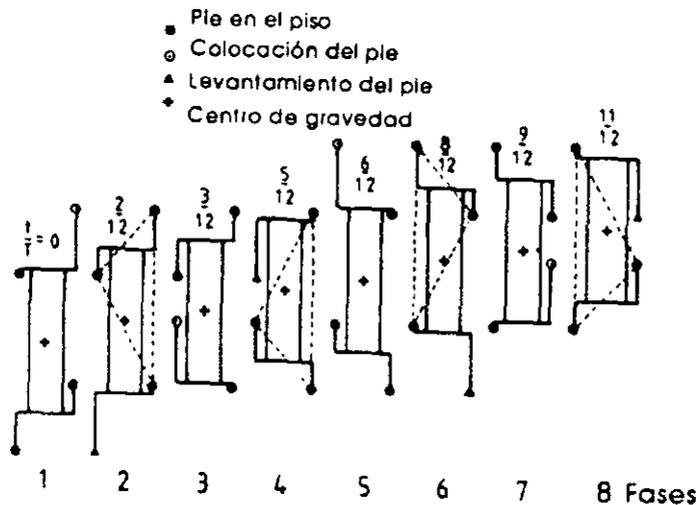


Figura 2.2 Progresión de una máquina cuadrúpeda.

Para una marcha de gateo regular, que requiere que cuando menos tres patas estén sobre el suelo en un momento dado, el valor mínimo del factor de trabajo es 0.75. Una marcha con un valor menor de β tendrá instantes en los que solamente habrán dos patas sobre el suelo. Para la determinación de la estabilidad según los criterios mencionados, sólo es necesario conocer la posición de las patas en relación al centro de gravedad.

Puede lograrse una mayor estabilidad en una máquina caminante aumentando el número de patas. Por ejemplo, los insectos pueden mover sus seis patas en 1082 secuencias diferentes y 1030 de estas secuencias son potencialmente estables. Sin embargo, el requerimiento de simetría del movimiento reduce este número a 24. Dos de las secuencias

⁴ McGhee, R.B. y Frank, A. A. "On the stability properties of quadruped creeping gaits, Math. Criterio utilizado en la tesis para el diseño mecánico.



se ilustran en la figura 2.3, donde la primera figura (parte superior) muestra la llamada marcha trípode, en la cual tres patas se mueven al mismo tiempo (1-4-5, 2-3-6) y la máquina descansa siempre en forma estable sobre tres extremidades. Esta es, por supuesto, una marcha singular. La figura 2.3 (parte inferior) ilustra la marcha no singular de un hexápodo, basado en la secuencia (2, 5, 3, 1, 6, 4). Esto se conoce como marcha ondulada, es decir, una marcha en la que las patas adyacentes se mueven en forma sucesiva. Estas marchas son particularmente estables. Al consultar nuevamente la figura 2.1, en la que se muestra el ganeo cuadrúpedo, se confirma que éste es también una marcha ondulada (1, 4, 2, 3).

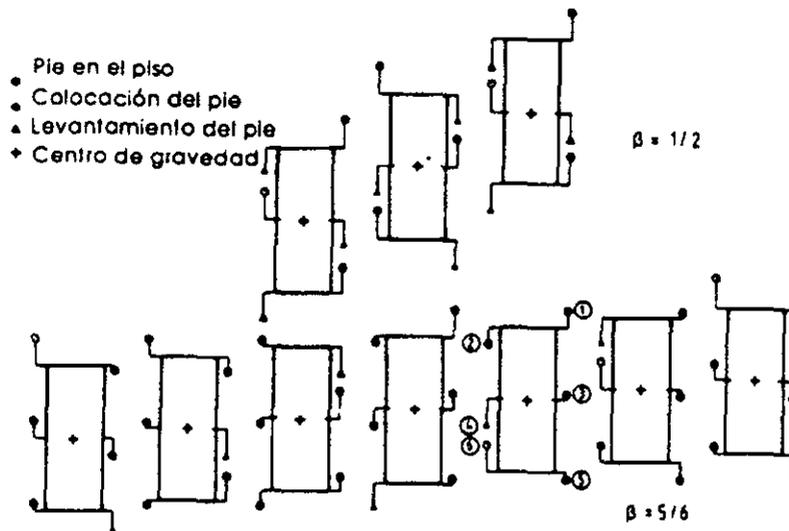


Figura 2.3 Marchas para un robot hexápodo: marcha trípode y ondulada.

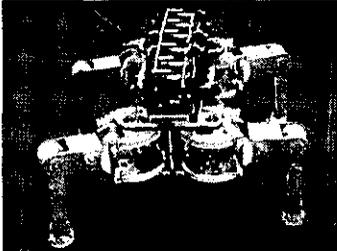
2.4 ESTADO ACTUAL DE LOS ROBOTS CAMINANTES

La adaptabilidad al terreno es probablemente el problema específico más importante a que se enfrentan los robots caminantes, es necesario para los caminantes el modelado del terreno, para generar decisiones de acuerdo al modelado de éste.

Los pasos pueden ser modelados mediante "time delays" o retardadores de tiempo, y un generador central de señales. El concepto de paso (gait) ha sido observado desde tiempos inmemoriales por el hombre, el cual dibujaba el movimiento de las piernas de los animales en las cavernas en la era prehistórica. Tiempo después se encuentran las posturas humanas y animales de los egipcios. En 1880 Muybridge y Marery se dedicaron a estudiar las variaciones en el movimiento de los equinos, utilizando técnicas fotográficas, principalmente en mamíferos. En los sesenta una nueva generación de científicos puso atención en la teoría de los pasos, primero enfocándose en una autómata estable, para después estudiar su estabilidad estática.



Collie II		Información Técnica						
		Nombre de la máquina caminante o proyecto: <i>Collie II</i> <i>Universidad de Tokyo</i>						
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía	
	Largo	0.42 m	Velocidad Máxima	-----	Número de piernas	4	Actuadores	-----
	Ancho	0.24 m	Peso	7 kg	Grados de Libertad Activos	12	Fuente de Energía	-----
	Alto	0.38 m	Carga	-----	Grados de Libertad Pasivos	8	Consumo de Energía	-----

TITAN VIII		Información Técnica						
		Nombre de la máquina caminante o proyecto: <i>TITAN VIII</i> <i>Instituto Tecnológico de Tokio</i>						
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía	
	Largo	0.6 m	Velocidad Máxima	-----	Número de piernas	4	Actuadores	DC servos
	Ancho	0.4 m	Peso	19 kg	Grados de Libertad Activos	12	Fuente de Energía	Motor DC
	Alto	0.25 m	Carga	5-7 kg	Grados de Libertad Pasivos		Consumo de Energía	-----

IOAN		Información Técnica						
		Nombre de la máquina caminante o proyecto: <i>IOAN</i> Fecha de comienzo y fin del proyecto: 1994 - 1996 Costo del proyecto: 200000 BEF (Franco Belgas) ULB Service des Constructions Mecaniques et Robotique						
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía	
	Largo	0.4 m	Velocidad Máxima	0.04 m/s	Número de piernas	6	Actuadores	DC servos
	Ancho	0.1 m	Peso	1.2 kg	Grados de Libertad Activos	16	Fuente de Energía	-----
	Alto	0.15 m	Carga		Grados de Libertad Pasivos	0	Consumo de Energía	16 W



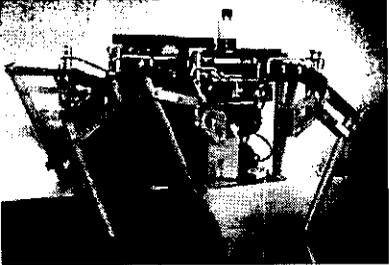
HYDRAUMAS III		Información Técnica							
		<i>Nombre de la máquina caminante: Hydraumas III</i> <i>Fecha de comienzo y fin del proyecto: verano 1997 verano 1999</i>							
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía		
	Largo	0.85 m	Velocidad Máxima	0.25 m/s	Número de piernas	6	Actuadores	Pistones hidráulicos.	
	Ancho	0.9 m	Peso	85 kg	Grados de Libertad Activos	9	Fuente de Energía	Bomba hidráulica	
	Alto	0.76 m	Carga	60 kg.	Grados de Libertad Pasivos	0	Consumo de Energía	-----	

Tabla 2.5 Ejemplos de robots caminantes.



2.5 REFERENCIAS

- (1) ASCE Specialty Conference on Robotics for challenging environments. "Robotics for challenging environments, proceedings of RCE II, New Mexico, June 1-6, 1996" American Society of Civil Engineers. New York. 1996.
- (2) Borenstein, Johann. "Navigating mobil robots. Systems & Techniques".. A K Peters. Massachusetts. 1996.
- (3) D.McCloy, D.M.J. Harris. "Robótica, una introducción". Editorial Limusa. México 1993.
- (4) Jones & Flynn. "Mobile robots. Inspiration to implementation" A K Peters. Massachusetts. 1993.
- (5) http://www.walking_machines_katalog.html
- (6) http://www.honda.co.jp/home/hpr/e_news/robot/index.html
- (7) <http://mozu.mes.titech.ac.jp/research/walk/walk.html>



Capítulo III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de diseño se tienen en cuenta una serie de fases, desde el reconocimiento de la necesidad o problema, hasta la presentación del producto o sistema que la satisface. Entre cada fase existe siempre una retroalimentación para poder hacer eficiente el resultado final, de manera que este proceso o metodología de diseño, difícilmente es secuencial, sino que se vuelve iterativa. En la figura 3.1 se muestran las fases del diseño.

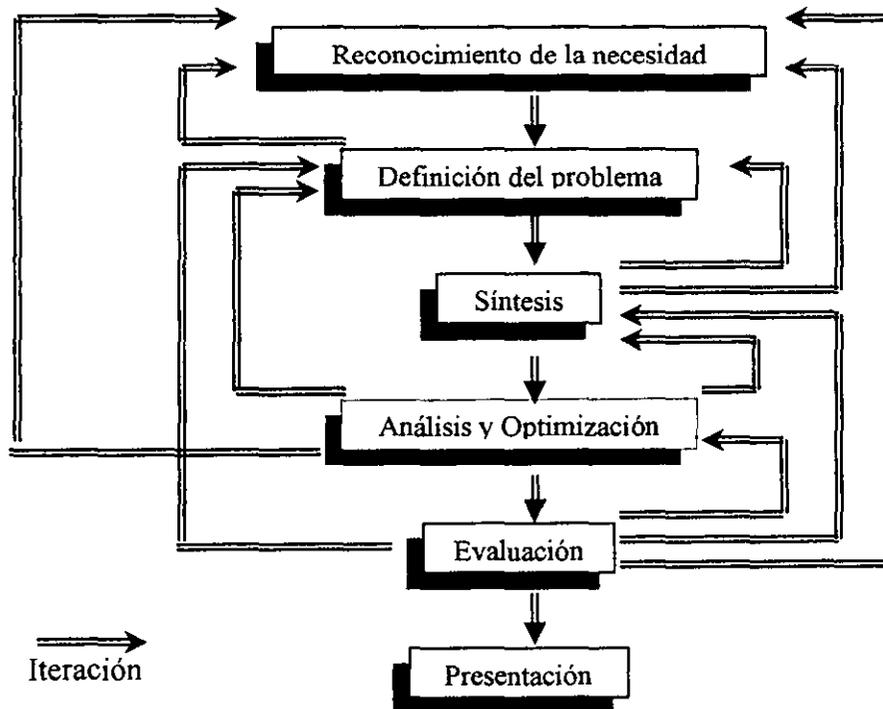


Figura 3.1 Fases del diseño.



En este sentido, al adentrarse en cada una de estas fases, se presentan puntos críticos o de alto interés, los cuales integran lo que se denominan las consideraciones de diseño, como por ejemplo, las propiedades que requerimos de nuestro producto final (resistencia, confiabilidad, utilidad, costo, flexibilidad, rigidez, mantenimiento, utilidad, etc.). Tales consideraciones dan la pauta para modificar, analizar y delimitar los elementos del sistema o producto final, disminuyendo la cantidad de caminos alternos para resolver el mismo problema.

El diseño que se presenta en este trabajo de tesis constituye una primera solución en el desarrollo de un robot caminante, a partir de una investigación del estado del arte sobre máquinas caminantes, y en este sentido es susceptible de posteriores mejoras a partir de los problemas descubiertos en la integración del mismo. Es de esta forma que el proceso de diseño queda abierto a subsecuentes iteraciones entre las fases que lo integran para optimizarlo, o realizar experimentos con la máquina caminante, y hasta inclusive redefinirlo, con nuevas especificaciones, tomando como base a este primer diseño, a partir de sus conclusiones.

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Dentro de los capítulos anteriores se mencionaron aspectos generales de la robótica, y en especial de los robots móviles. Tomando esto como base, se estudiaron las diferentes configuraciones que los robots móviles de desplazamiento discreto presentan actualmente, identificando sus ventajas y desventajas en cuanto a flexibilidad, control, costo, etc., y de esta manera se concluyó lo siguiente:

- Llevar a cabo la construcción de un robot de cuatro patas.- La configuración hexápoda es la más recurrida en la construcción de robots caminantes, ya que presentan en la marcha gran estabilidad tanto dinámica como estática. Al disminuir el número de extremidades en un robot la estabilidad estática disminuye, los robots de 1, 2, y 3 patas son los que presentan menor estabilidad estática durante el caminado, pero pueden generar una estabilidad dinámica gracias al sistema y algoritmo de control. Además presentan una mayor simplicidad en el control por lo que se refiere al número de actuadores y carecen de flexibilidad en cuanto al movimiento de sus extremidades, y por tanto a la adaptación del terreno donde siguen sus trayectorias. Con base en estos argumentos se decidió realizar un trabajo que tuviera una buena combinación entre la dificultad del control y la estabilidad de la marcha. Finalmente se optó por una configuración cuadrúpeda, cuyas ventajas y desventajas se identifican a lo largo del presente trabajo.
- Incluir tres grados de libertad en cada pata .- Aunque se podrían disminuir los grados de libertad para cada pata, tres le permiten un movimiento más flexible para adaptarse a terrenos donde un móvil o un caminante con menos grados de libertad tendría problemas.



- Utilizar materiales ligeros.- Existe un cierto rango de materiales que cuentan con una densidad baja, y alta resistencia, sin embargo por facilidad de adquisición, manufactura y costos, se eligió aluminio para la construcción de las patas. Algunas piezas son de acero plata sobre todo los ejes de rotación, donde descansan los rodamientos de las articulaciones y donde se presentan la concentración de las fuerzas que actúan en el sistema. En lo que respecta al material de la base del cuerpo, se optó por hacer una sola placa de un material suficientemente rígido, que soportara a todos los componentes, de menor densidad y similar resistencia al aluminio, por lo que se utilizó Nylamid.
- Elegir actuadores eléctricos como sistema de impulsión.- Debido a su relativo bajo peso, son fáciles de controlar: proporcionan un rápido control de la posición y de la velocidad con un elevado nivel de precisión. Se obtienen fácilmente y son poco costosos. Los sistemas hidráulicos o neumáticos, caracterizados por su capacidad para generar fuerzas de gran magnitud, no representan una buena opción, ya que no se cuenta con los recursos para llevar a cabo estos sistemas de actuación.
- Utilizar una transmisión por medio tornillos de potencia, en dos actuadores para obtener dos grados de libertad, y un sistema piñón-cremallera en otro actuador para obtener un tercero.- Una desventaja de los motores eléctricos es la baja generación de potencia. Para contrarrestar este hecho, con el uso de mecanismos de reducción de velocidad se aumenta la capacidad de carga.

El diseño conceptual del prototipo cuadrúpedo, con tres GL en cada pata, de actuación eléctrica es presentado en la siguiente figura:

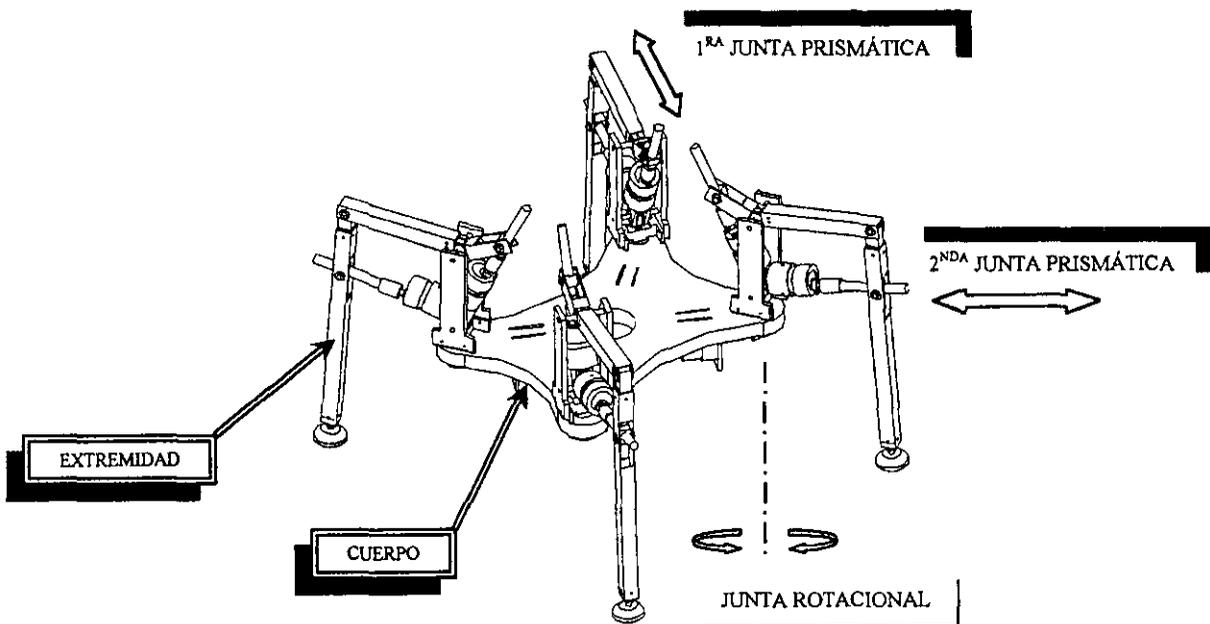


Figura 3.2 Diseño del robot.



3.3 DESCRIPCIÓN DE LA EXTREMIDAD

3.3.1 Propuesta de mecanismo y grados de libertad

La figura 3.3 muestra el mecanismo propuesto para una extremidad del robot, el cual consiste en un paralelogramo modificado con dos grados de libertad en un plano y un tercer grado debido a la rotación de la extremidad, obteniendo con esto un movimiento en el espacio.

El mecanismo del paralelogramo está formado por los eslabones R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , se dice paralelogramo porque consta de cuatro eslabones en cadena cerrada. Dentro de nuestra propuesta, el eslabón R_4 es variable en la longitud (integrado por el soporte del motor 2, el motor 2, y el tornillo 2), a este tipo eslabonamiento se le conoce como paralelogramo modificado.

La extremidad se puede dividir en tres sistemas:

- Sistema de ascenso – descenso.
- Sistema de apertura – cierre.
- Sistema de rotación.

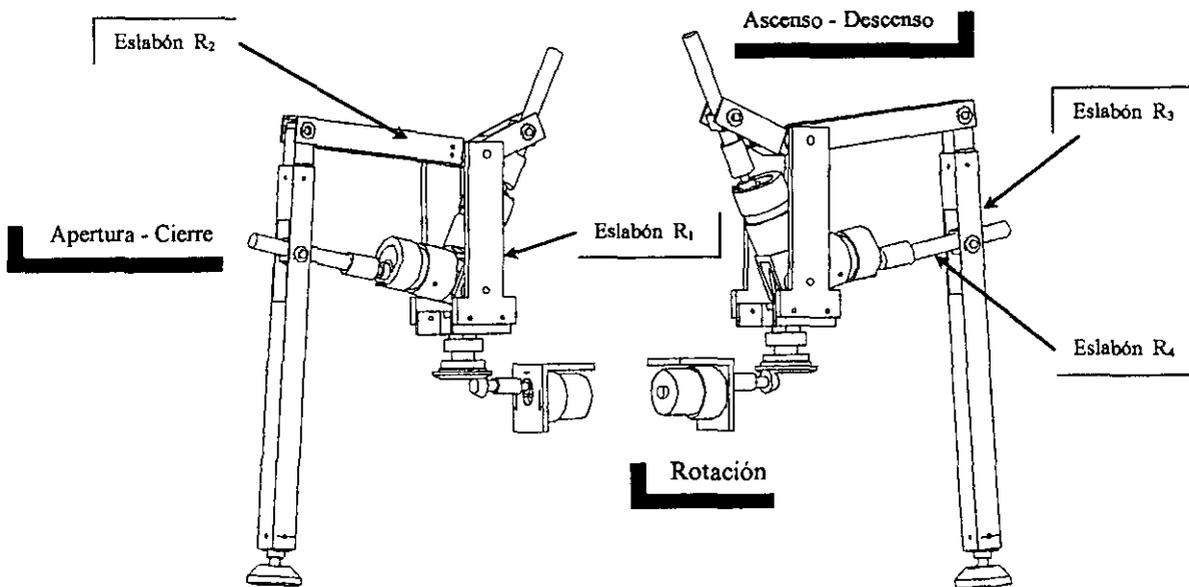


Figura 3.3 Extremidad del robot.

3.3.2 Sistema de ascenso - descenso

El sistema está formado por el motor 1, su soporte articulado, el tornillo de potencia uno, el cople entre motor y tornillo, la tuerca articulada al eslabón 2, el eslabón 2 y su extensión.



El motor 1 hace girar al tornillo 1 directamente acoplado sobre su flecha, y por lo tanto se imprime un avance lineal a la tuerca 1 que se encuentra sujeta con una articulación a la extensión del eslabón 2.

La extensión del eslabón 2 forma un cuerpo rígido con el eslabón 2, el cual esta articulado sobre el eje 1, de manera que al moverse linealmente la tuerca 1 sobre su tornillo, levanta o baja al punto de apoyo de la extremidad debido al mecanismo de paralelogramo.

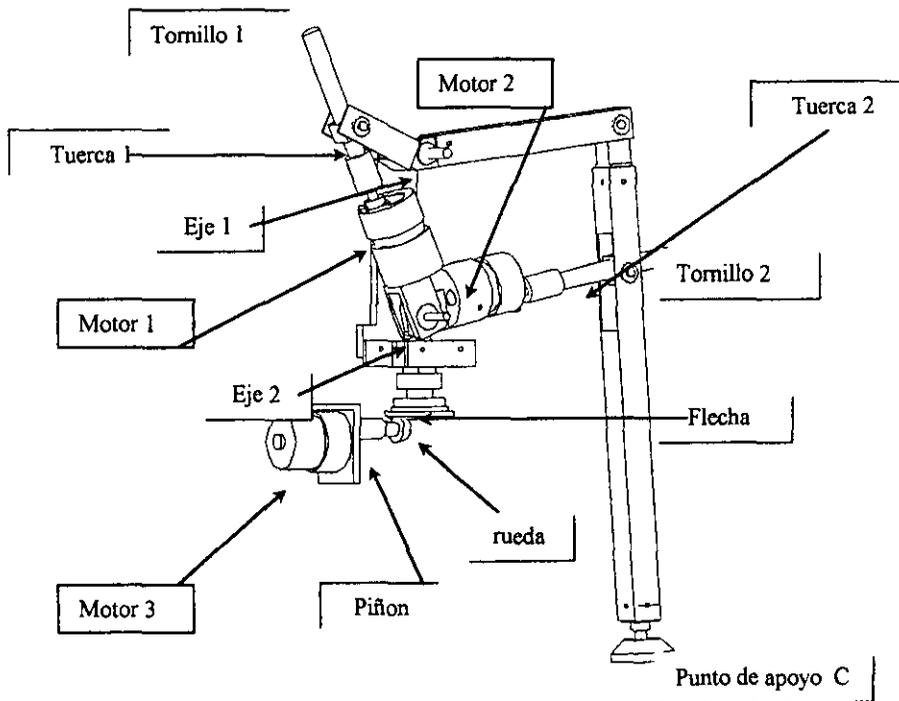


Figura 3.4 Partes de la extremidad.

3.3.3 Sistema de apertura - cierre

Esta formado por el motor 2, su soporte (articulado al eje 2), el tornillo 2, el cople, la tuerca 2, y el eslabón 3.

Al girar el motor 2, gira el tornillo 2, y desplaza linealmente a la tuerca 2 sobre el tornillo, la tuerca tiene dos brazos o ejes articulados al eslabón 3, y lo hace girar sobre el final del eslabón 2, haciendo que el punto P se aleje o acerque al cuerpo como se muestra en la figura 3.5.

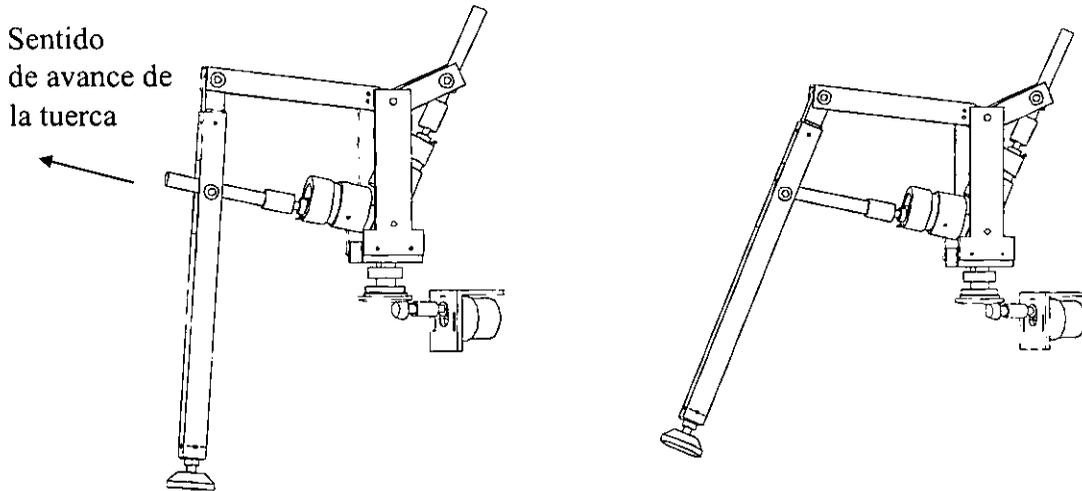


Figura 3.5 Extensión de la extremidad.

3.3.4 Sistema de rotación

Este sistema le permite a la extremidad del robot tener una rotación respecto al cuerpo, ya sea apoyando la extremidad en el suelo para empujar al cuerpo y obtener un avance, o con la pata levantada, para que la extremidad tenga un desplazamiento relativo al cuerpo y logre dar un paso. El sistema de rotación lo conforma el motor tres, su soporte (sujeto al cuerpo), un piñón (engrane cónico pequeño) sujeto al motor, el cople entre ambos, así como la rueda (engrane cónico grande), sujeta a la flecha que hace girar al mecanismo de paralelogramo.

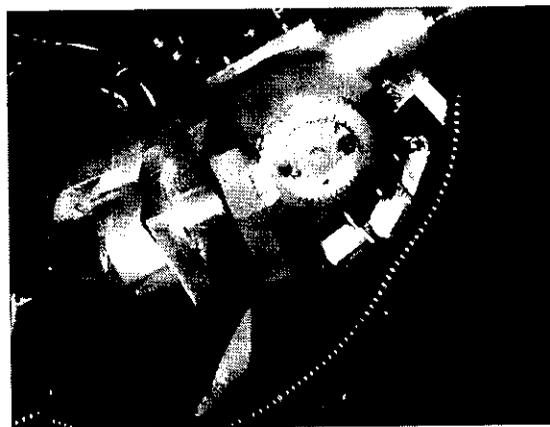


Figura 3.6 Piñón y rueda.



3.4 TRANSMISIÓN DE POTENCIA

3.4.1 Engranés cónicos, piñón-rueda

Para llevar a cabo el movimiento de rotación de la pata se utilizan dos engranes cónicos, debido a que se trató de ahorrar espacio en cuanto a la colocación de los motores número 3. Estos motores fueron colocados sobre el cuerpo, con sus ejes cortando a 90° los de las flechas y del giro mismo de la extremidad, como se puede observar en la figuras 3.7 y 3.5.

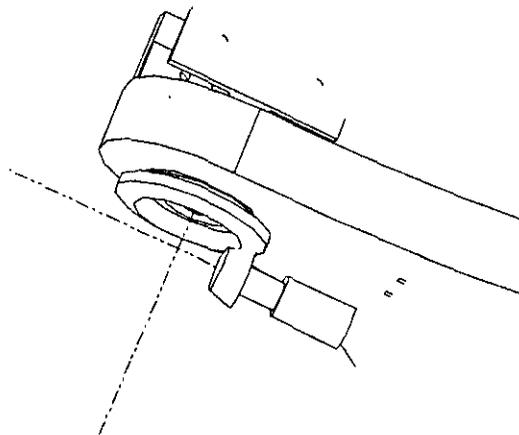


Figura 3.7 Sistema de engranes cónicos, con ángulo de ejes de 90°.

En este sentido para transmitir el movimiento angular del motor 3 a la extremidad (rotación de la pierna), se utilizaron un piñón (acoplado al motor) y una rueda (acoplada a la extremidad) cónicas, con ángulo de ejes de 90°.

El engranaje piñón (15 dientes) y rueda (43 dientes) se emplearon para obtener una reducción extra a la de la caja del motor, y poder ganar par sobre la pata.

La nomenclatura para este tipo de engranes se muestra en la figura 3.8. El paso de los engranes cónicos se mide en el extremo grande del diente, y el paso circular y el diámetro de paso se calculan en la misma forma que en el caso de los engranes cilíndricos rectos, donde el paso circular se define como la distancia, medida sobre la circunferencia de paso, entre determinado punto de un diente, y el correspondiente de uno inmediato, es decir, la suma del grueso del diente y el ancho del espacio entre dos consecutivos.

El diámetro de paso es el diámetro de la circunferencia teórica en el que generalmente se basan todos los cálculos, o bien, como la relación entre el número de dientes N , y el paso diametral P .

$$d = \frac{N}{P} \quad 3.1$$

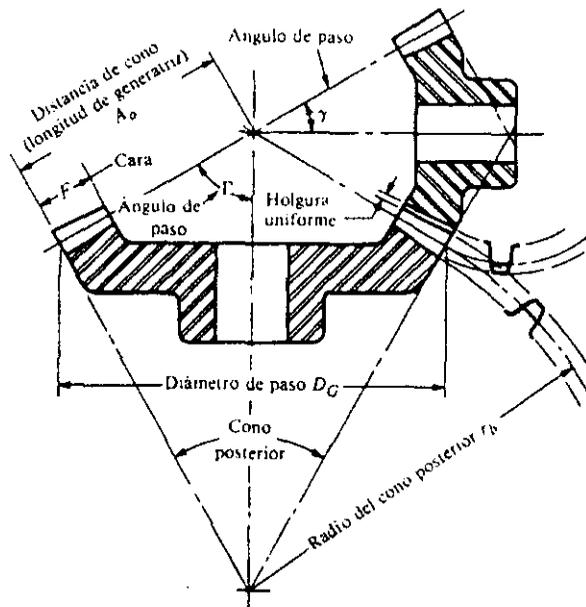


Figura 3.8 Nomenclatura de engranes cónicos.

El ángulo de paso γ del piñón (P), y Γ de la rueda (G), están definidos de la siguiente manera:

$$\gamma = \text{ARCTAN} \left(\frac{N_P}{N_G} \right) \quad 3.2$$

$$\Gamma = \text{ARCTAN} \left(\frac{N_G}{N_P} \right) \quad 3.3$$

Para determinar las cargas en el eje o árbol y en los cojinetes, la práctica usual consiste en utilizar la carga tangencial o transmitida que ocurriría si todas esas fuerzas se concentran en el centro o punto medio del diente, y aunque la resultante ocurre en alguna parte entre el punto medio y el extremo grande del diente, sólo se induce un error mínimo al adoptar esta hipótesis (figura 3.9).

En el caso de la carga transmitida, es decir para mover la extremidad, se tiene:

$$W_t = \frac{T}{r_{med}} \quad 3.4$$

Donde T es el momento de torsión necesario para girar la extremidad, y r es el radio de paso en el centro del diente del engrane cónico mayor (rueda).

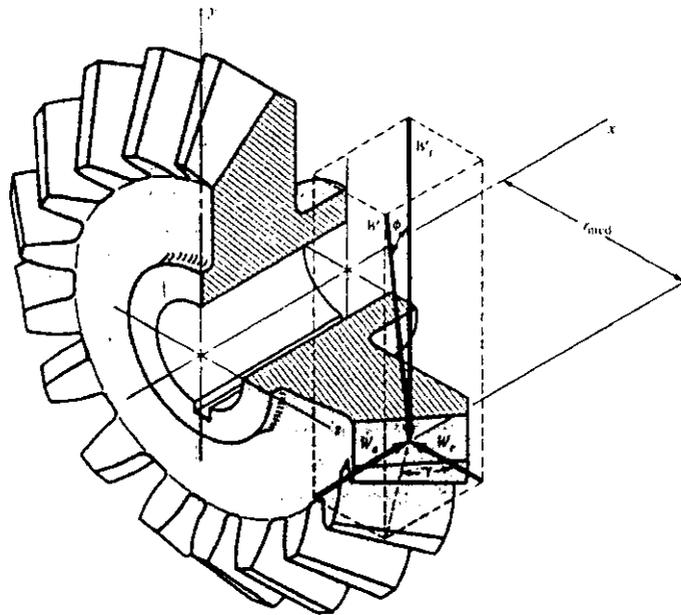


Figura 3.9 Fuerzas sobre un engrane cónico.

La fuerza W que actúa en el centro del diente tiene tres componentes: una fuerza tangencial W_t , una fuerza radial W_r y una fuerza axial W_a . Estas dos últimas son absorbidas por los rodamientos que soportan el giro de las flechas, y se pueden obtener a partir de la trigonometría:

$$W_r = W_t \tan \phi \cos \gamma \quad 3.5$$

$$W_a = W_t \tan \phi \sin \gamma \quad 3.6$$

Ahora bien, el par necesario en el motor tres puede quedar definido por la siguiente expresión:

$$T_{mot} = \left(\frac{r_{med} P}{r_{med} G} \right) (T) \quad 3.7$$



3.4.2 Tornillo de potencia

La transmisión de la potencia mecánica de los motores 1 y 2, hacia el mecanismo de paralelogramo, en sus eslabones 2 y 3 se realiza por medio de tornillos de potencia de rosca cuadrada, como se muestra en la figura 3.10.

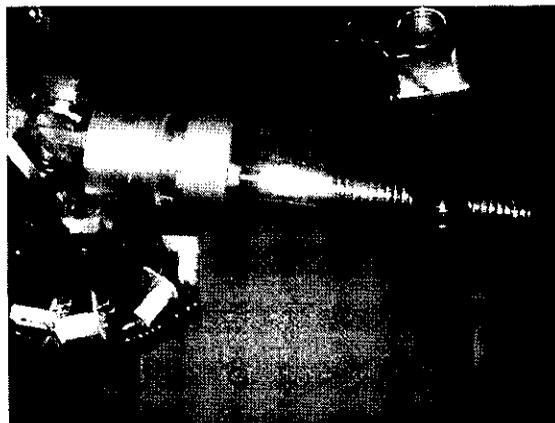


Figura 3.10 Tornillo de potencia.

Estos tornillos convierten el giro o desplazamiento angular de la flecha del motor, en un desplazamiento rectilíneo de las tuercas (juntas prismáticas), articuladas a los eslabones 2 y 3, provocando el movimiento de los mismos en el plano, de manera que dependiendo del sentido de giro del motor, suben o bajan el punto de apoyo de la pata, si se trata del motor 1, y abren o cierran la extremidad, si se trata del motor 2.

En la figura 3.11 se muestra un esquema de un tornillo de potencia con rosca cuadrada para su análisis en la transmisión de fuerzas.

- d_m = diámetro medio
- F = fuerza sobre los eslabones
- λ = ángulo de avance
- ψ = ángulo de hélice
- p = paso

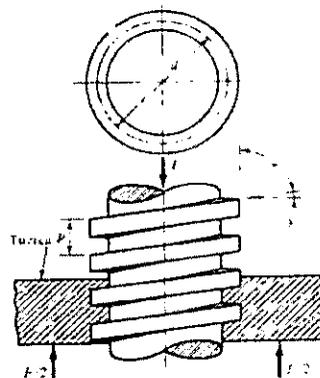


Figura 3.11 Nomenclatura de un tornillo de potencia.



Para modelar el par o momento de giro necesario para levantar o bajar una carga F , se requiere establecer un sistema de fuerzas sobre la rosca del tornillo, lo cual es más sencillo de comprender si se imagina que el filete helicoidal de la rosca del tornillo se desenrolla sobre un plano, exactamente en la longitud correspondiente a una vuelta, como se muestra en la figura 3.12.

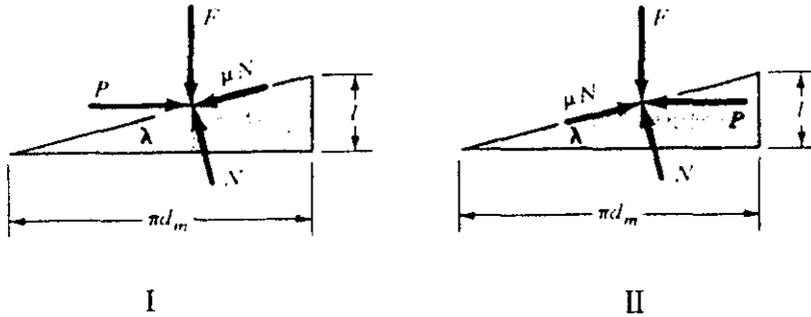


Figura 3.12 Diagramas de fuerzas
I) al subir la carga II) al bajar la carga.

De esta manera el borde externo del filete, formará la hipotenusa de un triángulo rectángulo, cuya base es la extensión de la circunferencia correspondiente al diámetro medio de la rosca, y cuya altura es el avance (l ¹). La fuerza F es la suma de todas las fuerzas axiales que actúan sobre el área normal de la rosca. Cuando se levanta una carga se tiene una fuerza P que actúa hacia la derecha, cuando se baja, P actúa hacia la izquierda.

La fuerza de fricción es igual al producto del coeficiente de fricción μ y la reacción o fuerza normal N , y actúa oponiéndose al movimiento. Estableciendo un sistema de ecuaciones, y resolviendo, se tiene que el par necesario en los motores 1 y 2, para subir o bajar la carga está dado por las siguientes expresiones:

$$T = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi\mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) \quad \text{para subirla} \quad 3.8$$

$$T = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{\pi\mu d_m - l}{\pi d_m + \mu l} \right) \quad \text{para bajarla} \quad 3.9$$

En casos específicos, cuando el avance es grande o la fricción es baja, puede suceder que la carga descienda por sí sola, haciendo que el tornillo gire solo, sin ninguna acción externa, de manera que T es negativo o igual a cero. En este sentido, cuando T es positivo, se dice que el tornillo es autoasegurante, y la condición de autoaseguramiento es:

$$\pi\mu d_m > l \quad \text{ó} \quad \mu > \tan \lambda \quad 3.10$$

¹ En este caso el paso es igual al avance ($l = p$), porque no se trata de tornillos multicuerdas



Si se elimina el rozamiento en la rosca, T_o es el momento de rotación necesario solamente para elevar la carga, es decir se sustituye a $\mu = 0$ en la ecuación (3.8) obteniendo la ecuación (3.11), y dividiendo entre el par real, se obtiene la eficacia mecánica del tornillo expresada en la ecuación (3.12).

$$T_o = \frac{Fl}{2\pi} \quad 3.11$$

$$e = \frac{T_o}{T} = \frac{Fl}{2\pi T} \quad 3.12$$

3.5 ESTABILIDAD ESTÁTICA

Para el caso de los cuadrúpedos, se mencionó anteriormente que durante una marcha de ganeo regular, se requiere que cuando menos tres patas estén sobre el suelo en un momento dado, por lo tanto es necesario conocer la posición de las patas en relación al centro de gravedad. En el capítulo 2 se mencionó el siguiente criterio de diseño. *La estabilidad es óptima para la marcha cuando el paso es el doble de la distancia axial entre el centro de gravedad y el punto de fijación de la pata*². En todo momento se considera la localización del centro de gravedad en el punto de simetría del robot. La figura 3.13 muestra la relación existente entre el centro de gravedad, el paso y el punto de rotación de la pata para la obtención de una marcha estable.

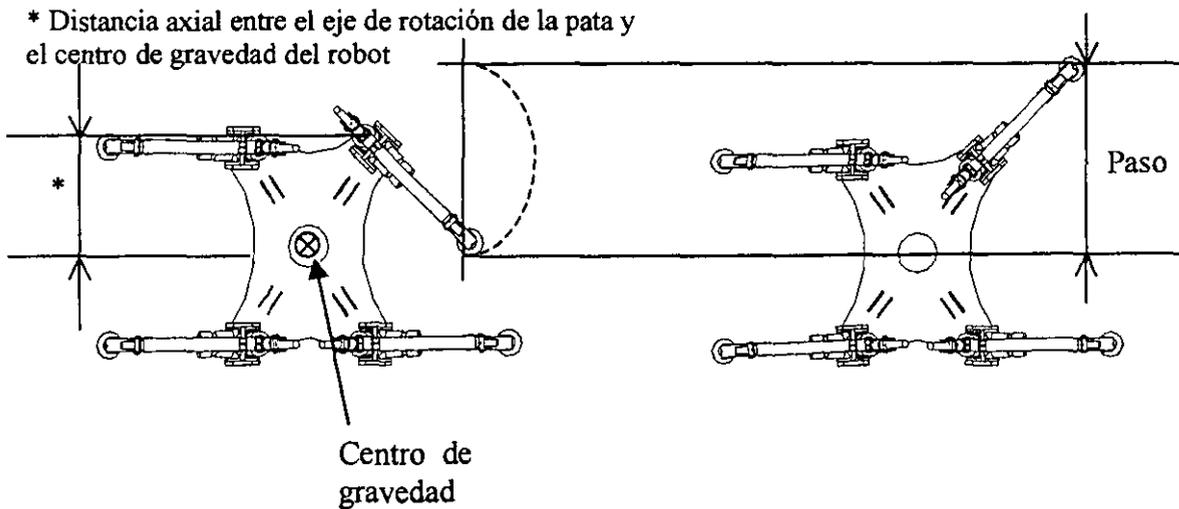


Figura 3.13 Principio de McGhee y Frank.

² McGhee y Frank, 1968



La figura 3.14 muestra las 8 fases de los patrones de pisada de la secuencia de marcha para el prototipo:

	<p>Al inicio de la fase 1, todas las patas se encuentran apoyadas sobre el piso.</p>
	<p>En la fase 2 se levanta la pata 1 y da el paso correspondiente. El centro de gravedad está siempre dentro del triángulo formado por las patas de apoyo 2, 3 y 4.</p>
	<p>En la fase 3 la pata 1 se apoya nuevamente de manera que todas están apoyadas en el piso.</p>



	<p>En la fase 4 se levanta la pata 4 y realiza su paso. El centro de gravedad está dentro del triángulo de las patas de apoyo 1, 2 y 3.</p>
	<p>En la fase 5 se vuelve apoyar la pata 4 y se tiene apoyo en las cuatro patas.</p>
	<p>Dentro de la fase 6 se levanta la pata 2. El centro de gravedad se encuentra dentro del triángulo de las patas de apoyo 1, 3 y 4.</p>

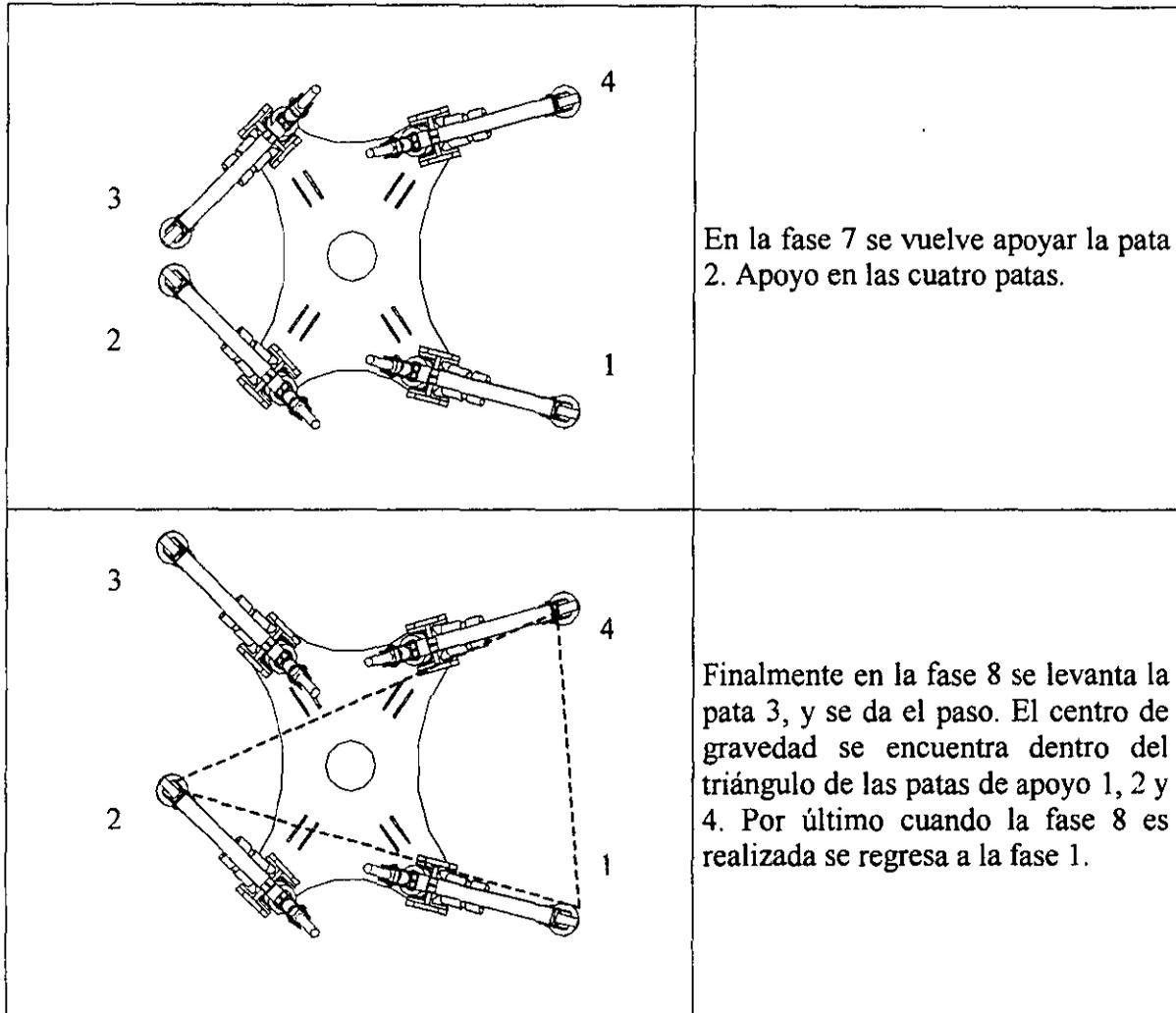


Figura 3.14

Los apoyos alternativos entre tres y cuatro patas y un análisis de la figura muestran que el centro de gravedad está siempre dentro de la base suministrada por las patas de apoyo.

La matriz que representa los patrones de pisada de la secuencia de marcha para el prototipo, se muestra a continuación:

	Pata 4	Pata 3	Pata 2	Pata 1		
Fase 1	0	0	0	0	=	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Fase 2	0	0	0	1		
Fase 3	0	0	0	0		
Fase 4	1	0	0	0		
Fase 5	0	0	0	0		
Fase 6	0	0	1	0		
Fase 7	0	0	0	0		
Fase 8	0	1	0	0		



La secuencia de marcha será retomada en el capítulo 5 cuando se estudie el control y la programación del robot, la cual está basada en eventos.

3.6 MANUFACTURA

La manufactura del robot se llevó a cabo en máquinas herramienta convencionales, con excepción del cuerpo del robot, el cual fue maquinado por medio de control numérico, debido a la complejidad de su forma. En el apéndice B se muestran los planos del conjunto y de detalle del robot, dibujados en un sistema CAD³, Mechanical Desktop 4.0, y en la siguiente tabla se muestra la lista de partes total del robot, la cual puede cotejarse con el plano de conjunto para identificar cada una.

PARTE	CANT.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ORIGEN
1	8	Eslabón 1, parte 2	Aluminio	Maquinado
2	8	Base, parte 2	Aluminio	Maquinado
3	4	Eslabón 2, parte 2	Aluminio	Maquinado
4	4	Soporte, motor 1	Aluminio	Maquinado
5	4	Eslabón 2, parte 4	Aluminio	Maquinado
6	4	Flecha	Aluminio	Maquinado
7	4	Soporte, motor 3	Aluminio	Maquinado
8	4	Cople del piñón	Aluminio	Maquinado
9	32	Balero de 5 mm	Acero	Compra
10	8	Tuerca	Hierro	Compra
11	4	Eslabón 2, parte 3	Aluminio	Compra
12	8	Tornillo	Acero	Compra
13	8	Cople del tornillo	Aluminio	Maquinado
14	12	Balero de 5 mm	Acero	Compra
15	4	Balero de 12 mm	Acero	Compra
16	4	Eje 6 X 19 mm	Acero	Compra
17	4	Eje 5 X 62 mm	Acero	Compra
18	4	Eslabón 1, parte 3	Aluminio	Maquinado
19	4	Eslabón 1, parte 1	Aluminio	Maquinado
20	4	Contra, flecha	Aluminio	Maquinado
21	4	Eje 6 X 62 mm	Acero	Compra
22	4	Soporte, motor 2	Aluminio	Maquinado
23	4	Piñón	Acero	Compra
24	4	Eslabón 2, parte 1	Aluminio	Maquinado
25	4	Base, parte 1	Aluminio	Maquinado
26	1	Cuerpo	Nylamid	Maquinado
27	4	Rueda	Acero	Compra
28	12	Motor		Compra

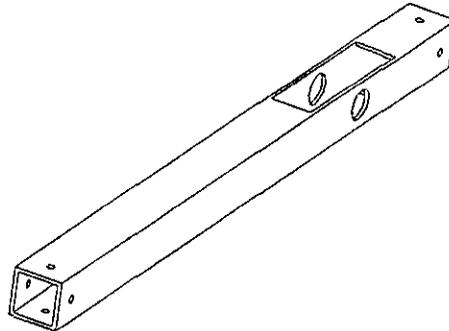
Tabla 3.1 Lista de partes.

³ CAD, Dibujo asistido por computadora (Computer Aided Drawing.)

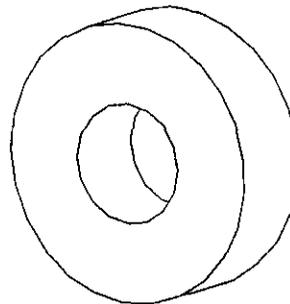


Se puede observar en los planos de conjunto y de detalle las piezas fabricadas a partir de materiales comerciales. Dentro de las características que presentan algunos elementos que conforman el robot destacan:

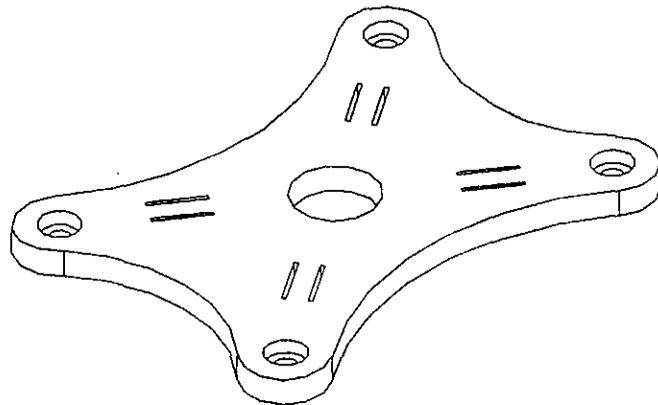
Soporte del peso del robot en sus extremidades.- las extremidades fueron fabricadas a partir de perfiles cuadrados de aluminio para obtener la mayor resistencia con el menor peso posible, además de garantizar una buena resistencia a la torsión, sin presentar deformación.



Evitar la fricción en las partes con movimiento relativo.- En todas las articulaciones se colocaron rodamientos de bolas para garantizar un giro libre, y evitar así pérdidas de potencia de los motores por fricción.



Rigidez en el cuerpo del robot.- Esta característica es necesaria para soportar los momentos generados por las rotaciones de las extremidades, para no tener flexión que afecte la marcha, el nylamid con el grosor empleado satisfizo esta especificación, a la vez que el peso es menor a materiales convencionales, debido a su baja densidad.





En el sistema CAD Mechanical, se llevó a cabo un análisis de interferencia de partes, de esta manera, durante el diseño en la computadora, se observaron los problemas que podría tener el ensamble de todas las partes del robot, visualizando los diferentes movimientos, debido a la manipulación de los grados de libertad en pantalla. Con esta herramienta no se tuvieron que corregir piezas ya fabricadas, además de conocer las dimensiones máximas y mínimas que puede alcanzar el robot al mover sus extremidades.

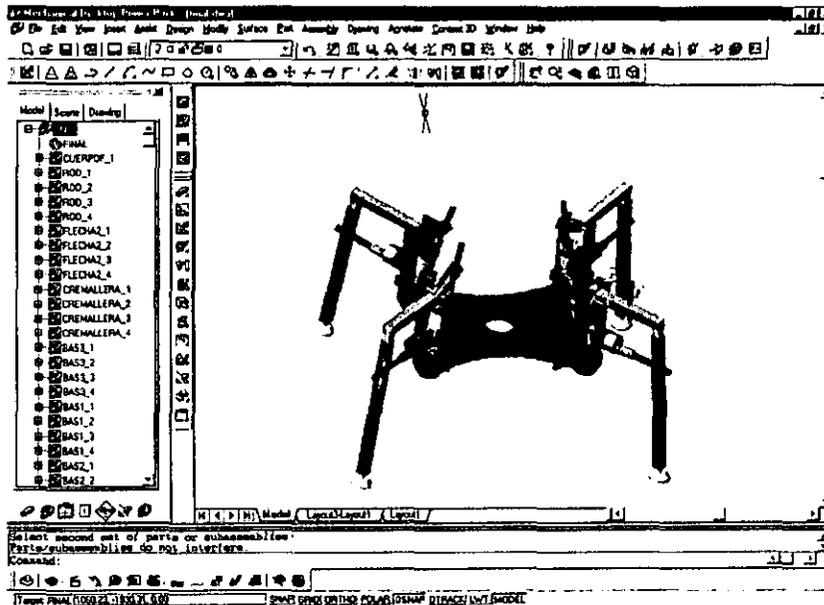


Figura 3.15 Sistema CAD.

También, mediante este sistema CAD, se pudieron determinar fácilmente algunas propiedades del robot, como son: las masas, los centros de gravedad, momentos de inercia, radios de giro, productos de inercia de cada eslabón, así como momentos y ejes principales. Con esta información es posible hacer el análisis dinámico para obtener las fuerzas que soportan los actuadores, además de los torques para mover al sistema, lo cual se realiza en el siguiente capítulo.

Assembly Mass Property Results	
Part/Subassembly: CUERPOF_1	
Mass: 1091440.7 Kg	
Volume: 1091440.7 mm ³	
Center of Gravity	
x: 266.19	
y: 133.04	
z: 1.3	
Moments of Inertia:	
Ix: 23994824748.52	
Iy: 87873195480.7	
Iz: 111799760610.95	
Radii of Gyration	
kx: 148.27	
ky: 283.74	
kz: 320.05	
Products of Inertia:	
Ixy: 38654246777.03	
Ixz: 376378849.38	
Iyz: 188431507.67	
Principal Moments:	
Ix: 4675697897.7	
Iy: 10636031512.36	
Iz: 15146286096.45	
Principal Axes:	
i: 1 0 0	
j: 0 1 0	
k: 0 0 1	
Done File...	

Figura 3.16 Resultados del análisis de masas.



Las dimensiones finales del robot quedan ilustradas en el dibujo del Apéndice A, donde el robot tiene 553 mm de largo, 462 mm de ancho, 406 mm de altura, 116 mm para superar obstáculos, y 276 mm de longitud de paso.

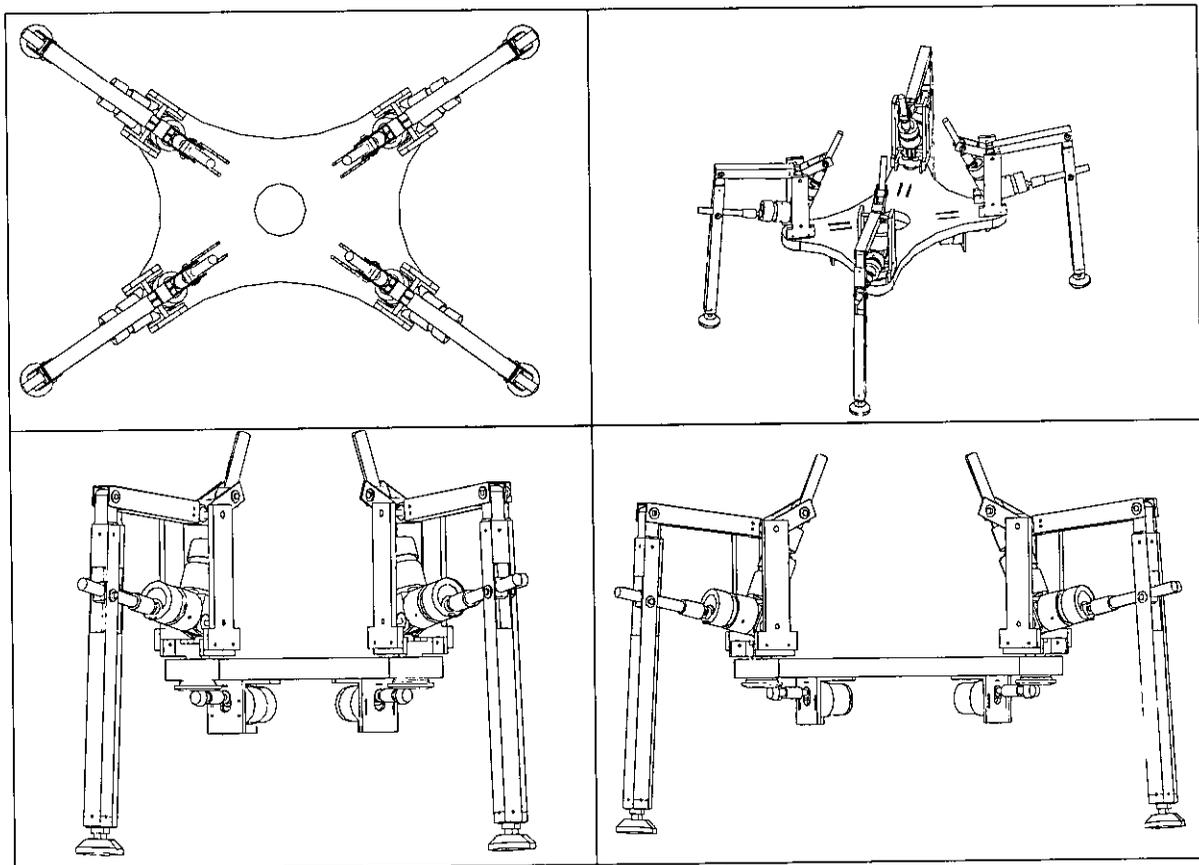
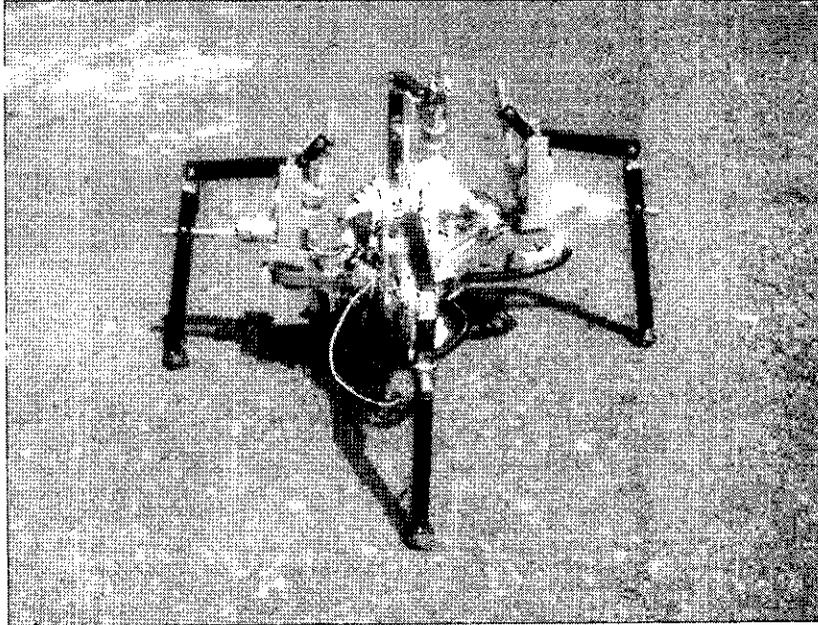


Figura 3.17 Robot caminante.



3.7 REFERENCIAS

- (1) Shigley Edward & Mischke Charles. "Diseño en Ingeniería Mecánica". Mc Graw-Hill. España. 1990.
- (2) Beer & Johnston. "Mecánica vectorial para ingenieros". McGraw-Hill. México. 1986.
- (3) Fuller, James. "Robotics: introduction, programing, & projects". McMillan. New York. 1991.
- (4) D.McCloy, D.M.J. Harris. "Robótica, una introducción". Editorial Limusa. México 1993.



Artes gráficas a su servicio

ALLENDE No. 33 CENTRO
MEXICO, D.F. C.P. 06010

TEL. 526-04-40
FAX 529-66-66

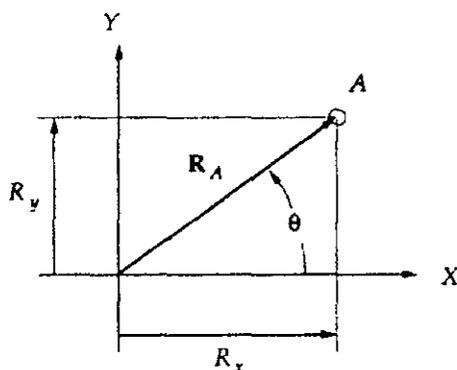


Capítulo IV

ANÁLISIS DE POSICIÓN, CINEMÁTICO, Y DINÁMICO

4.1 ANÁLISIS DE POSICIÓN

Una vez que el diseño del robot ha sido determinado y el mecanismo tentativo de las extremidades ha sido elegido, debe ser analizado enseguida. Una meta principal del análisis cinemático consiste en determinar las aceleraciones de todas las partes móviles del conjunto. Conociendo la aceleración de un cuerpo es posible conocer la fuerza que ésta implica. Se necesitan conocer las fuerzas dinámicas con el fin de calcular los esfuerzos en los componentes, así como para calcular la potencia necesaria para el movimiento de las extremidades. El diseño debe analizarse para asegurar que los mecanismos propuestos no fallarán en las condiciones reales de operación. Los esfuerzos en los materiales deben mantenerse por debajo de los niveles admisibles, mientras que la potencia demandada no debe superar en ningún instante a la nominal de los actuadores. En este sentido, para calcular las fuerzas dinámicas, debemos hallar primero las posiciones de todos los elementos del mecanismo para cada incremento en el movimiento del eslabón de entrada, y luego derivar las ecuaciones de posición con respecto al tiempo para obtener las velocidades; se derivan luego éstas con el fin de tener las expresiones de aceleración, y se involucran luego masas y momentos de inercia para llegar finalmente al análisis dinámico.



Forma polar:

$$|R_A| @ \theta$$

Forma cartesiana:

$$R_x, R_y$$

Figura 4.1 Vector de posición en un marco de referencia en el plano.



Posición.

La posición de un punto en el plano se define mediante un vector de posición, la figura 4.1 muestra un vector de posición en el plano. La elección de los ejes de referencia es arbitraria y preferentemente se escoge de modo que se adapte al observador. Un vector bidimensional tiene dos atributos, los cuales pueden expresarse en coordenadas polares o cartesianas. La forma polar proporciona la magnitud y la dirección (ángulo y sentido) del vector. La forma cartesiana aporta las componentes X y Y del mismo.

Desplazamiento.

El desplazamiento de un punto es el cambio en su posición y se puede definir como *la distancia entre las posiciones inicial y final de un punto que se ha movido dentro del marco de referencia.* En la figura 4.2 (a) se muestra un punto en dos posiciones, A y B. La línea curva señala el recorrido del punto.

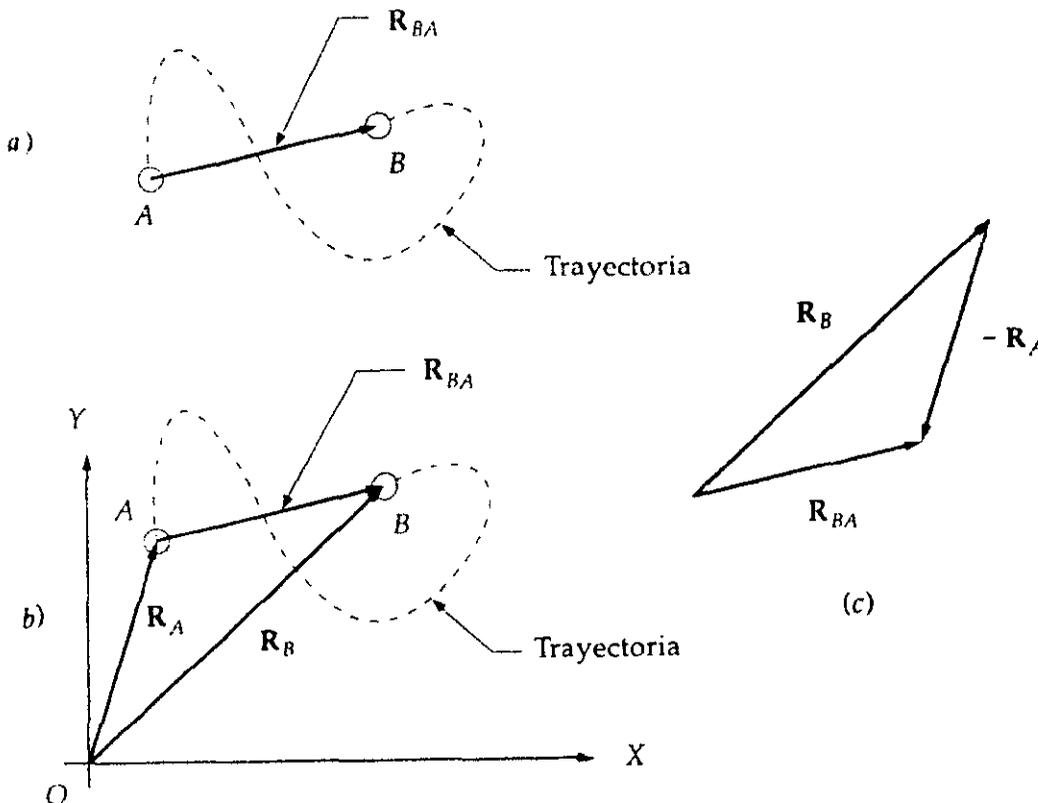


Figura 4.2 Desplazamiento de un punto.



El vector de posición R_{BA} representa el desplazamiento del punto B con respecto al punto A. En la figura 4.2 (b) se define esta situación más rigurosamente y en relación con un marco de referencia XY. El símbolo R denota un vector de posición. Así, los vectores R_A y R_B , señalan, respectivamente, las posiciones absolutas de los puntos A y B con respecto a este marco de referencia global XY. El vector R_{BA} denota la diferencia de posición, o desplazamiento, entre A y B. Lo anterior se puede expresar como la ecuación de diferencia de posición:

$$R_{BA} = R_B - R_A$$

Esta expresión puede ser escrita también como:

$$R_{BA} = R_{BO} - R_{AO}$$

donde el segundo subíndice O indica el origen del marco de referencia XY. Cuando el vector de posición está ligado al origen de tal marco, se acostumbra omitir dicho subíndice. Se sobrentiende, en su ausencia, que es el origen. En la figura 4.2 (c) se presenta una solución gráfica a la ecuación anterior.

Traslación, rotación y movimiento complejo.

En la figura 4.3 (a) se muestra un eslabón AB representado por un vector de posición R_{BA} . Un sistema de ejes ha sido establecido en el principio (o punto origen) del vector, el A, por conveniencia.

Traslación.

La definición de traslación es: *el movimiento en el que todos los puntos del cuerpo móvil tienen el mismo desplazamiento.* Como resultado, el eslabón mantiene su orientación o posición angular. Nótese que la traslación no necesita efectuarse sobre una trayectoria recta. Las líneas curvas de A a A' y de B a B' son la trayectoria de traslación curvilínea del eslabón. No hay rotación del mismo si tales trayectos son paralelos. Si la trayectoria fuese recta, entonces se tiene el caso especial de traslación rectilínea y la trayectoria y el desplazamiento serán iguales.

En la figura 4.3 (b) se presenta el eslabón AB desplazado a una nueva posición A'B' por traslación según los desplazamientos AA' o BB', que son iguales.

Rotación.

La definición de rotación es: *El movimiento en que diferentes puntos del cuerpo experimentan distintos desplazamientos, y por tanto hay una diferencia de desplazamiento entre dos puntos cualesquiera seleccionados.* La figura 4.3 (c) muestra el mismo eslabón AB movido desde su posición original en el origen del marco de referencia, por una rotación en un cierto ángulo.



Movimiento complejo.

El movimiento complejo es la suma de las componentes de traslación y de rotación. En la figura 4.3 (d) se muestra al eslabón que se mueve por medio de una traslación y rotación. El desplazamiento complejo resultante es el mismo, ya sea si aplicamos primero la rotación y después la traslación, o viceversa, ya que las operaciones son independientes. El desplazamiento complejo total se define con la siguiente expresión.

$$\text{Desplazamiento total} = \text{Componente de rotación} + \text{Componente de traslación}$$

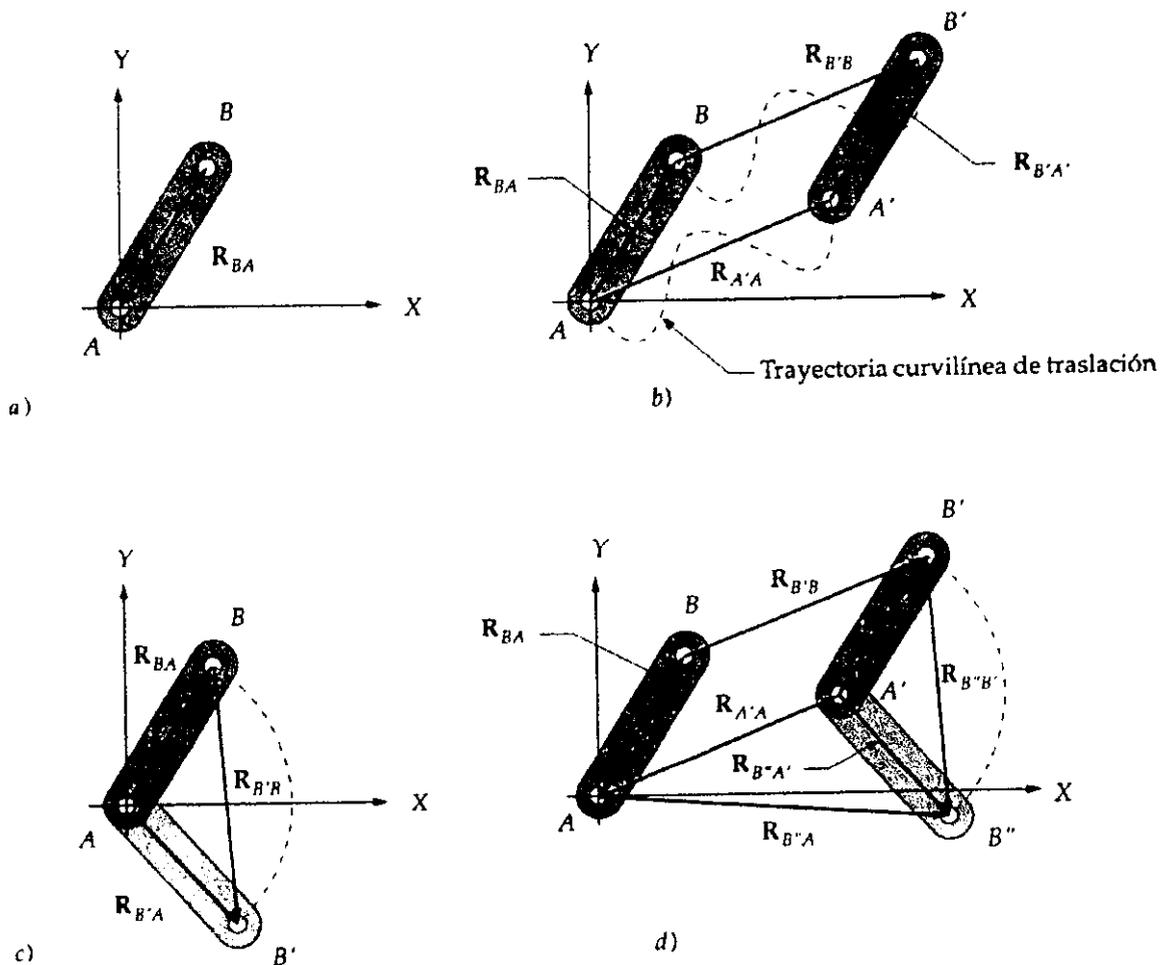


Figura 4.3 Traslación, rotación y movimiento complejo.



Con base en los siguientes teoremas se hace el análisis de la posición de la extremidad del robot.

Teorema de Euler¹.

El desplazamiento general de un cuerpo rígido con uno de sus puntos fijo es una rotación alrededor de un eje.

Teorema de Chasles².

Un desplazamiento de un cuerpo rígido es equivalente a la suma de una traslación de cualquier punto en el cuerpo y una rotación de éste alrededor de un eje que pasa por ese punto.

Para mayor comprensión de la metodología y notación utilizados a lo largo del capítulo se hace una breve descripción de la representación de números complejos para vectores en el plano.

Existen muchas formas de representar los vectores. Éstos pueden ser definidos en coordenadas polares, por su magnitud y ángulo director, en coordenadas cartesianas, mediante las componentes x y y. Los vectores se pueden representar con cualesquiera de las siguientes expresiones:

Forma polar

$$R @ \angle \theta$$

$$re^{j\theta}$$

Forma cartesiana

$$r \cos \theta \hat{i} + r \sin \theta \hat{j}$$

$$r \cos \theta + j r \sin \theta$$

En las ecuaciones anteriores se tiene la notación de números complejos; en este caso, la componente la dirección X se denomina parte real, y la componente en la dirección Y, parte imaginaria.

En la figura 4.4 (a) se muestra el plano complejo en el que se representa el eje real que corresponde a la dirección de las componentes X de los vectores en el plano. Asimismo, el eje imaginario que corresponde a la dirección de las componentes Y de los vectores. De manera que cualquier término en un número complejo que no tenga el operador j, es una componente x; y todo término de un complejo en el que figure j indica una componente y.

Véase en el vector de la figura 4.4 (b) que cada multiplicación del vector R_A por el operador j resulta en una rotación en sentido contrario de las manecillas del reloj, en un

¹ Robert L. Norton. "Diseño de Maquinaria". McGraw Hill. México. 1997.

² Robert L. Norton. "Diseño de Maquinaria". McGraw Hill. México. 1997.



ángulo de 90°. El vector $R_B = jR_A$ está dirigido a lo largo de la parte positiva del eje imaginario, o eje j . El vector $R_C = j^2 R_A$ está dirigido a lo largo de la parte negativa del eje real, porque $j^2 = -1$, y por lo tanto $R_C = -R_A$. De modo semejante, $R_D = j^3 R_A = -jR_A$, y este vector se dirige a lo largo de la parte negativa del eje j .

Una ventaja de utilizar esta notación de números complejos para representar vectores planos proviene de la identidad de Euler.

$$e^{\pm j\theta} = \cos \theta \pm j \operatorname{sen} \theta$$

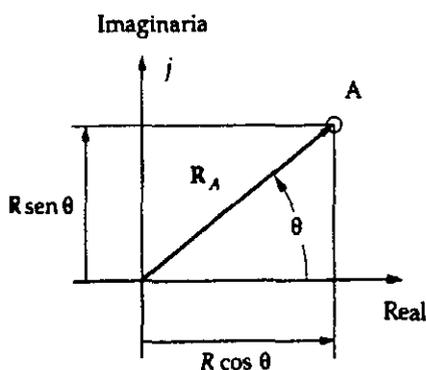
Cualquier vector referido a dos dimensiones se puede representar mediante la notación polar compacta. Y resulta ser una función fácil de diferenciar o integrar, ya que tal función conserva la misma forma que su propia derivada.

$$\frac{de^{j\theta}}{d\theta} = je^{j\theta}$$

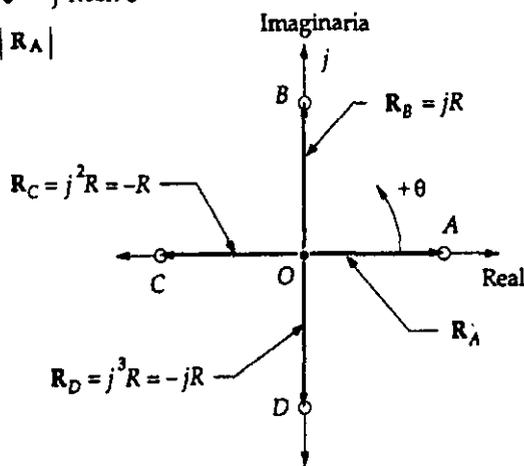
Forma polar: $R e^{j\theta}$

Forma cartesiana: $R \cos \theta + j R \operatorname{sen} \theta$

$$R = |R_A|$$



a) Representación de número complejo para un vector de posición



b) Rotaciones de vectores en el plano complejo

Figura 4.4 Representación de números complejos para vectores en el plano.

Utilizamos esta notación de números complejos para los vectores, con el fin de desarrollar y deducir las ecuaciones para la posición, la velocidad y la aceleración en un plano de los eslabones que conforman cada extremidad del cuerpo.



4.1.1 Sistema de referencia

El sistema absoluto de coordenadas se ilustra en la figura 4.5. El eje Y_1 es paralelo al eje de rotación de la extremidad, dicho eje pasa por el centro de la cremallera. El plano X_1Z_1 está fijo en el piso y es paralelo al cuerpo.

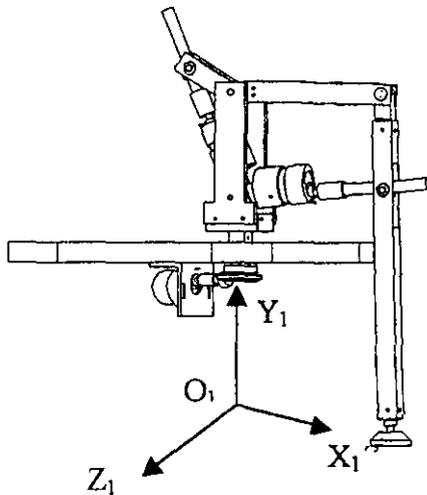


Figura 4.5 Sistema absoluto de coordenadas.

Para llevar a cabo el análisis resolveremos el mecanismo de cuatro barras sobre el plano X_1Y_1 . Para facilitar este análisis se introduce un nuevo sistema de coordenadas, el cual tiene como origen O_2 . La figura 4.6 muestra el nuevo sistema de referencia y la analogía existente entre un mecanismo de 4 barras (a) y la configuración de la extremidad (b).

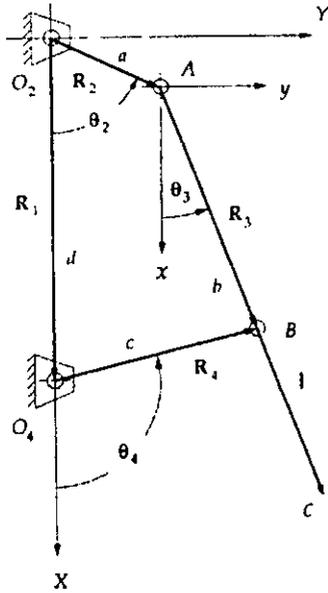
En la figura 4.6 (b) se muestra el eslabonamiento de cuatro barras que forman un lazo (o polígono cerrado) de vectores. Las longitudes de los eslabones son representadas por las letras a , b , c y d , donde la magnitud de la longitud c puede variar mediante la puesta en marcha del motor 2. La posición del punto terminal C está definida por los cuatro ángulos del mecanismo y las longitudes de los eslabones. El ángulo θ_2 y la longitud c son nuestras variables independientes que se controlan mediante los dispositivos de impulsión. En otras palabras el mecanismo de la extremidad tiene 2 grados de libertad.

4.1.2 Posición

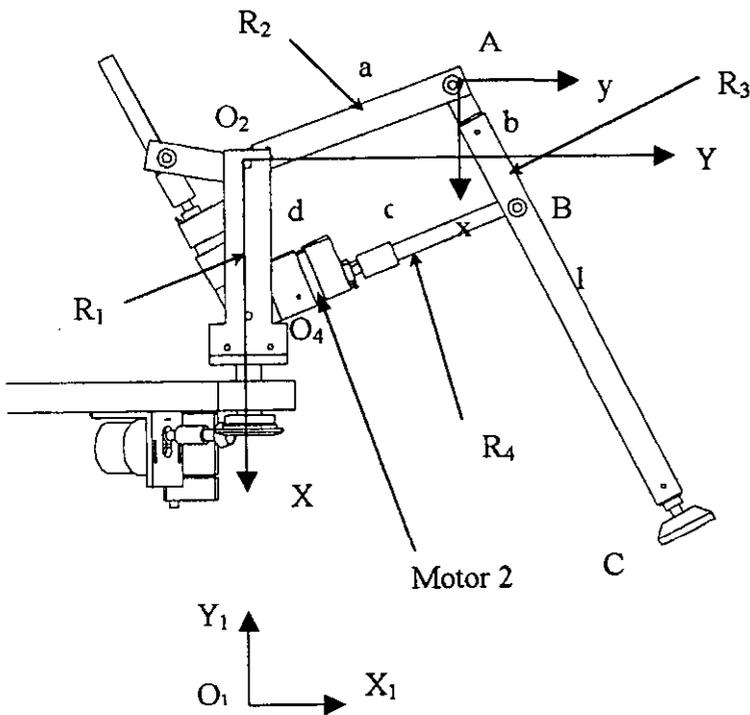
La posición del extremo de la extremidad está dada por la siguiente expresión:

$$\vec{C} = a e^{j\theta_2} + l e^{j\theta_3} \quad 4.1$$

Nota: b es magnitud de la distancia entre el punto A y B , mientras que l es la distancia entre los puntos A y C , ver figura 4.6 (b).



(a) Polígono de vectores para un eslabonamiento de cuatro barras.



(b) Polígono de vectores del mecanismo de la extremidad.

Figura 4.6 La analogía existente entre un mecanismo de 4 barras (a) y la configuración de la extremidad (b).



Para resolver la ecuación 4.1, es necesario conocer el ángulo θ_3 . Para ello se requiere estudiar la ecuación del lazo vectorial.

La ecuación de lazo vectorial que describe al mecanismo es la siguiente:

$$R_2 + R_3 - R_4 - R_1 = 0 \quad 4.2$$

Introduciendo la notación de números complejos, la ecuación queda como:

$$ae^{j\theta_2} + be^{j\theta_3} - ce^{j\theta_4} - de^{j\theta_1} = 0 \quad 4.3$$

donde a, b, c, y d son las magnitudes escalares de los vectores que representan los eslabones del mecanismo. En la ecuación anterior existen cinco variables, los cuatro ángulos y la longitud del eslabón c. Las longitudes a, b y d de los otros eslabones son constantes. El valor del ángulo θ_1 es cero y está fijo. Se necesitan las expresiones algebraicas para determinar los ángulos θ_3 y θ_4 como funciones sólo de las longitudes de eslabón constantes, de la longitud c y del ángulo de entrada θ_2 . Con dichas funciones se puede conocer la posición de cualquier punto del eslabonamiento. Las expresiones de estas funciones tienen la siguiente forma:

$$\theta_3 = f\{a, b, c, d, \theta_2\} \quad 4.4$$

$$\theta_4 = g\{a, b, c, d, \theta_2\} \quad 4.5$$

Para obtener θ_3 se emplea una relación entrada-salida. De la ecuación 4.3 despejamos θ_4 y obtenemos:

$$ae^{j\theta_2} + be^{j\theta_3} - d = ce^{j\theta_4} \quad 4.6$$

Se omitió el término $e^{j\theta_1}$, cuyo valor es igual a 1 a consecuencia de la magnitud nula del ángulo θ_1 . Multiplicando la ecuación anterior por su complejo conjugado que es:

$$ae^{-j\theta_2} + be^{-j\theta_3} - d = ce^{-j\theta_4} \quad 4.7$$

Se llega a la siguiente ecuación:

$$a^2 + abe^{j(\theta_2 - \theta_3)} - ade^{j\theta_2} + abe^{j(\theta_3 - \theta_2)} + b^2 - bde^{j\theta_3} - ade^{-j\theta_2} - bde^{-j\theta_3} + d^2 = c^2 \quad 4.8$$

Pasando a notación cartesiana, de la suma de vectores se tiene la siguiente ecuación:

$$a^2 + b^2 - c^2 + d^2 + 2ab \cos(\theta_3 - \theta_2) - 2bd \cos \theta_3 - 2ad \cos \theta_2 = 0 \quad 4.9$$



Desarrollando.

$$a^2 + b^2 - c^2 + d^2 + 2ab(\cos \theta_3 \cos \theta_2 - \text{sen} \theta_2 \text{sen} \theta_3) - 2bd \cos \theta_3 - 2ad \cos \theta_2 = 0 \quad 4.10$$

$$a^2 + b^2 - c^2 + d^2 + 2ab \cos \theta_3 \cos \theta_2 - 2ab \text{sen} \theta_2 \text{sen} \theta_3 - 2bd \cos \theta_3 - 2ad \cos \theta_2 = 0 \quad 4.11$$

Factorizando en función de los términos de θ_3 .

$$\cos \theta_3 (2ab \cos \theta_2 - 2bd) + \text{sen} \theta_3 (-2ab \text{sen} \theta_2) - 2ad \cos \theta_2 + a^2 + b^2 - c^2 + d^2 = 0 \quad 4.12$$

La ecuación 4.12 tiene la forma

$$g_1 \cos \theta_3 + g_2 \text{sen} \theta_3 + g_3 = 0$$

donde:

$$g_1 = 2ab \cos \theta_2 - 2bd$$

$$g_2 = -2ab \text{sen} \theta_2$$

$$g_3 = -2ad \cos \theta_2 + a^2 + b^2 - c^2 + d^2$$

Resolviendo mediante propiedades trigonométricas, se obtiene la función final del ángulo θ_3 .

$$\theta_3 = - \left\{ \text{angSen} \left[\left(\frac{-g_3}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} \right) \right] \right\} - \text{angTan} \left[\left(\frac{g_1}{g_2} \right) \right] \quad 4.13$$

Signo de g_2

El método para hallar la solución del ángulo θ_4 es similar a la efectuada para θ_3 . La expresión de θ_4 final se muestra a continuación.

$$\theta_4 = - \left\{ \text{angSen} \left[\left(\frac{-h_3}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2}} \right) \right] \right\} - \text{angTan} \left[\left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right] \quad 4.14$$

Signo de h_2

donde:

$$h_1 = 2ac \cos \theta_2 - 2cd$$

$$h_2 = -2ac \text{sen} \theta_2$$

$$h_3 = -2ad \cos \theta_2 + a^2 - b^2 + c^2 + d^2$$



Una vez que se obtienen los ángulos de todos los eslabones, resulta sencillo definir y calcular la posición de cualquier punto de un eslabón para valores determinados del ángulo de entrada θ_2 y de la longitud del eslabón c , en el sistema de referencia XY . Para obtener las coordenadas en el sistema absoluto $X_1Y_1Z_1$ se utiliza la matriz de transformación M . Esta matriz multiplica al vector de posición de cualquier punto en el sistema de referencia XY . Mediante esta operación obtenemos las coordenadas (x_1', y_1') de cualquier vector de posición en el sistema absoluto de referencia.

$$\begin{pmatrix} x_1' \\ y_1' \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-90^\circ) & -\text{sen}(90^\circ) & 0 & 0 \\ \text{sen}(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & 0 & 0.35 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Vector de posición en el sistema de referencia $X_1Y_1Z_1$

Matriz de transformación M

Vector de posición en el sistema de referencia XYZ

La coordenada z_1 del sistema se obtiene con base en el ángulo ϕ , el cual es la medida del desplazamiento de la extremidad por acción del motor 3. En la figura 4.7 se pueden apreciar las coordenadas de cualquier vector de posición en el sistema de referencia absoluto.

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1' \text{sen}\phi \\ x_1 &= x_1' \cos\phi \\ y_1 &= y_1' \end{aligned} \tag{4.15}$$

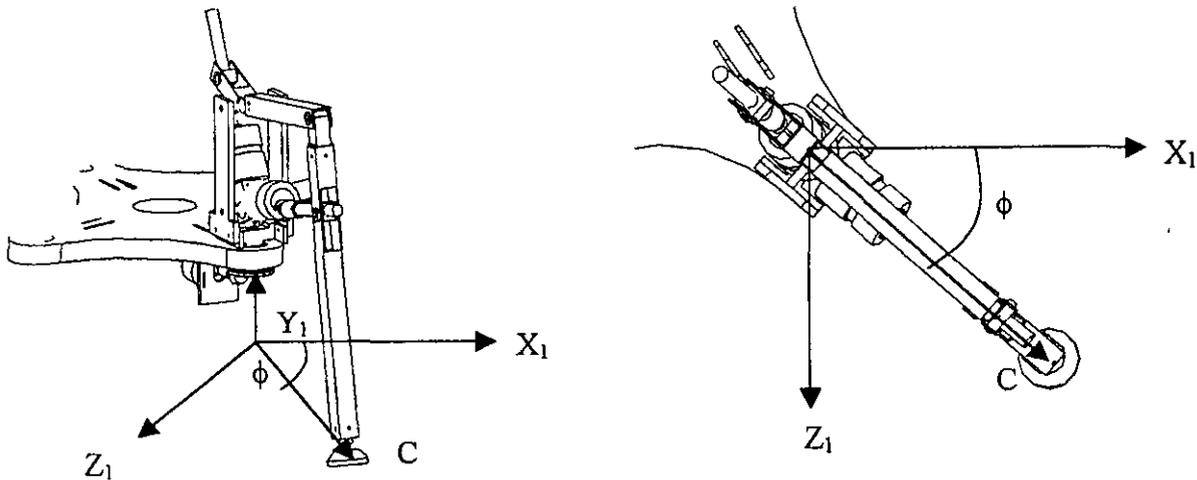


Figura 4.7



4.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO

4.2.1 Análisis de velocidad

Efectuado el análisis de posición, el siguiente paso es determinar las velocidades de todos los eslabones y puntos de interés. En el apéndice C se encuentra en primer lugar, el programa para determinar las fuerzas en el plano XY, en él queda implícito tanto el análisis de la posición, velocidad, aceleración y fuerzas en dicho plano. Por otro lado, el análisis completo de las fuerzas en la componente z aparece en el segundo programa de ese apéndice. La finalidad de este análisis sirve para seleccionar el par necesario de los actuadores eléctricos para el buen desempeño del robot. El primer programa brinda el par para los motores 1 y 2 respectivamente, mientras que el segundo programa da por resultado el par en el motor 3. En la continuación de este capítulo, primero se realizará el análisis completo del plano XY, para después realizar el análisis de la componente z.

La figura 4.8 ilustra el mecanismo de cuatro barras en donde se aprecian los vectores de velocidad.

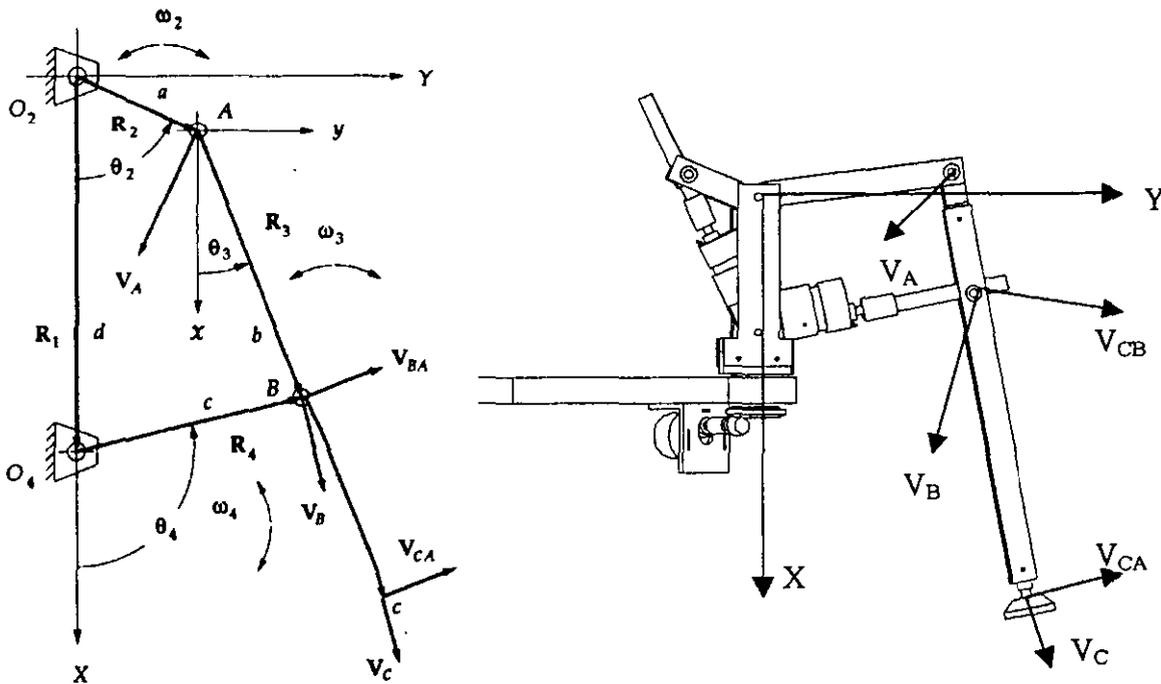


Figura 4.8 Vectores de velocidad en el eslabonamiento de cuatro barras.

La velocidad se define como la tasa de variación de la posición, con respecto al tiempo. Las ecuaciones de posición para el eslabonamiento de cuatro barras se dedujeron en la sección anterior. Para obtener la expresión para la velocidad, se deriva la ecuación 4.3 con respecto al tiempo. Ahora se necesita determinar las funciones de ω_3 y ω_4 , ya que la



velocidad de entrada ω_2 es conocida. Se adiciona el grado de libertad proporcionado por el motor 2, a consecuencia de esto la magnitud del eslabón c es variante en el tiempo.

La ecuación 4.3 derivada queda de la siguiente forma:

$$ja\omega_2 e^{j\theta_2} + jb\omega_3 e^{j\theta_3} - jc\omega_4 e^{j\theta_4} - c'e^{j\theta_4} = 0 \quad 4.16$$

donde c' es la tasa de variación de la longitud c respecto al tiempo. El superíndice ($'$) indica derivada.

Introduciendo la identidad de Euler a la ecuación anterior se tiene:

$$ja\omega_2(\cos\theta_2 + j\text{sen}\theta_2) + jb\omega_3(\cos\theta_3 + j\text{sen}\theta_3) - jc\omega_4(\cos\theta_4 + j\text{sen}\theta_4) - c'(\cos\theta_4 + j\text{sen}\theta_4) = 0 \quad 4.17$$

Desarrollando.

$$a\omega_2(j\cos\theta_2 + j^2\text{sen}\theta_2) + b\omega_3(j\cos\theta_3 + j^2\text{sen}\theta_3) - c\omega_4(j\cos\theta_4 + j^2\text{sen}\theta_4) - c'(\cos\theta_4 + j\text{sen}\theta_4) = 0 \quad 4.18$$

$$a\omega_2(j\cos\theta_2 - \text{sen}\theta_2) + b\omega_3(j\cos\theta_3 - \text{sen}\theta_3) - c\omega_4(j\cos\theta_4 - \text{sen}\theta_4) - c'(\cos\theta_4 - \text{sen}\theta_4) = 0 \quad 4.19$$

Se separa la ecuación vectorial anterior en sus dos componentes .

Parte real (componente en x):

$$-a\omega_2\text{sen}\theta_2 - b\omega_3\text{sen}\theta_3 + c\omega_4\text{sen}\theta_4 + c'\text{sen}\theta_4 = 0 \quad 4.20$$

Parte imaginaria (componente en y):

$$a\omega_2\cos\theta_2 + b\omega_3\cos\theta_3 - c\omega_4\cos\theta_4 - c'\cos\theta_4 = 0 \quad 4.21$$

Resolviendo el sistema por sustitución directa se obtiene:

$$\omega_3 = \frac{a\omega_2\text{sen}(\theta_4 - \theta_2)}{b\text{sen}(\theta_3 - \theta_4)} + \frac{c'}{b\text{sen}(\theta_3 - \theta_4)} \quad 4.22$$

$$\omega_4 = \frac{a\omega_2\text{sen}(\theta_2 - \theta_3)}{c\text{sen}(\theta_4 - \theta_3)} + \frac{c'}{c\tan(\theta_4 - \theta_3)} \quad 4.23$$



Al determinar ω_3 y ω_4 , es posible evaluar las velocidades relativas al aplicar la identidad de Euler, por ejemplo las velocidades de los puntos A, B, y C están definidas de la siguiente manera:

$$V_A = ja\omega_2(\cos\theta_2 + j\text{sen}\theta_2) = a\omega_2(-\text{sen}\theta_2 + j\cos\theta_2) \quad 4.24$$

$$V_C = jl\omega_3(\cos\theta_3 + j\text{sen}\theta_3) = l\omega_3(-\text{sen}\theta_3 + j\cos\theta_3) \quad 4.25$$

$$V_B = jc\omega_4(\cos\theta_4 + j\text{sen}\theta_4) - c'e^{j\theta_4} \quad 4.26$$

4.2.2 Análisis de aceleración

Es necesario conocer las aceleraciones para calcular las fuerzas dinámicas a partir de $F=ma$. La aceleración se define como la tasa de variación de la velocidad respecto al tiempo. El análisis de la aceleración en el plano X_1Y_1 se realiza a continuación. Para obtener la expresión para la aceleración, se deriva la ecuación 4.17 con respecto al tiempo. Ahora se necesita determinar las funciones de α_3 y α_4 , en función de α_2 y de las demás variables. Los vectores de aceleración en el mecanismo estudiado se aprecian en la figura 4.9. La estrategia de resolución es la misma que se aplicó en el análisis de la velocidad. Al derivar la ecuación 4.17 se obtiene cada término de la aceleración.

$$j^2a\omega_2^2e^{j\theta_2} + ja\alpha_2e^{j\theta_2} + j^2b\omega_3^2e^{j\theta_3} + jb\alpha_3e^{j\theta_3} - (2jc'\omega_4e^{j\theta_4} + c''e^{j\theta_4}) - (j^2c\omega_4^2e^{j\theta_4} + jc\alpha_4e^{j\theta_4}) = 0 \quad 4.27$$

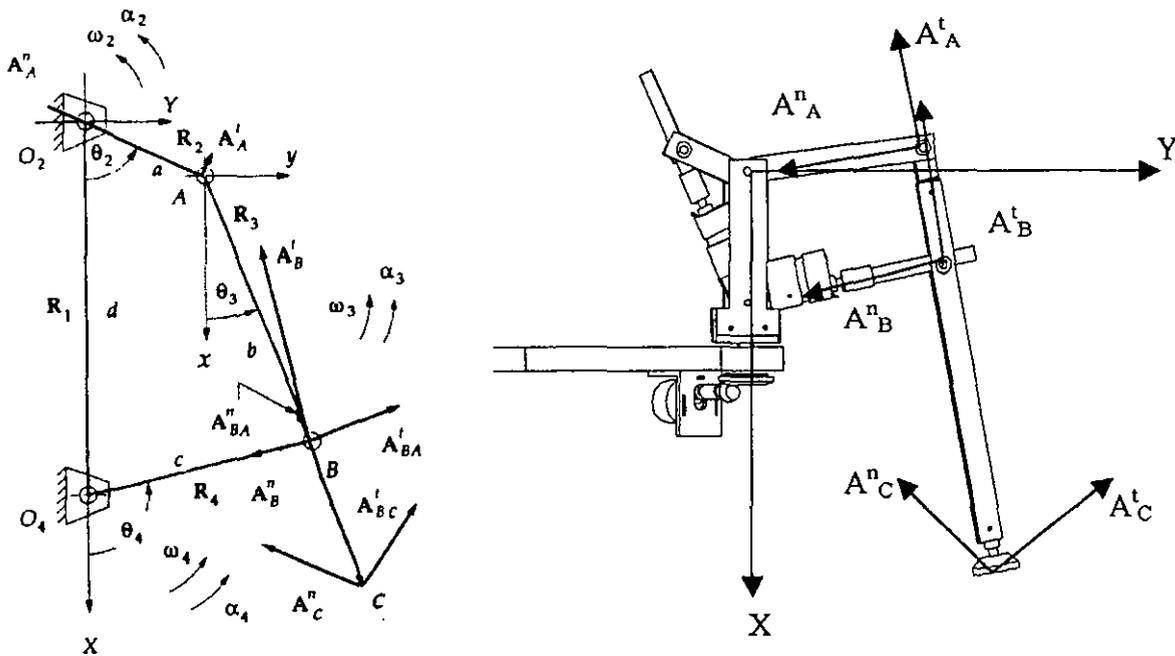


Figura 4.9 Vectores de aceleraciones en el eslabonamiento de cuatro barras



Simplificando la ecuación 4.27 queda.

$$-a\omega_2^2 e^{j\theta_2} + ja\alpha_2 e^{j\theta_2} - b\omega_3^2 e^{j\theta_3} + jb\alpha_3 e^{j\theta_3} - c'' e^{j\theta_4} + c\omega_4^2 e^{j\theta_4} - 2jc'\omega_4 e^{j\theta_4} - jc\alpha_4 e^{j\theta_4} = 0 \quad 4.28$$

Introduciendo la identidad de Euler a la ecuación anterior obtenemos.

$$-a\omega_2^2 (\cos \theta_2 + j\text{sen} \theta_2) + ja\alpha_2 (\cos \theta_2 + j\text{sen} \theta_2) - b\omega_3^2 (\cos \theta_3 + j\text{sen} \theta_3) + jb\alpha_3 (\cos \theta_3 + j\text{sen} \theta_3) - c'' (\cos \theta_4 + j\text{sen} \theta_4) + c\omega_4^2 (\cos \theta_4 + j\text{sen} \theta_4) - 2jc'\omega_4 (\cos \theta_4 + j\text{sen} \theta_4) - jc\alpha_4 (\cos \theta_4 + j\text{sen} \theta_4) = 0 \quad 4.29$$

Al simplificar los términos.

$$-a\omega_2^2 (\cos \theta_2 + j\text{sen} \theta_2) + a\alpha_2 (j \cos \theta_2 - \text{sen} \theta_2) - b\omega_3^2 (\cos \theta_3 + j\text{sen} \theta_3) + b\alpha_3 (j \cos \theta_3 - \text{sen} \theta_3) - c'' (\cos \theta_4 + j\text{sen} \theta_4) + c\omega_4^2 (\cos \theta_4 + j\text{sen} \theta_4) - 2c'\omega_4 (j \cos \theta_4 - \text{sen} \theta_4) - c\alpha_4 (j \cos \theta_4 - \text{sen} \theta_4) = 0 \quad 4.30$$

Se separa la ecuación vectorial anterior en sus términos reales e imaginarios.

Parte real (componente en x):

$$-a\omega_2^2 (\cos \theta_2) - a\alpha_2 (\text{sen} \theta_2) - b\omega_3^2 (\cos \theta_3) - b\alpha_3 (\text{sen} \theta_3) - c'' (\cos \theta_4) + c\omega_4^2 (\cos \theta_4) + 2c'\omega_4 (\text{sen} \theta_4) + c\alpha_4 (\text{sen} \theta_4) = 0 \quad 4.31$$

Parte imaginaria (componente en y):

$$-a\omega_2^2 (\text{sen} \theta_2) + a\alpha_2 (\cos \theta_2) - b\omega_3^2 (\text{sen} \theta_3) + b\alpha_3 (\cos \theta_3) - c'' (\text{sen} \theta_4) + c\omega_4^2 (\text{sen} \theta_4) - 2c'\omega_4 (\cos \theta_4) - c\alpha_4 (\cos \theta_4) = 0 \quad 4.32$$

Introduciendo los términos A y B en las dos ecuaciones anteriores, se tiene:

$$A - b\alpha_3 (\text{sen} \theta_3) + c\alpha_4 (\text{sen} \theta_4) = 0 \quad 4.33$$

$$B + b\alpha_3 (\cos \theta_3) - c\alpha_4 (\cos \theta_4) = 0 \quad 4.34$$

donde:

$$A = -a\omega_2^2 (\cos \theta_2) - a\alpha_2 (\text{sen} \theta_2) - b\omega_3^2 (\cos \theta_3) - c'' (\cos \theta_4) + c\omega_4^2 (\cos \theta_4) + 2c'\omega_4 (\text{sen} \theta_4)$$

$$B = -a\omega_2^2 (\text{sen} \theta_2) + a\alpha_2 (\cos \theta_2) - b\omega_3^2 (\text{sen} \theta_3) - c'' (\text{sen} \theta_4) + c\omega_4^2 (\text{sen} \theta_4) - 2c'\omega_4 (\cos \theta_4)$$



Resolviendo simultáneamente las ecuaciones, finalmente se obtiene las expresiones de las velocidades angulares:

$$\alpha_3 = \left(\begin{array}{c} A+B \\ b \operatorname{sen}(\theta_3 - \theta_4) \end{array} \right) \quad 4.35$$

$$\alpha_4 = \left(\begin{array}{c} A+B \\ c \operatorname{sen}(\theta_3 - \theta_4) \end{array} \right) \quad 4.36$$

Una vez obtenidos α_3 y α_4 pueden obtenerse las aceleraciones lineales aplicando la identidad de Euler, es decir:

$$A_A = a\alpha_2(-\operatorname{sen}\theta_2 + j \cos \theta_2) - a\omega_2^2(\cos \theta_2 + j \operatorname{sen}\theta_2) \quad 4.37$$

$$A_C = l\alpha_3(-\operatorname{sen}\theta_3 + j \cos \theta_3) - l\omega_3^2(\cos \theta_3 + j \operatorname{sen}\theta_3) \quad 4.38$$

4.3 ANÁLISIS DE FUERZAS

El análisis de fuerzas se realiza por medio de la ley de Newton. Este principio queda resumido en las ecuaciones siguientes:

$$\sum F = ma \quad \sum T = I_G \alpha \quad 4.39$$

En la figura 4.10 se muestra el eslabonamiento de la extremidad, donde se incluye las ubicaciones de los centros de gravedad de los eslabones, las aceleraciones lineales de éstos, las fuerzas que actúan en la extremidad y el sistema de referencia XY.

En la figura 4.11 se muestra los diagramas de cuerpo libre para todos los eslabones con todas las fuerzas que actúan en el plano. La fuerza F_p se aplica al extremo del eslabón en el punto C, la componente F_{px} es la fuerza normal del piso sobre la extremidad, y la componente F_{py} representa la fuerza de fricción de la extremidad contra el piso.

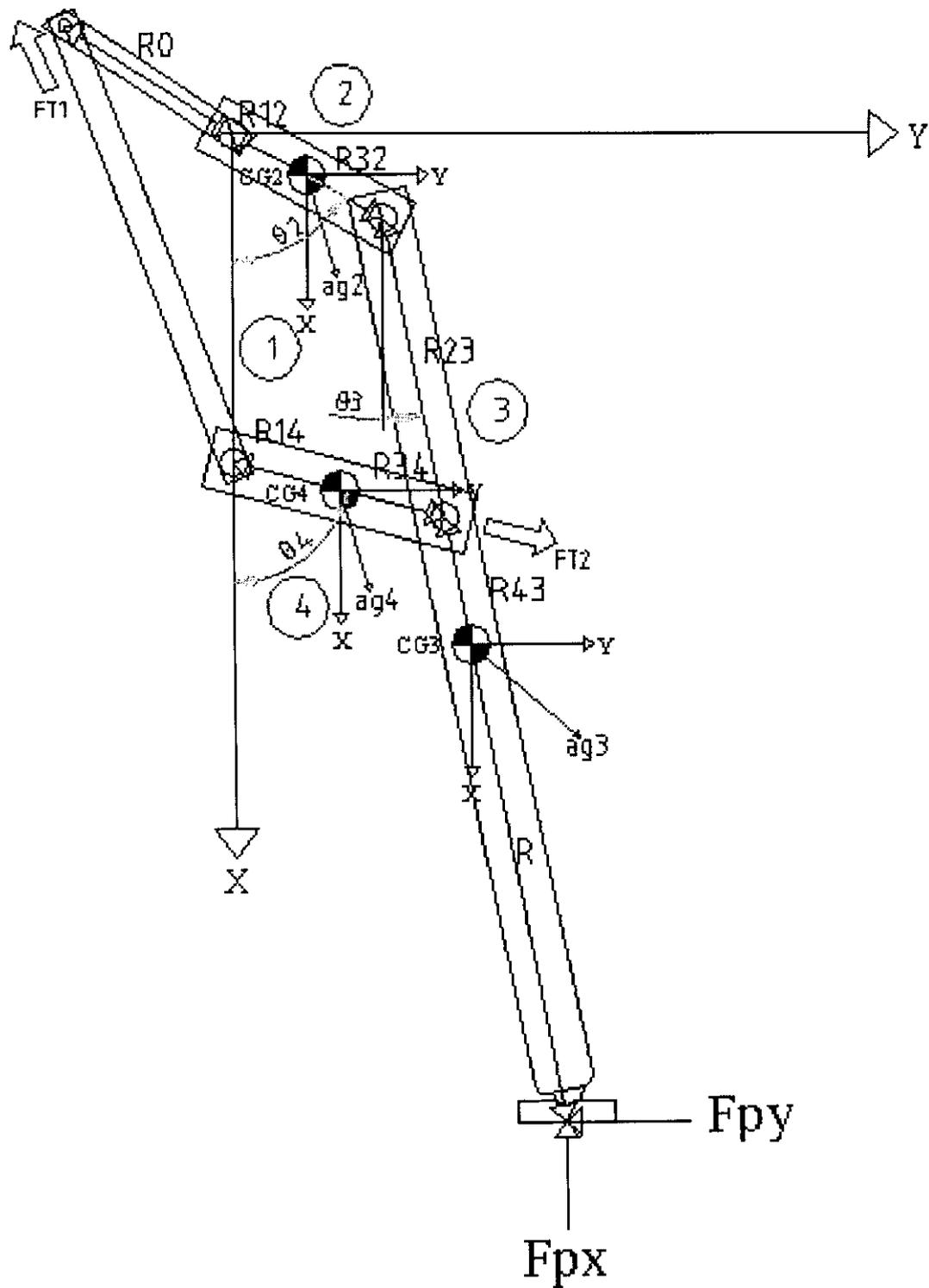


Figura 4.10 Análisis de fuerzas dinámicas en la extremidad del robot.

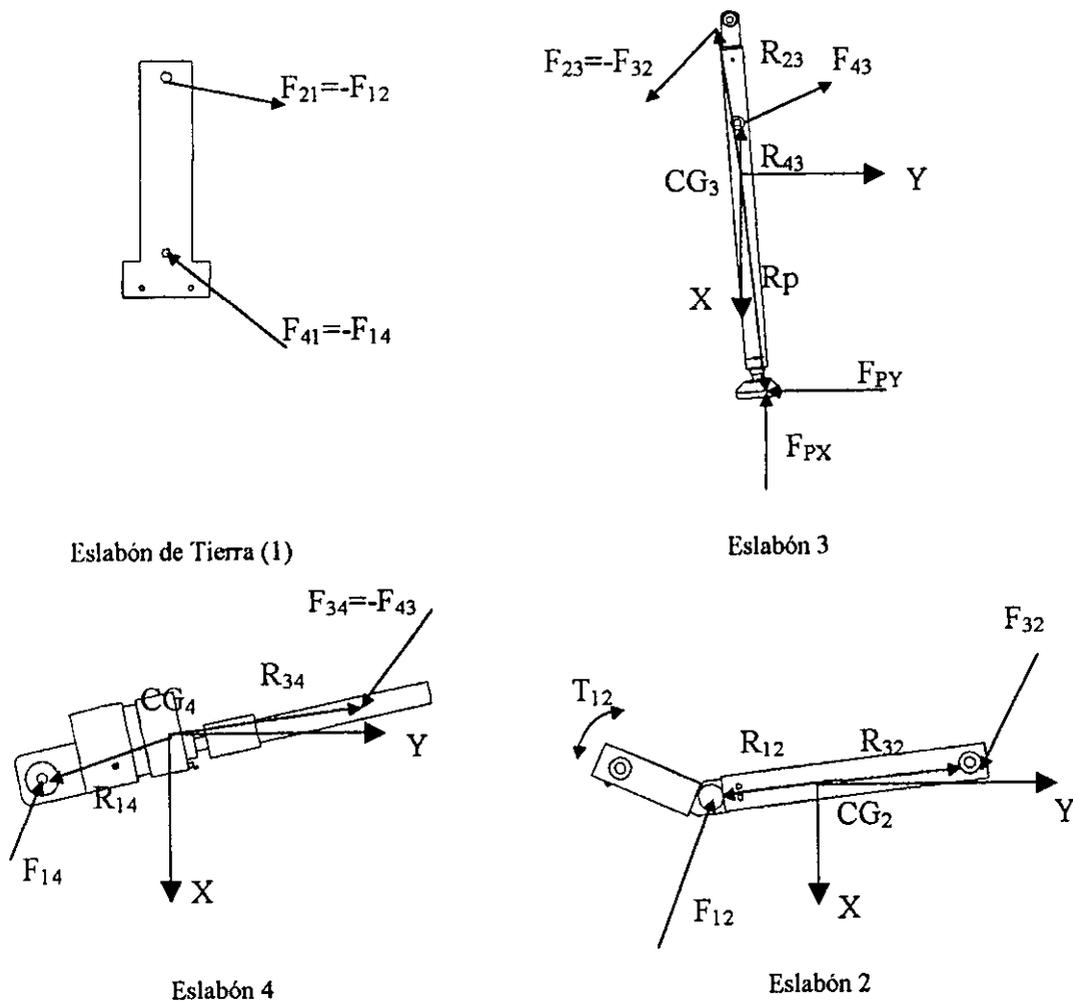


Figura 4.11 Diagramas de cuerpo libre.

La ecuación 4.39 se aplica a cada eslabón móvil. Para el caso del eslabón 2 se tiene:

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 a_{G_{2x}} \quad 4.40$$

$$F_{12y} + F_{32y} = m_2 a_{G_{2y}} \quad 4.41$$

$$T_{12} + (R_{12x} F_{12y} - R_{12y} F_{12x}) + (R_{32x} F_{32y} - R_{32y} F_{32x}) = I_{G_2} \alpha_2 \quad 4.42$$

Para el caso del eslabón 3 queda:

$$F_{43x} - F_{32x} + F_{Px} = m_3 a_{G_{3x}} \quad 4.43$$

$$F_{43y} - F_{32y} + F_{Py} = m_3 a_{G_{3y}} \quad 4.44$$

$$(R_{43x} F_{43y} - R_{43y} F_{43x}) - (R_{23x} F_{32y} - R_{23y} F_{32x}) + (R_{Px} F_{Py} - R_{Py} F_{Px}) = I_{G_3} \alpha_3 \quad 4.45$$



Para el caso del eslabón 4 se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$F_{14x} - F_{43x} = m_4 a_{G_4x} \quad 4.46$$

$$F_{14y} - F_{43y} = m_4 a_{G_4y} \quad 4.47$$

$$(R_{14x}F_{14y} - R_{14y}F_{14x}) - (R_{34x}F_{43y} - R_{34y}F_{43x}) = I_{G_4} \alpha_4 \quad 4.48$$

Todos los valores de longitudes de eslabón están fijas a excepción de la magnitud del eslabón 4, las demás se pueden apreciar en el apéndice A. Los valores de ángulos, las velocidades y aceleraciones angulares y aceleraciones lineales se determinan a través de los análisis de posición y cinemático.

La ubicaciones de los centros de gravedad de los eslabones, la masa de cada eslabón y su momento de inercia respecto a su centro de gravedad (CG), son obtenidos mediante las herramientas del sistema CAD utilizado. En el apéndice C, dentro del programa se puede ver el valor numérico de estas variables.

El par T_{12} que se aplica en el eslabón 2 sirve para caracterizar al motor 1, ya que éste se encuentra conectado a la manivela impulsora. Existen nueve incógnitas en las ecuaciones que modelan las fuerzas en cada eslabón: $F_{12x}, F_{12y}, F_{32x}, F_{32y}, F_{43x}, F_{43y}, F_{14x}, F_{14y}$ y T_{12} . La fuerza F_{34} caracteriza al motor 2, mediante las fórmulas 3.8 y 3.9 del capítulo anterior.

Este sistema de ecuaciones puede resolverse mediante la multiplicación de matrices.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{12y} & R_{12x} & -R_{32y} & R_{32x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{23y} & -R_{23x} & -R_{43y} & R_{43x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{34y} & -R_{34x} & -R_{14y} & R_{14x} & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ F_{32x} \\ F_{32y} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{14x} \\ F_{14y} \\ T_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_2 a_{g2x} \\ m_2 a_{g2y} \\ I_{g2} \alpha_2 \\ m_3 a_{g3x} - F_{px} \\ m_3 a_{g3y} - F_{py} \\ I_{g3} \alpha_3 - R_{px} F_{py} + R_{py} F_{px} \\ m_4 a_{g4x} \\ m_4 a_{g4y} \\ I_{g4} \alpha_4 \end{pmatrix}$$

Al obtener las componentes de las diversas fuerzas, se pueden establecer parámetros de diseño para las piezas, sin embargo nuestro interés se enfoca en las componentes de la fuerza F_{34} que caracterizan al motor 2 y el par T_{12} que puede modelar la magnitud de la fuerza entregada por el motor 1.



Para el caso del motor 1 se realiza el siguiente análisis.

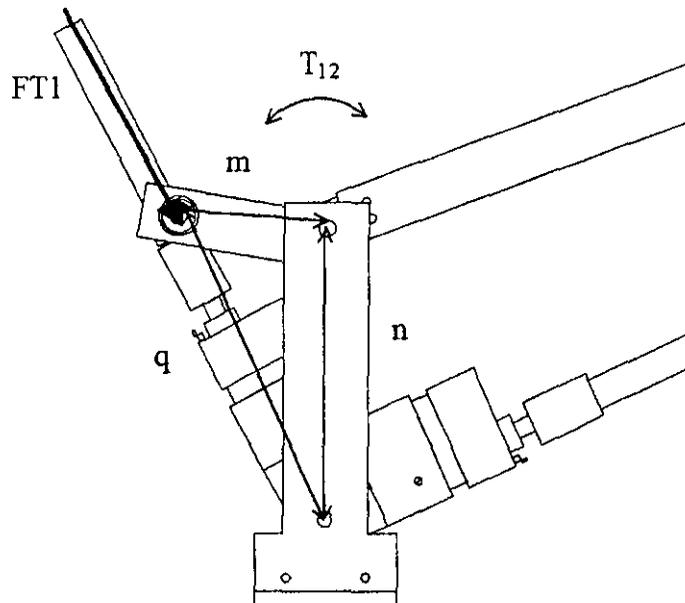


Figura 4.12 Análisis del par motor 1.

La componente de la fuerza equivalente del par T_{12} que se ejerce sobre el tornillo, se obtiene mediante relaciones trigonométricas y queda caracterizada por la siguiente ecuación. La figura 4.12 muestra las variables que intervienen en ella.

$$FT1 = \left(\frac{2 \times q \times T_2}{m^2 + q^2 - n^2} \right) \quad 4.49$$

donde:

m es la distancia que existe entre el centro de rotación del eslabón y el centro de rotación de la tuerca del tornillo de potencia, cuya magnitud es de 0.05 m;

n es la distancia existente entre los ejes de rotación de los eslabones de la extremidad y está referido a la cara de la base, su magnitud es de 0.1 m;

q es el desplazamiento del tornillo de potencia, cuya magnitud se mide desde el eje donde se encuentran los soportes de los motores hasta el eje de rotación de la tuerca. Aquí es donde se aplica la componente de la fuerza $FT1$.

Finalmente para obtener el par en el motor 1 se utilizan la fórmulas mencionadas en el capítulo 3.

Para subir la extremidad.

$$T_1 = \frac{(FT1)d_m}{2} \left(\frac{l + \pi\mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) \quad 4.50$$



Para bajar la extremidad.
$$T_1 = \frac{(FTl)d_m}{2} \left(\frac{\pi\mu d_m - l}{\pi d_m + \mu l} \right) \quad 4.51$$

Para obtener la magnitud del motor 2, se toman la matriz las componentes de la fuerza F_{34} y se utilizan nuevamente las fórmulas del capítulo tres:

Para cerrar la extremidad.
$$T_2 = \frac{(F_{34})d_m}{2} \left(\frac{l + \pi\mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) \quad 4.52$$

Para abrir la extremidad.
$$T_2 = \frac{(F_{34})d_m}{2} \left(\frac{\pi\mu d_m - l}{\pi d_m + \mu l} \right) \quad 4.53$$

donde:

$$F_{34} = \sqrt{(F_{34x})^2 + (F_{34y})^2} \quad 4.55$$

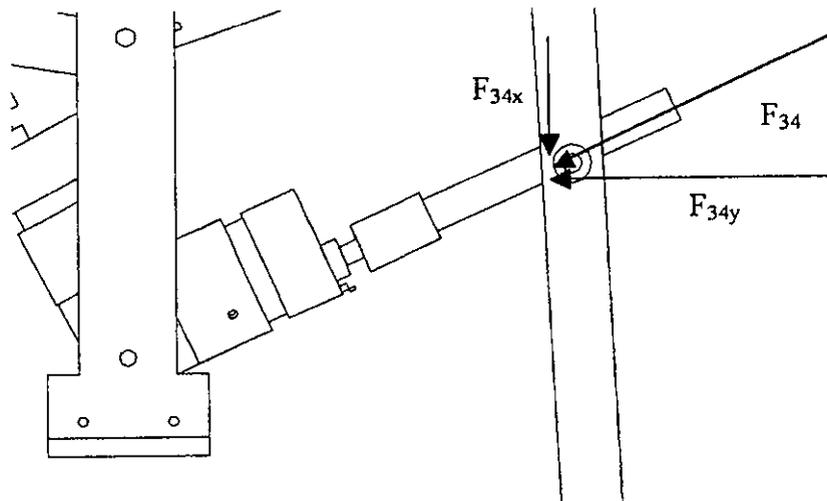


Figura 4.13 Análisis del par motor 2.

Mediante el uso del software Mathematica, se realiza el programa del análisis completo del eslabonamiento en un plano. Las gráficas de resultados del análisis de fuerzas aparecen al final de este capítulo.



4.4 PERFIL DE TRAYECTORIA

Para generar un mejor análisis de fuerzas se desarrollaron algoritmos generadores de trayectoria de los actuadores que impulsan el movimiento del robot. En este trabajo se presentan perfiles de trayectoria quinticos con periodo estacionario.

Tanto el tornillo de potencia 1 que levanta y baja la extremidad, como el tornillo 2 que realiza la apertura o cierre de la misma son los sistemas impulsores del eslabonamiento. Su capacidad de moverse de una posición inicial a una final debe estar caracterizada por las leyes de movimiento. Utilizando los perfiles de trayectoria mencionados se puede generar las funciones de la posición, velocidad y aceleración con respecto al tiempo de dichos tornillos, estas funciones se relacionan directamente con el ángulo de entrada θ_2 y con la longitud del eslabón c del eslabonamiento estudiado hasta el momento. Obteniendo de este modo funciones de θ_2 y la longitud c con relación al tiempo, se generó un programa iterativo el cual brinda los resultados de la magnitud de los pares y fuerzas. Este programa puede verse en el apéndice C.

En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran los perfiles quinticos con periodo estacionario para la posición, velocidad y aceleración, de las tuercas que mueven a los eslabones.

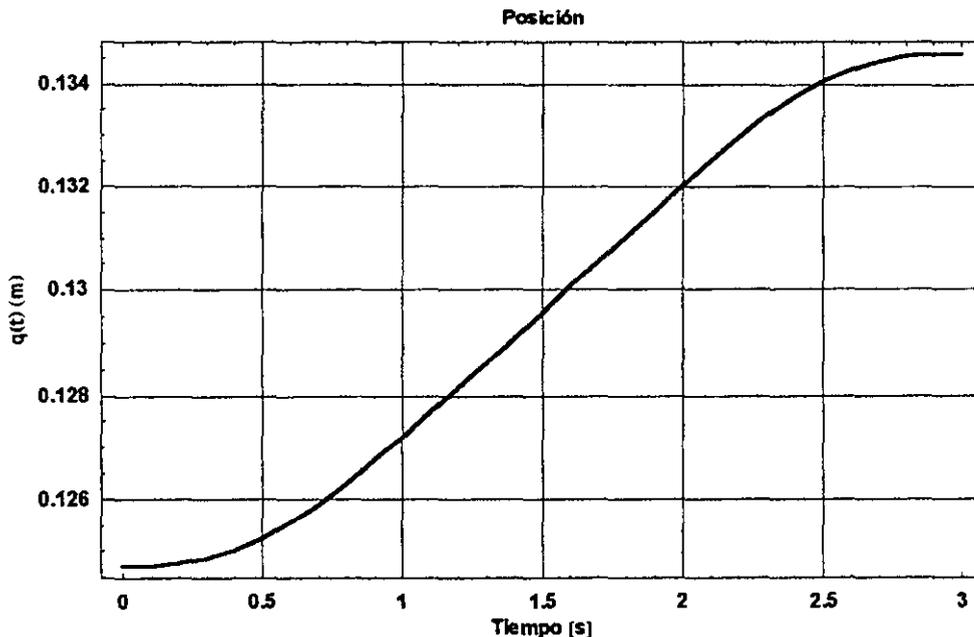


Figura 4.14 Evolución de la posición de un perfil quintico con periodo estacionario.

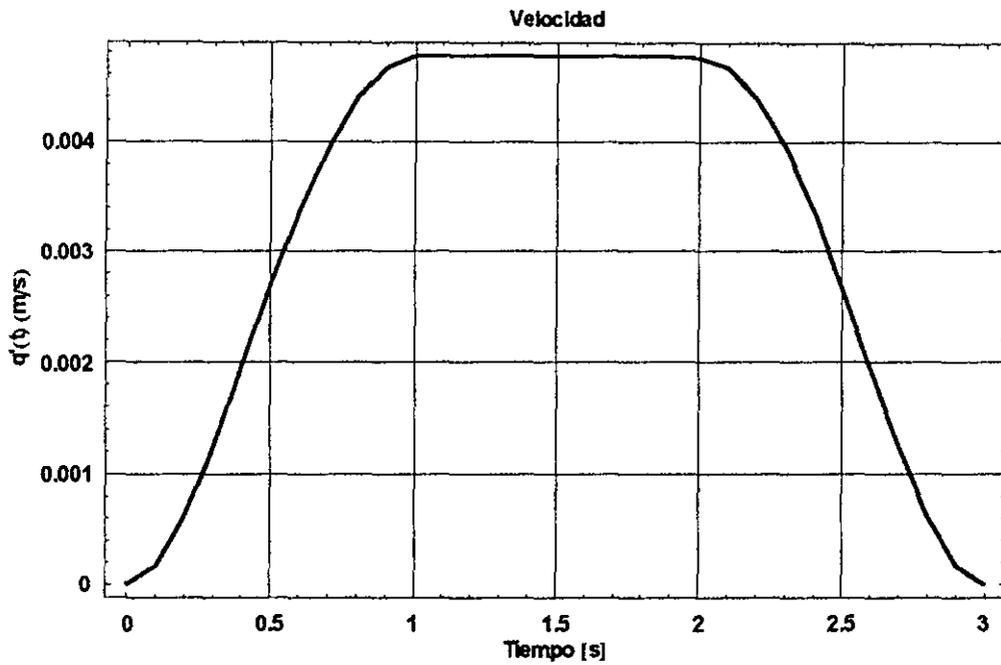


Figura 4.15 Evolución de la velocidad de un perfil quintico con periodo estacionario.

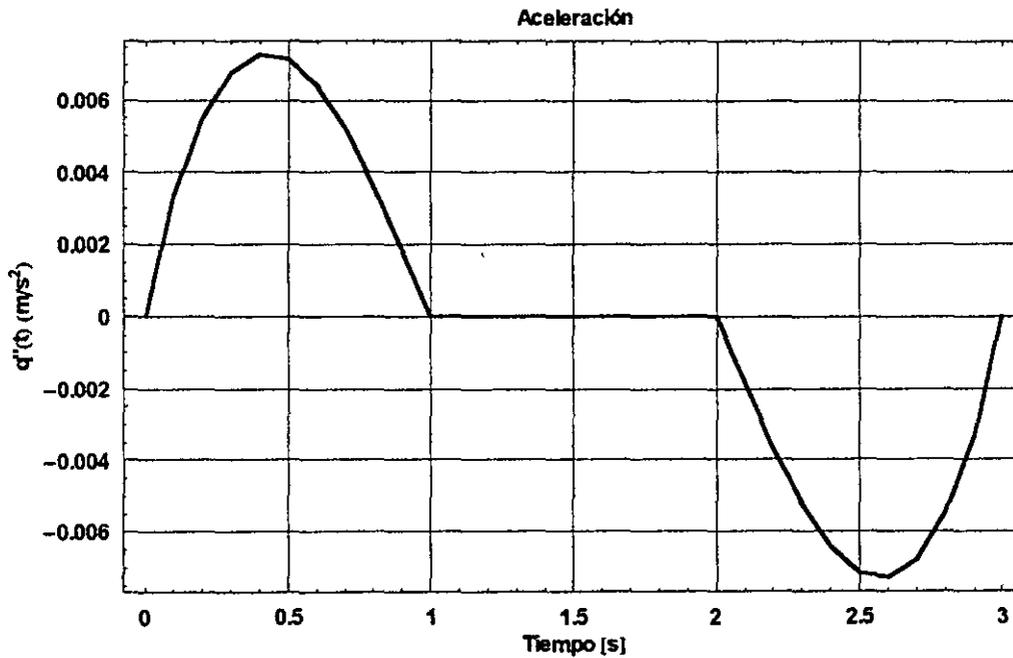


Figura 4.16 Evolución de la aceleración de un perfil quintico con periodo estacionario.



4.5 ANÁLISIS EN EL ESPACIO

Para poder caracterizar el par del motor 3, necesario para empujar al cuerpo por medio del giro de la extremidad cuando se encuentra apoyada, se plantea la ecuación de la cantidad de movimiento angular sobre el punto O, como se muestra en la siguiente figura:

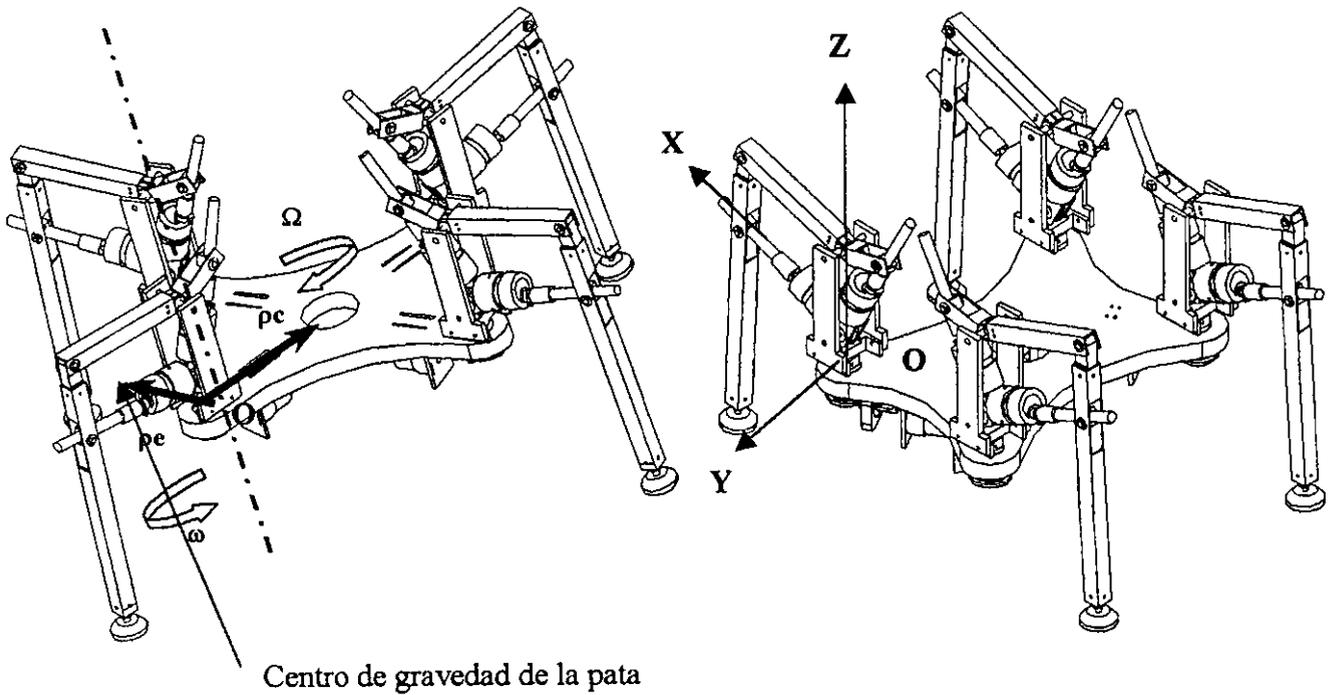


Figura 4.17 Diagrama para cantidad de movimiento angular.

$$H_O = I_C \omega + m_E \rho_E \times \dot{\rho}_E + M_C \rho_C \times \dot{\rho}_C \quad 4.55$$

donde:

H_O = Cantidad de movimiento angular sobre el punto O.

I_C = Momento de inercia del cuerpo.

ω = Velocidad angular.

m_E = Masa de la extremidad.

ρ_E = Posición del centro de gravedad de la extremidad.

$\dot{\rho}_E$ = Velocidad del centro de gravedad de la extremidad.

m_C = Masa del cuerpo.

ρ_C = Posición del centro de gravedad del cuerpo.

$\dot{\rho}_C$ = Velocidad del centro de gravedad del cuerpo.



Los momentos que se ejercen sobre el punto O, quedan definidos por la siguiente ecuación:

$$\sum M_o = (H_o)_{Oxyz} + \Omega \times H_o \quad 4.56$$

donde:

$(H_o)_{Oxyz}$ = Rápidez de cambio de H_o respecto al sistema giratorio OXYZ.

Ω = Velocidad angular del sistema giratorio OXYZ.

$\sum M_o$ = Suma de momentos en con respecto a O.

Como se trata de la rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje fijo, las velocidades angulares del sistema giratorio y del cuerpo rígido Ω y ω son iguales, es decir, si la extremidad apoyada gira con una velocidad ω con respecto al cuerpo, el cuerpo también gira con una velocidad ω con respecto a la extremidad. De esta manera, si utilizamos perfiles de velocidad y aceleración angulares para el giro, del mismo modo que hicimos para las tuercas, las fuerzas inerciales del cuerpo son más grandes que las de la extremidad, por lo que la rapidez de cambio de la cantidad de movimiento angular quedará definida simplemente por el producto entre el momento de inercia del cuerpo y la aceleración angular del mismo, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\sum M_o = I_c \alpha + \Omega \times H_o \quad 4.57$$

El giro es alrededor del eje Z, por lo tanto $\omega = \omega k$, y las componentes del primer término de la ecuación 4.57 quedan definidas por:

$$I_c \alpha = (-I_{xz} i - I_{yz} j + I_z k) \alpha \quad 4.58$$

Como el cuerpo giratorio es simétrico al plano XY, los productos de inercia I_{xz} , además de I_{yz} son iguales a cero por lo tanto la ecuación 4.57 es:

$$\sum M_o = I_z \alpha k + \Omega \times H_o \quad 4.59$$

Donde la componente en k de la ecuación anterior representa el par necesario en el punto O para girar la extremidad apoyada sobre la superficie. Sin embargo, este no es el par demandado en los motores, debido a que se tiene una reducción en los engranes cónicos. De manera que, sustituyendo la componente en k de la ecuación 4.59 en la ecuación 3.7 tenemos:

$$T_{mot3} = \left(\frac{r_{med P}}{r_{med G}} \right) (M_o k) \quad 4.60$$

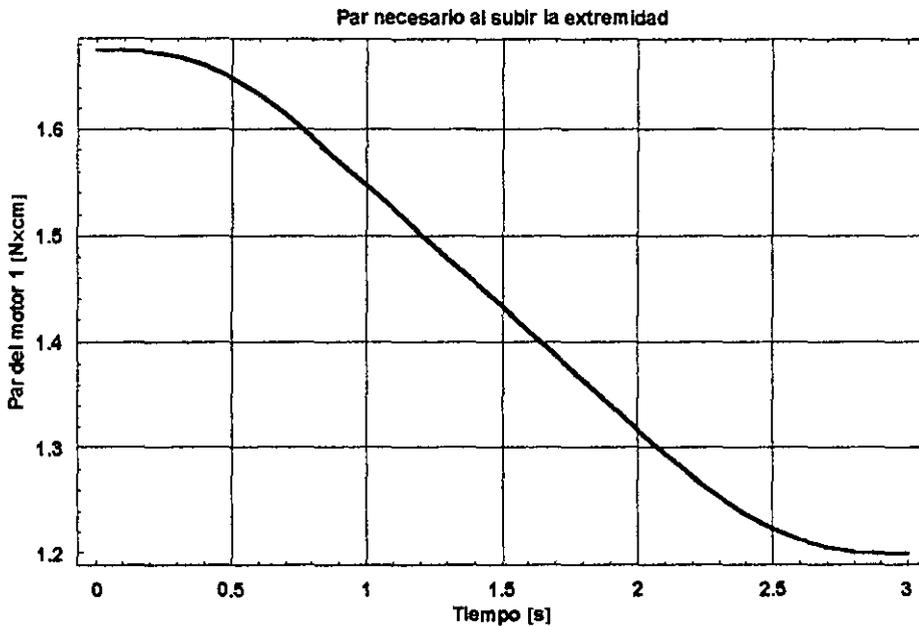


La resolución de la ecuación anterior fue también obtenida mediante la programación en Mathematica. La gráfica que brinda el resultado de este análisis aparece en la siguiente sección de este capítulo.

4.6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

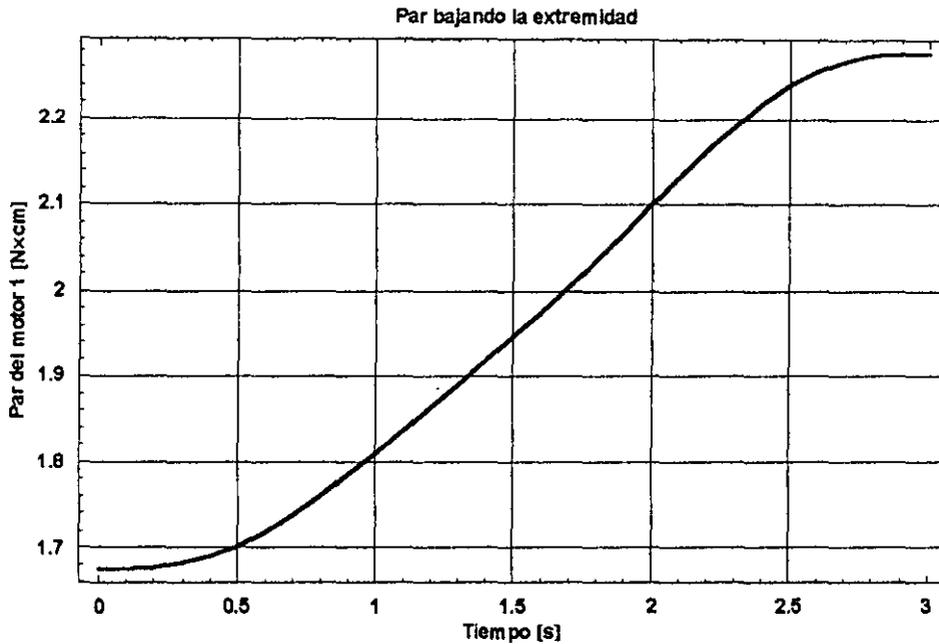
En esta sección del capítulo se dan a conocer los resultados numéricos del análisis de fuerzas. Las gráficas de los pares actuantes requeridos en los motores para lograr el movimiento del robot vienen a continuación. El método numérico para la solución de las ecuaciones está basado en la formulación de Newton-Euler. Con este método recursivo se obtienen los pares de las articulaciones para cada punto dado de la posición de las extremidades. En el apéndice C se muestra el código de programación que conlleva a los resultados obtenidos en este trabajo.

Las gráficas 1 y 2 modelan la variación del torque en el motor 1 para el eslabonamiento de cuatro barras. La gráfica 1 muestra el torque de reacción experimentado por el tornillo de potencia, al cual está conectado el motor 1, cuando es levantada la extremidad del suelo.



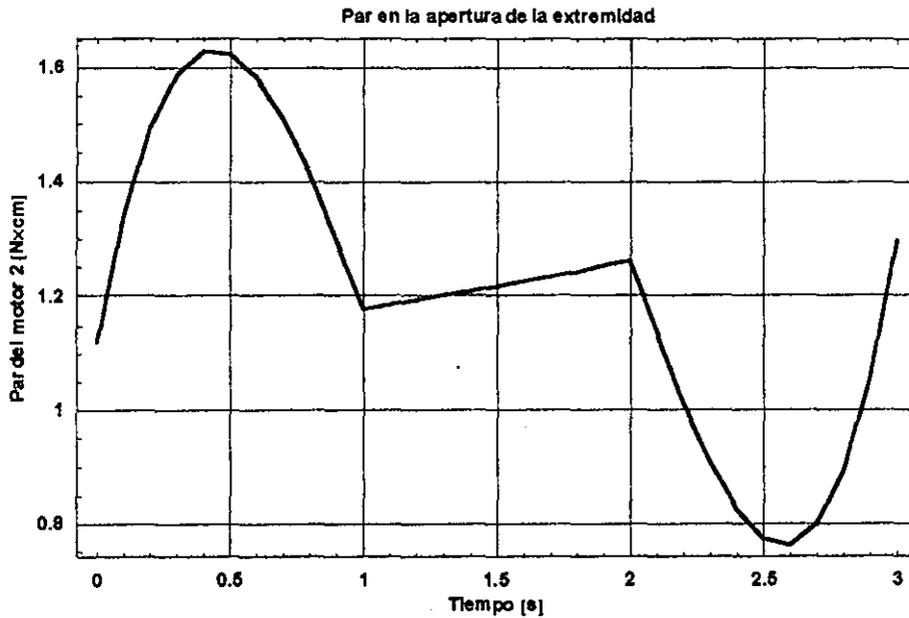
Gráfica 1. Torque de reacción experimentado por el motor 1 al levantar la extremidad.

La gráfica 2 muestra el torque de reacción experimentado por el tornillo de potencia del motor 1, cuando la extremidad es llevada de una posición elevada hasta apoyarse en el suelo y sostener el peso del cuerpo.

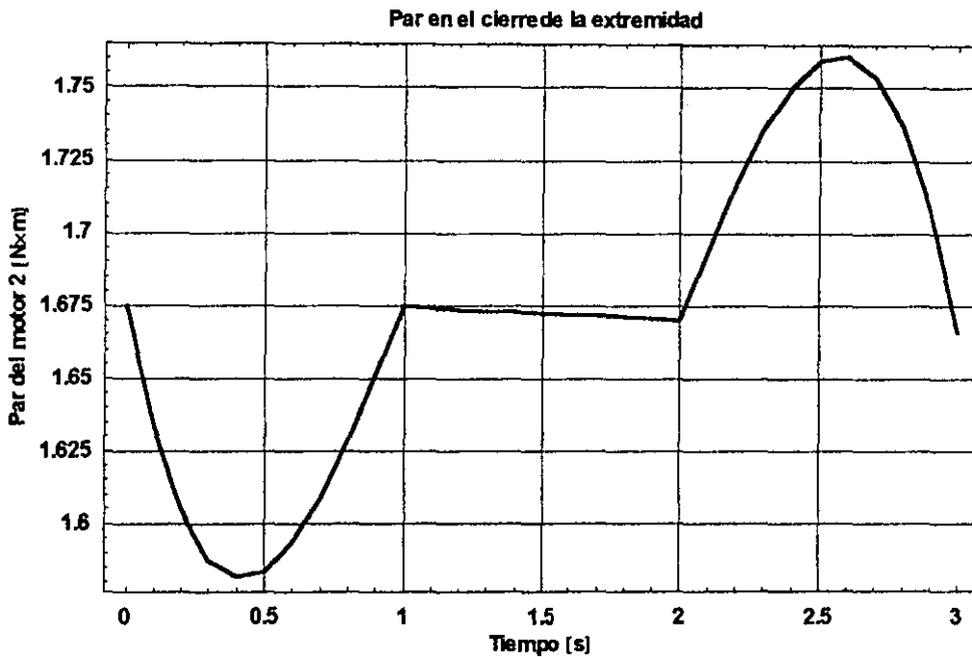


Gráfica 2. Torque de reacción experimentado por el motor 1 al apoyar la extremidad.

Las gráficas 3 y 4 describen el comportamiento de la variación del torque en el motor 2, el cual realiza la apertura y cierre de la extremidad. La gráfica 3 es el par de reacción experimentado por el eslabón 4, el cual es el tornillo de potencia 2 conectado al motor 2, cuando abre el paso.

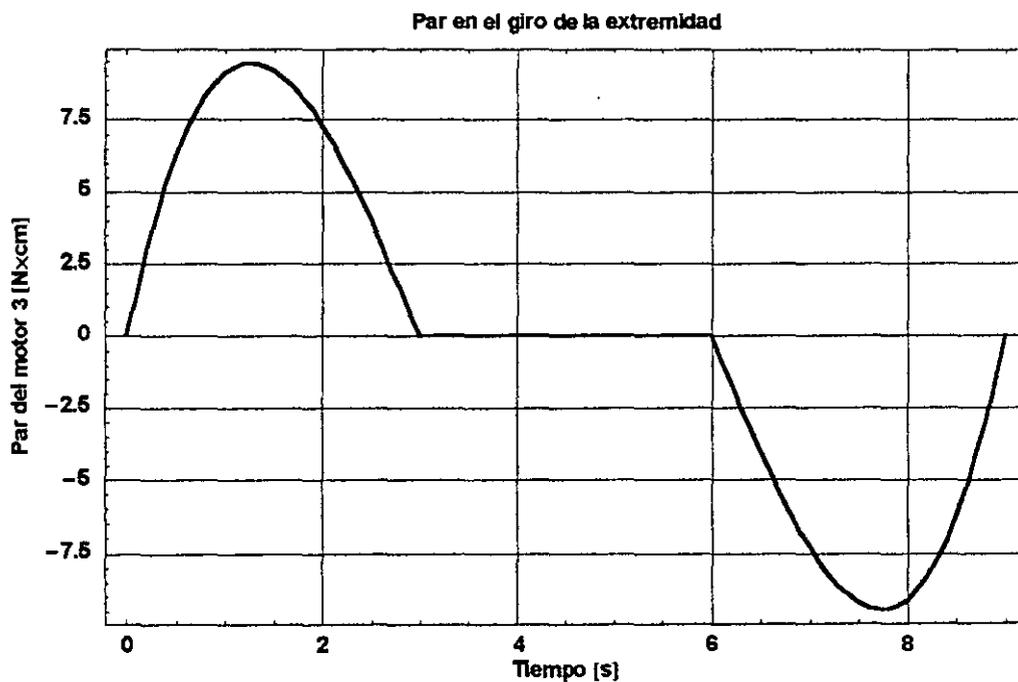


Gráfica 3. Torque experimentado por el motor 2 al abrir el paso.



Gráfica 4. Torque experimentado por el motor 2 al cerrar el paso.

Finalmente, la grafica 5 caracteriza el par del motor 3, necesario para empujar al cuerpo por medio del giro de la extremidad cuando se encuentra apoyada.



Gráfica 5. Torque experimentado por el motor 3 al empujar al cuerpo.



4.7 SELECCIÓN DEL ACTUADOR

Con las variaciones de torques mostradas, se tiene que utilizar un motor que proporcione la potencia necesaria para alcanzar el torque pico de las gráficas de la sección anterior. El motor que sufre mayor variación en el torque requerido es el motor 3 ligado al sistema piñón-cremallera. El valor de estos picos va desde un pico positivo de 7.9 N x cm, hasta uno negativo de la misma magnitud. Los torques pico son puntos donde el motor requiere dar la mayor potencia para satisfacer el movimiento del mecanismo. Como se mencionó en el capítulo anterior, el sistema de impulsión elegido para el robot es eléctrico. Para ello se dispone de motores de corriente directa acoplados a una reducción de engranes. Las características del motor se mencionan a continuación en la siguiente tabla.

Voltaje	Rango de operación VDC	Sin carga		Par inicial (Kg/cm)	Reducción en el sistema de engranes	Tamaño de la reducción (DxL) (in)	Tamaño del motor (DxL) (in)	Tamaño de la flecha (DxL) (in)	Peso (lb)
		Corriente (mA)	Velocidad RPM						
12	4.5-12	75	69	11	100:1	1.4x10	1.5x1.1	0.24x0.70	0.3

Tabla 4.1 Datos técnicos del actuador eléctrico.

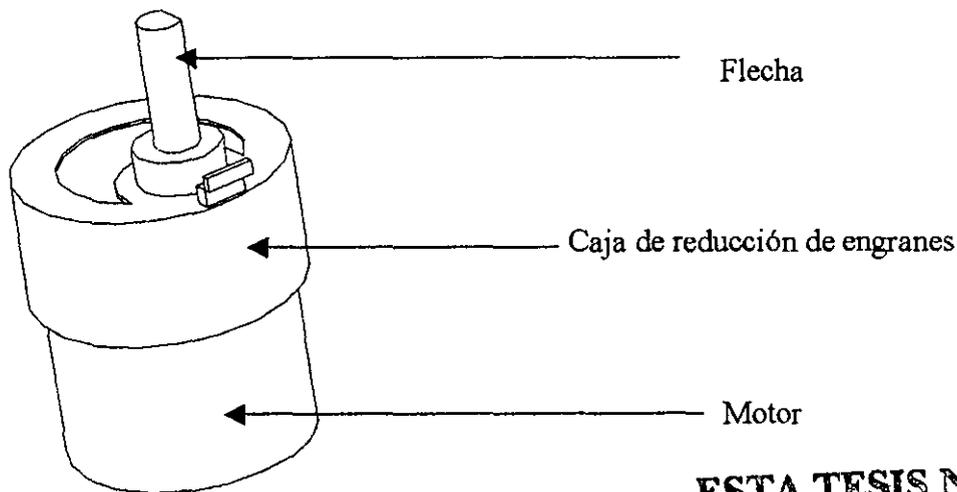


Figura 4.18 Motor con reducción.

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

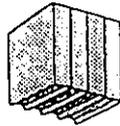
Se tiene un factor de seguridad del 39 % con el motor seleccionado, a medida que el par impulsor es requerido, la corriente demandada por el motor aumenta y la velocidad varía según la curva característica del motor. Por conveniencia para los actuadores 1 y 2 se eligieron motores de la misma capacidad que para el motor 3, aunque se pudieron haber seleccionado motores de más baja potencia, como lo indican las gráficas de sus torques. El sistema de control de los motores y la electrónica implementada en el robot se describe en el siguiente capítulo.



4.8 REFERENCIAS

- (1) D.McCloy, D.M.J. Harris. "Robótica, una introducción". Editorial Limusa. México 1993.
- (2) Parkin, Robert. "Applied robotics analysis". Prentice Hall. New Jersey. 1998.
- (3) Robert L. Norton, "Diseño de Maquinaria". Editorial McGraw Hill. México 1997
- (4) Shigley Edward & Mischke Charles. "Diseño en Ingeniería Mecánica". Mc Graw-Hill. España. 1990.
- (5) Beer & Johnston. "Mecánica vectorial para ingenieros". McGraw-Hill. México. 1986.
- (6) Ignacio Juárez Campos. Investigación Doctoral I. México. 1997.

Tesis y Encuadernaciones
Artline
Tesis, Libros, Folletos
AMATISTA NO. 88 COL. ESTRELLA
MEXICO, D.F. C.P. 07810
TEL. 55-77-61-42





Capítulo V

COMPONENTES ELECTRÓNICOS, CONTROL Y PROGRAMACIÓN

5.1 SISTEMA DE DECISIÓN

Este sistema lleva a cabo el procesamiento de la información proporcionada por el sistema de percepción y el sistema usuario máquina. Para el robot se utilizó un microcontrolador basado en el microprocesador 8031. Esta unidad maneja los cálculos y operaciones lógicas necesarias para controlar el robot. Asociados al microprocesador se encuentran los dispositivos de memoria que almacenan la secuencia de instrucciones que debe realizar la unidad central de procesamiento (CPU) y los datos que ha de operar, así como también los dispositivos de entrada y salida a través de los cuales el microprocesador transmite y recibe señales de los sistemas de percepción y de actuación.

Las características generales del microcontrolador son la siguientes:

- CPU de 8 bits.
- 64K de ROM.
- 32 bits de I/O.
- UART full-duplex.
- 6 fuentes / 5 vectores de interrupción con dos niveles de prioridad .
- 64K de RAM.
- 128 bytes de RAM interna .
- Dos temporizadores / contadores de 16 bits .
- Reloj.

El sistema de usuario máquina, es una interfase de tipo serie con protocolo RS232, el microcontrolador utiliza un circuito integrado (CI) MAX232. El enlace serie transmite un bit cada vez, aunque sólo se requieren dos cables para la transmisión de datos, se utiliza para este fin un conector DB9. Las conexiones involucradas para las distintas señales del protocolo de transmisión, para enviar datos, transmiten una señal de solicitud de envío a la computadora por el conector 3 y la computadora manda una señal de libre para envío por el



conector 2, con ello se comienza la transmisión de datos. El microcontrolador tiene una velocidad de transmisión de 2400 baudios.

El microprocesador incluye un CI 8255 que sirve como puerto de entrada y salida (I/O) permitiendo una comunicación directa entre la unidad central de procesamiento y los dispositivos externos. El CI 8255 se divide en tres puertos A, B y C, cada uno con 8 bits, es decir 24 bits en total por todo el puerto. La configuración del puerto se hace mediante software, sin embargo, dado el número de salidas necesarias para controlar los doce motores de CD cada uno requiere al menos 2 bits para poder controlar su sentido de giro, fue necesario introducir un puerto 8255 adicional, el cual está conectado al puerto de direcciones, datos y decodificación. Este circuito extra fue configurado de manera que los tres puertos que maneja sean de sólo lectura, es decir, utilizamos este puerto como entrada de las señales de todos los sensores.

En el apéndice D se puede ver el diagrama esquemático del diseño de la expansión del puerto paralelo del sistema de desarrollo 8031. Esta tarjeta cuenta con un CI 8255, el cual puede ser disponible para ser leído o escrito por el CPU a través del bus de datos. Existen 5 conectores, el PUERTO, DIR, PA, PB y PC.

El conector PUERTO es un header de 2x20 hilos que mediante un cable plano se une al puerto de direcciones, datos y decodificación del microcontrolador. La disposición de las conexiones del cable plano se observan también en el apéndice D. La alimentación de este circuito se realiza a través de este mismo header.

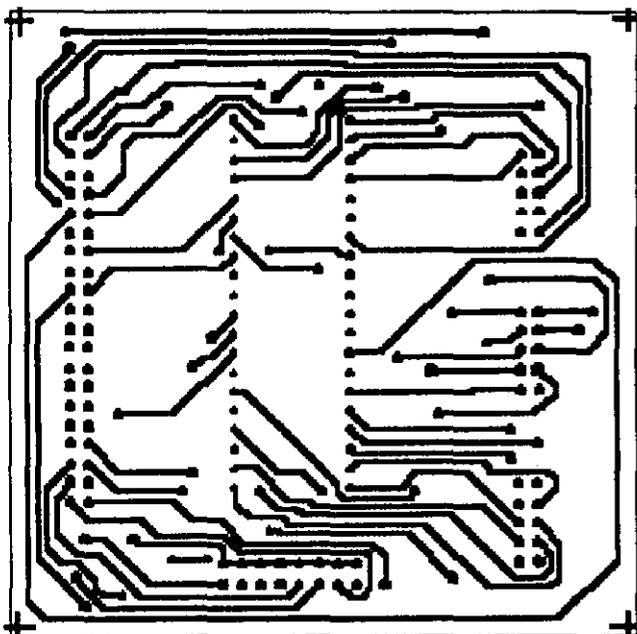
El conector DIR tiene como función la selección de la dirección del CI 8255 mediante la cual el dispositivo va estar conectado al CPU. La selección se hace mediante un jumper que une la terminal CS del 8255 con la dirección deseada. Las direcciones en el conector son: \$0000, \$2000, \$4000, \$6000, \$8000, \$A000, \$C000 y \$E000. La dirección \$0000 está ocupada en el microcontrolador por la memoria 2764, la \$2000 es utilizada por la memoria 2864, y la dirección \$E000 es la que controla el CI 8255 de la tarjeta. Por esto la dirección que se utilizó en la tarjeta de expansión es la \$6000.

Los conectores restantes PA, PB y PC son las líneas de entrada por las cuales se reciben las señales de los sensores y a su vez por los cuales tienen su alimentación de VCC y tierra. La disposición de los bits de cada puerto puede verse en el apéndice D.

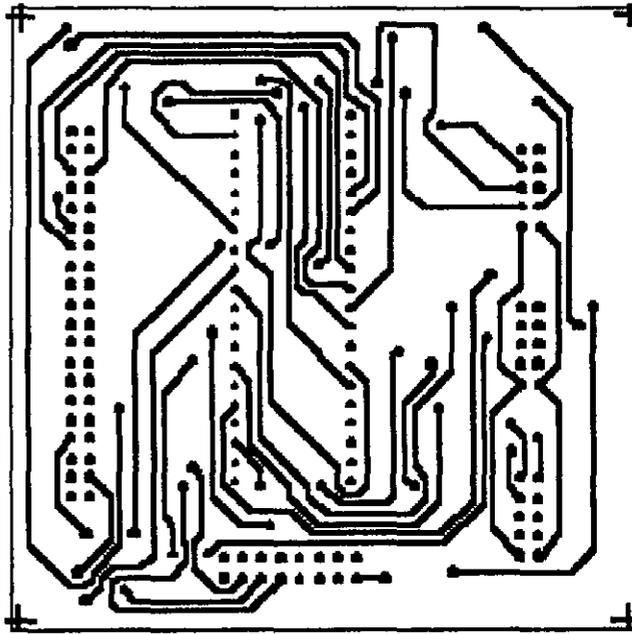
Es necesario comentar que todas las tarjetas de circuitos electrónicos fueron diseñadas de forma modular, con el objetivo de tener un buen mantenimiento y facilitar su colocación en la plataforma del robot, además de lograr una localización de fallas más eficiente y hacer más sencilla su corrección.

Todos los diseños de las pistas de los circuitos están hechos por el método de serigrafía sobre placas de fibra de vidrio de doble cara.

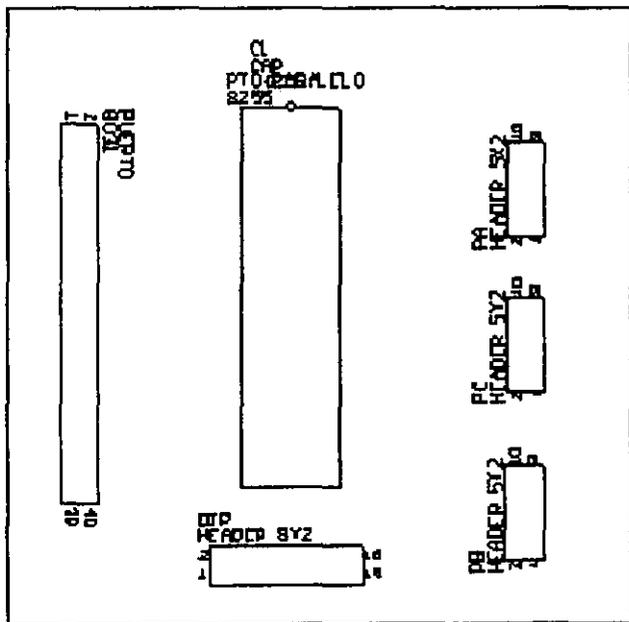
La figura 5.1 muestra la disposición de los elementos y el diseño de las pistas del circuito correspondiente a la expansión del puerto del microcontrolador 8031.



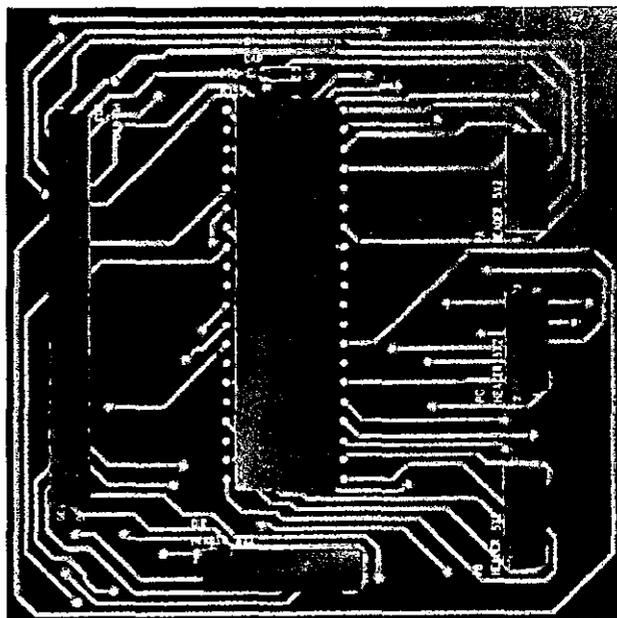
Diseño de las pistas de la expansión del puerto.
Cara de Arriba.



Diseño de las pistas de la expansión del puerto.
Cara de Abajo.



Disposición de los circuitos.



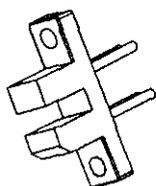
Vista 3D de la tarjeta.

Figura 5.1 Circuito de la expansión del puerto del 8031.

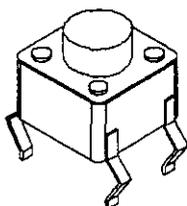


5.2 SISTEMA DE PERCEPCIÓN

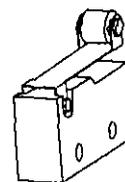
El sistema de percepción está integrado por los sensores tanto internos como externos. Los sensores internos proporcionan la información del estado propio del robot sin tomar en cuenta su entorno, mientras que los sensores externos brindan información del entorno en que se encuentran. En la figura 5.2 se muestran los tres tipos de sensores utilizados en el proyecto.



Switch óptico.



Microswitch.



Interruptor de rodillo.

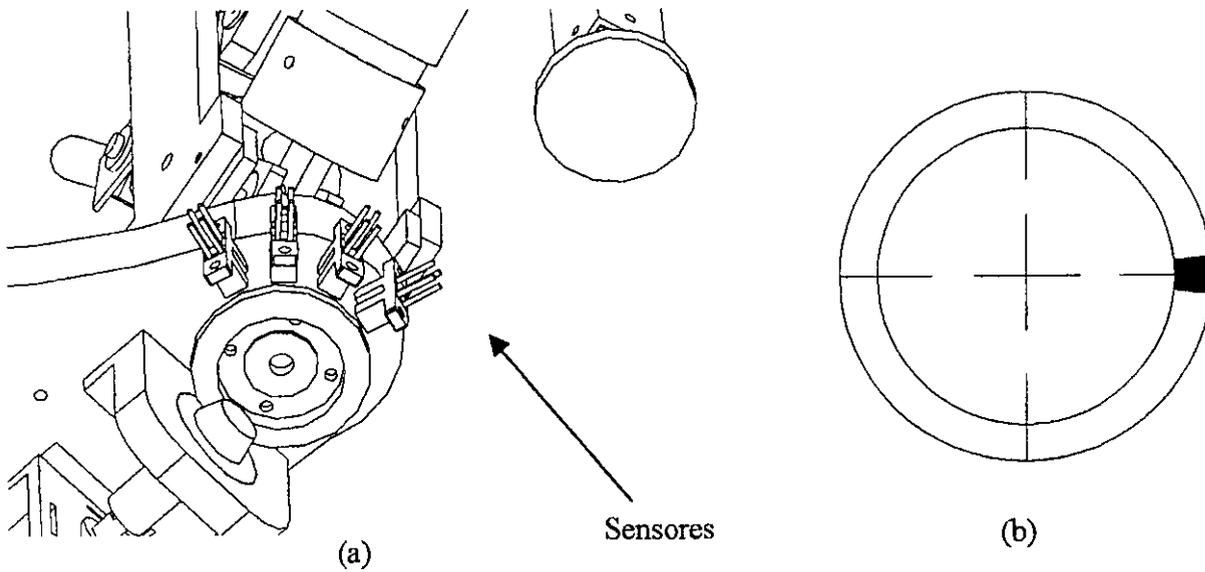
Figura 5.2 Sensores .

5.2.1 Sistema de percepción interno

Para llevar un control de malla cerrada es necesario medir la posición relativa que guardan ciertos puntos de referencia del robot. Para controlar la rotación de cada extremidad con respecto al cuerpo, se colocaron cuatro switches ópticos que denotan la posición alcanzada por la extremidad respecto al cuerpo. La configuración de la posición de los sensores en cada extremidad puede observarse en la figura 5.3 (a).

El principio de funcionamiento de este arreglo es el siguiente: al rotar el motor provoca el movimiento de la cremallera y del codificador acoplado a la misma. En el sensor, la banda de luz infrarroja emitida por el emisor se dirige hacia el detector. El haz de luz se interrumpe en la zona opaca del codificador provocando con ello un 0 lógico en el opto-transistor, y en las regiones transparentes del disco se tiene a la salida del detector un 1 lógico. Al girar el codificador la zona oscura gira, pasando por cada uno de los cuatro sensores según sea su posición en determinado tiempo. En la figura 5.3 (b) se muestra el patrón del codificador utilizado. Cada sensor ocupa una línea de entrada al CI 8255 de expansión, en total hay 16 sensores que monitorean las posiciones angulares debido a la rotación de las 4 extremidades.

Los sensores fueron estratégicamente colocados en las posiciones que debe cumplir cada extremidad en la secuencia de marcha para lograr estabilidad, como se muestra en la figura 5.3 (a).

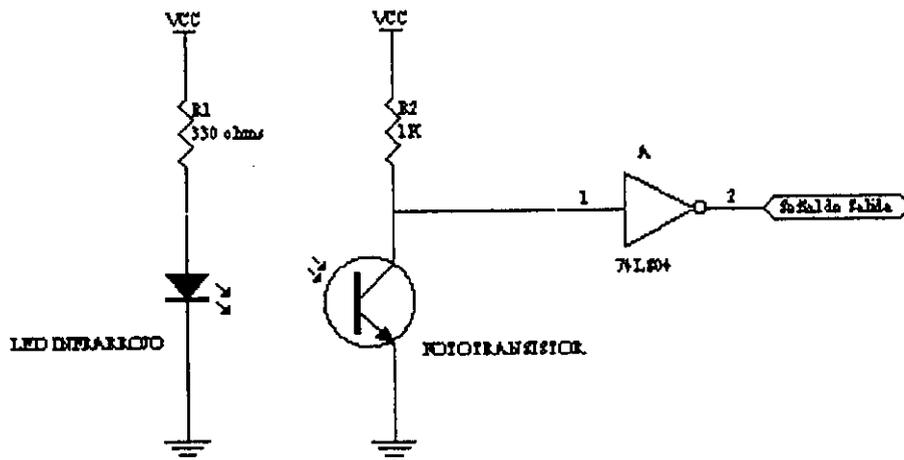


Posición de los sensores en la extremidad.

Patrón del codificador.

Figura 5.3

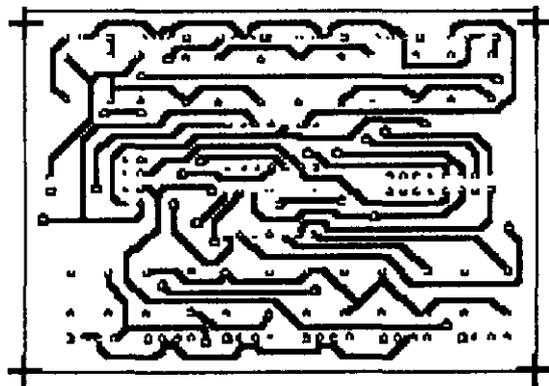
El siguiente esquema muestra el diagrama del circuito del transductor.



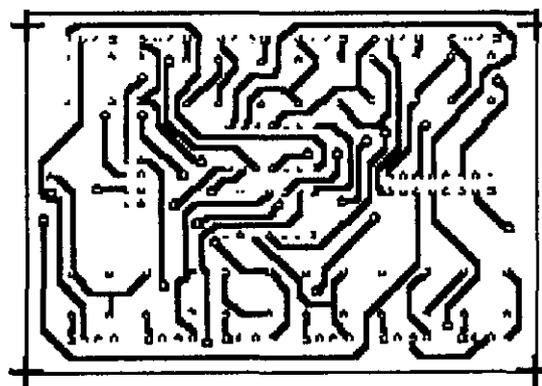
El circuito correspondiente al fototransistor se construyó con base en la figura 5.3, el circuito integrado 74LS04 es un inversor, el cual invierte la señal de salida del transistor y la cuadra. El valor de la resistencia del emisor se fijó en 330Ω , mientras que la resistencia del fototransistor en $1 \text{ k}\Omega$. En el apéndice D se puede apreciar el diagrama esquemático de la tarjeta que contiene la configuración para 12 fotosensores. Esta tarjeta es



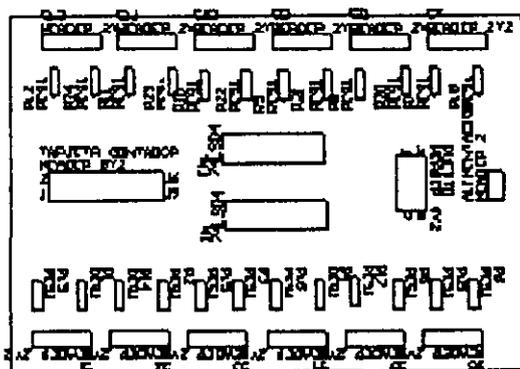
denominada tarjeta de sensores 1. La figura 5.4 muestra la disposición de los elementos y el diseño de las pistas del circuito de la tarjeta de sensores 1. Esta tarjeta se conecta a la tarjeta sensores 2 por medio de un cable plano, por este medio se transmiten las señales que proporcionan los transductores.



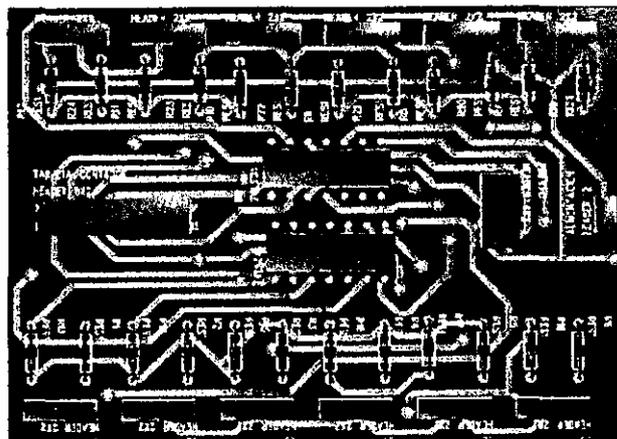
Diseño de las pistas (cara de arriba).



Diseño de las pistas (cara de abajo).



Disposición de los circuitos.



Vista 3D de la tarjeta.

Figura 5.4 Circuito de la tarjeta de sensores 1.



5.2.2 Sistema de percepción externo

La mayoría de los robots son relativamente torpes, ya que no se pueden relacionar con su ambiente externo. A este tipo de máquinas se les llama robots de primera generación, estos sistemas no tienen conciencia de su entorno y seguirán las instrucciones sin importar si hay cambios en el medio que los rodea y para asegurar su funcionamiento es necesario colocarlos en un ambiente cuidadosamente estructurado.

El prototipo cuenta con un sistema híbrido, el cual tiene un interruptor de rodillo para detectar la posición de la extremidad con respecto al cuerpo y un microinterruptor que sirve para detectar el piso. El segundo sensor se puede considerar como detección al tacto, ya que brinda información en bruto sobre el contacto con la superficie. La disposición de los interruptores en el sistema se muestra en la figura 5.5 a continuación.

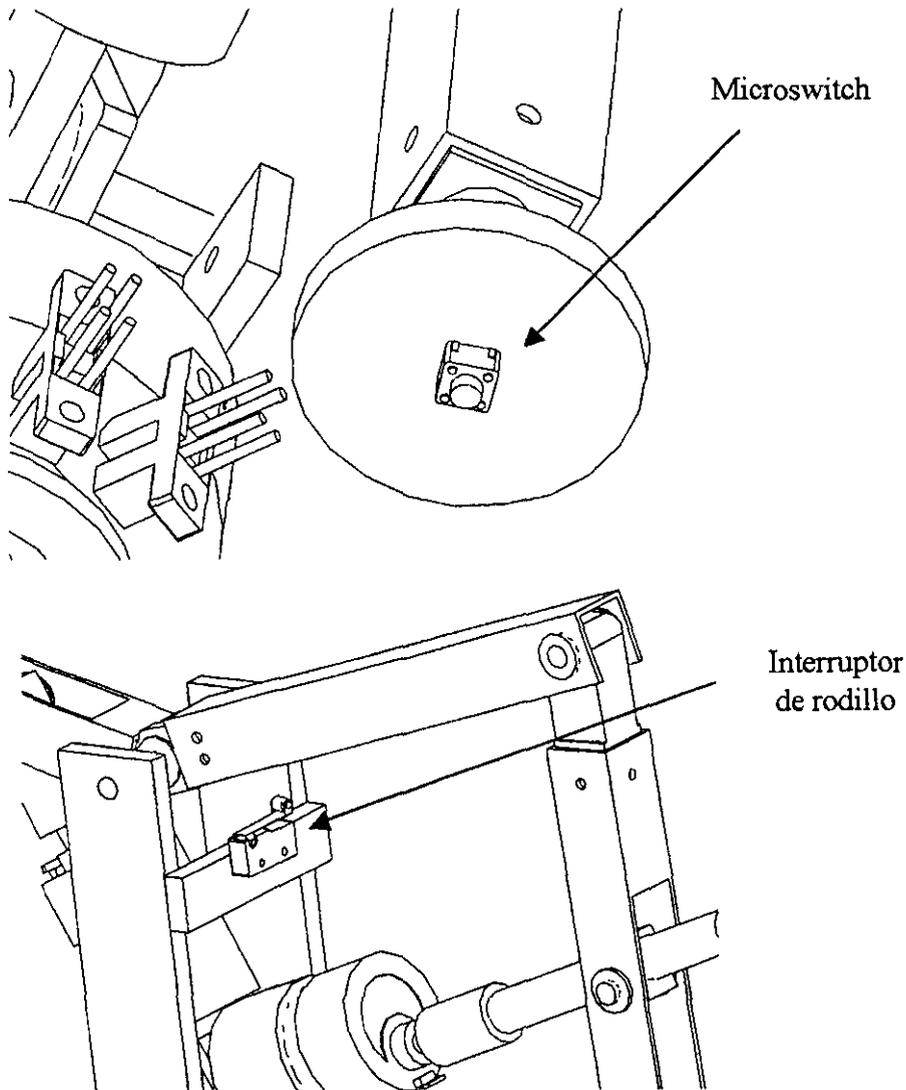
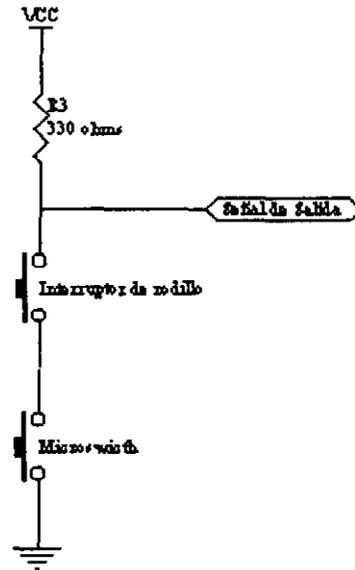


Figura 5.5 Colocación de los interruptores.

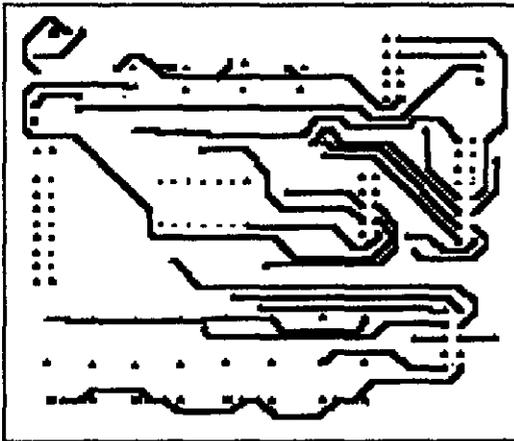


La detección por tacto consiste en los dos interruptores mencionados los cuales están conectados en serie. El cierre de ambos indica que la extremidad se encuentra apoyada en el piso y el eslabón R2 se encuentra en cierta posición respecto de la base. La implementación de este dispositivo ayuda a controlar el ascenso y descenso de la extremidad durante su ciclo de trabajo. A la derecha se muestra el diagrama de la conexión.

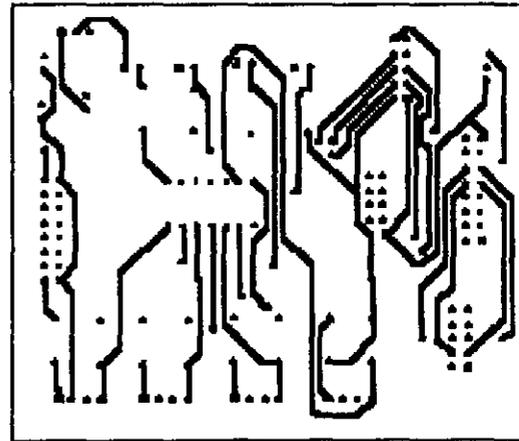


En el apéndice D se puede apreciar el diagrama esquemático de la tarjeta que contiene la configuración para 4 fotosensores y el arreglo de la detección por contacto de las cuatro extremidades. Esta es llamada tarjeta de sensores 2. Asimismo este circuito contiene los conectores donde se recibe la alimentación general del robot, y cuenta con un regulador LM7809 para alimentar el microcontrolador. De esta tarjeta se obtiene también el paso de la corriente y voltaje necesarios para el circuito de potencia de los motores. Otra función que lleva a cabo es la recepción de los datos enviados de la tarjeta sensores 1, a los cuales se agregan las 4 señales de los fototransistores y 4 de los interruptores, para posteriormente clasificarlos y transmitirlos al puerto 8255 de expansión.

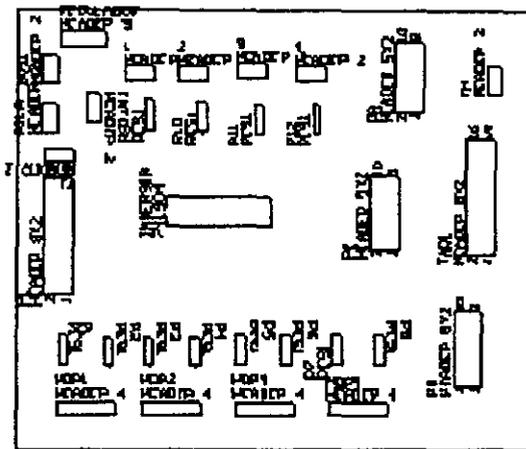
La figura 5.6 muestra la disposición de los elementos y el diseño de las pistas del circuito mencionado.



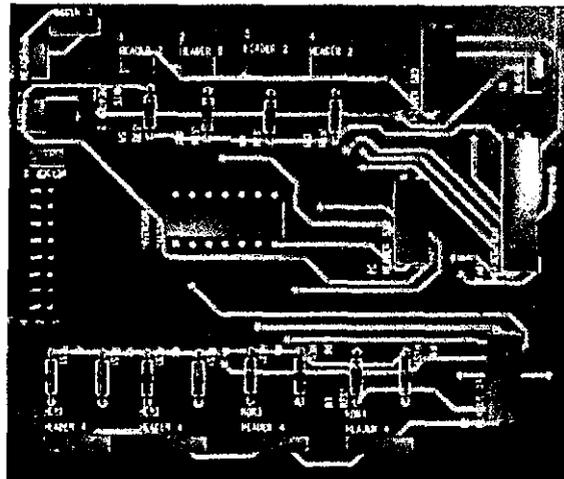
Diseño de las pistas (cara de arriba).



Diseño de las pistas (cara de abajo).



Disposición de los circuitos.



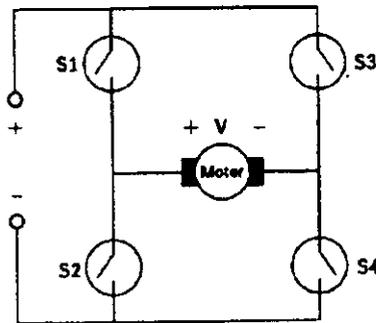
Vista 3D de la tarjeta.

Figura 5.6 Circuito tarjeta sensores 2.

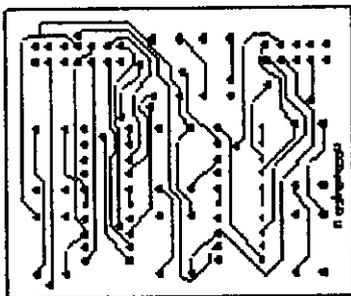
5.3 ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Otro aspecto de electrónica a mencionar, es el arreglo en puente H del circuito de potencia para los motores de corriente directa. Con este arreglo se puede controlar el sentido de giro de los motores DC por medio del funcionamiento del circuito integrado L293C, ya que estos funcionan como interruptores. El funcionamiento esquemático del arreglo en H, se muestra en la figura 5.7(a). Imagine que los interruptores S1 y S4 de la figura están abiertos y los interruptores S2 y S3 se encuentran cerrados, la corriente en el motor fluye de izquierda a derecha, causando el giro del motor. Y cuando S1 y S4 se hallan cerrados, y S2 y S3 abiertos, la corriente fluye de derecha a izquierda provocando un giro contrario al primero mencionado. El arreglo utilizado evita los cortos circuitos, con la ayuda de dos transistores más, que no son mostrados en la figura, pero su función es evitar los cortos circuitos cuando todos los interruptores se encuentran abiertos o cerrados. Además se agregaron diodos a la salida de cada terminal del motor para no dejar pasar corriente cuando el motor funcione como generador, esto sirve de protección para el circuito.

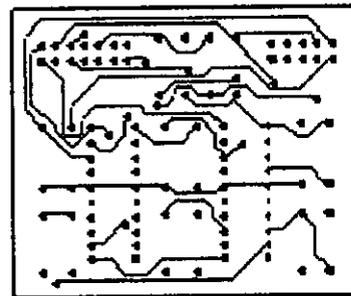
La figura 5.7(b) muestra la disposición de los elementos y el diseño de las pistas del circuito mencionado. Para el movimiento de los 12 motores DC fue necesario construir 3 tarjetas de este circuito, ya que cada una puede controlar 4 motores.



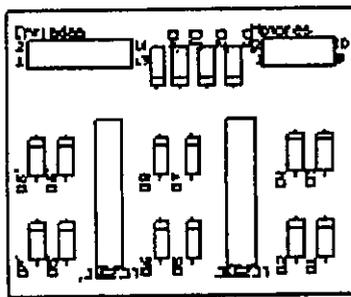
(a) Circuito esquemático de un arreglo H.



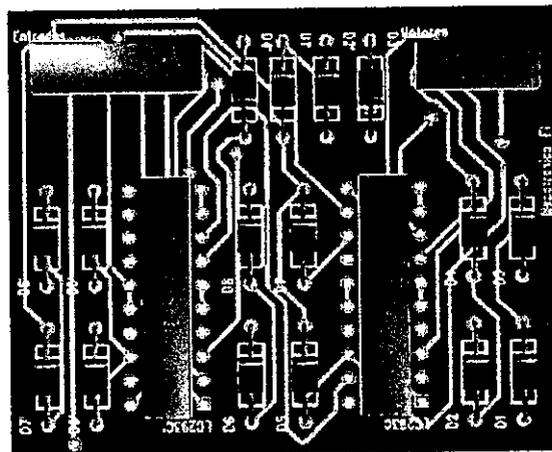
Diseño de las pistas (cara de arriba).



Diseño de las pistas (cara de abajo).



Disposición de los circuitos.



Vista 3D de la tarjeta.

Figura 5.7 Circuito de potencia.



Las tres tarjetas de potencia se acoplan a la tarjeta divisora del CI 8255 del microcontrolador. Esta tarjeta alimenta los motores a 12 V y divide los puertos de tal forma que cada puerto controle la etapa de potencia de cuatro motores. El diagrama esquemático de esta tarjeta puede ser consultado en el apéndice D. Por otro lado en la figura 5.9 se muestra la disposición de los elementos y el diseño de las pistas de la tarjeta mencionada.

El cable plano que une cada circuito de potencia a la tarjeta divisora del puerto es de 12 hilos. La disposición de las conexiones de la caja del cable plano es la siguiente (figura 5.8):

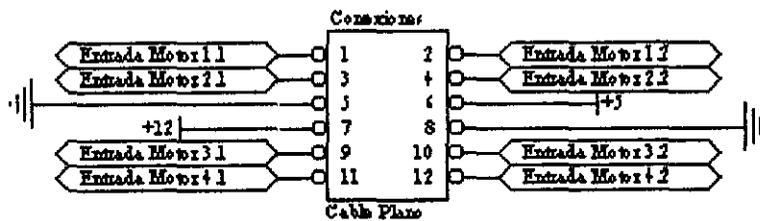
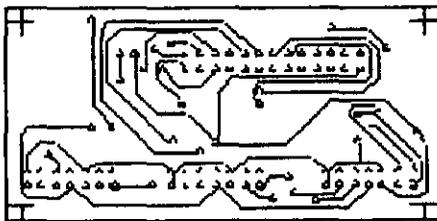
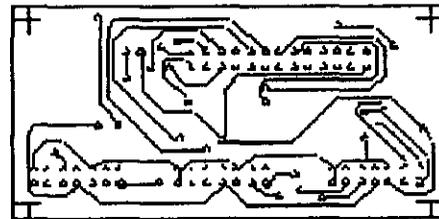


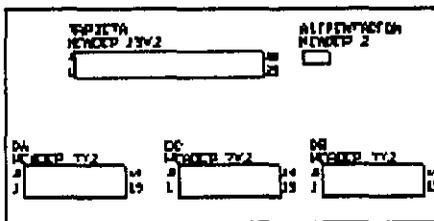
Figura 5.8
Disposición de las conexiones en el cable plano de 12 hilos.



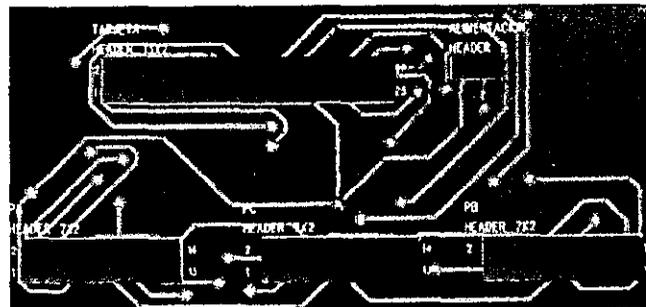
Diseño de las pistas (cara de arriba).



Diseño de las pistas (cara de abajo).



Disposición de los circuitos.



Vista 3D de la tarjeta.

Figura 5.9 Tarjeta divisora del puerto 8255.

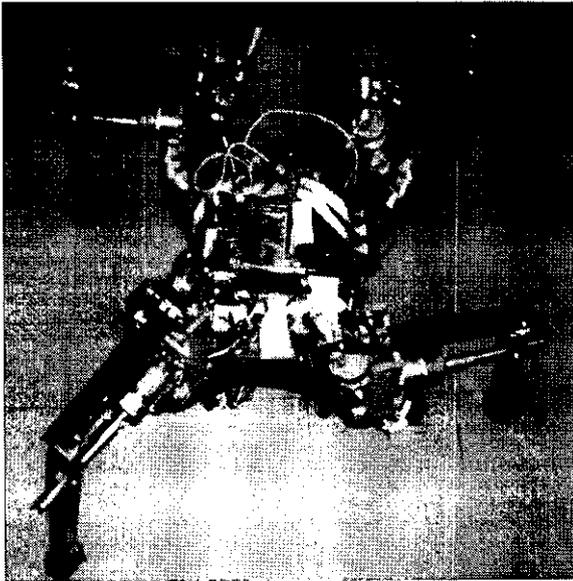


Figura 5.10 Todas las tarjetas de los circuitos electrónicos se colocaron en la parte superior del cuerpo del robot.

5.4 FUENTE DE PODER

El suministro de energía eléctrica lo proporciona un arreglo de baterías recargables de corriente directa en paralelo, cada batería es de 12 V a 2.3 Ah. Con este arreglo queda satisfecha la demanda de energía para los componentes electrónicos y de los motores. Cabe señalar que el consumo de energía también puede ser mediado a través de una fuente de poder, con los requerimientos siguientes: 12 VDC y 3 A mínimo a la salida.

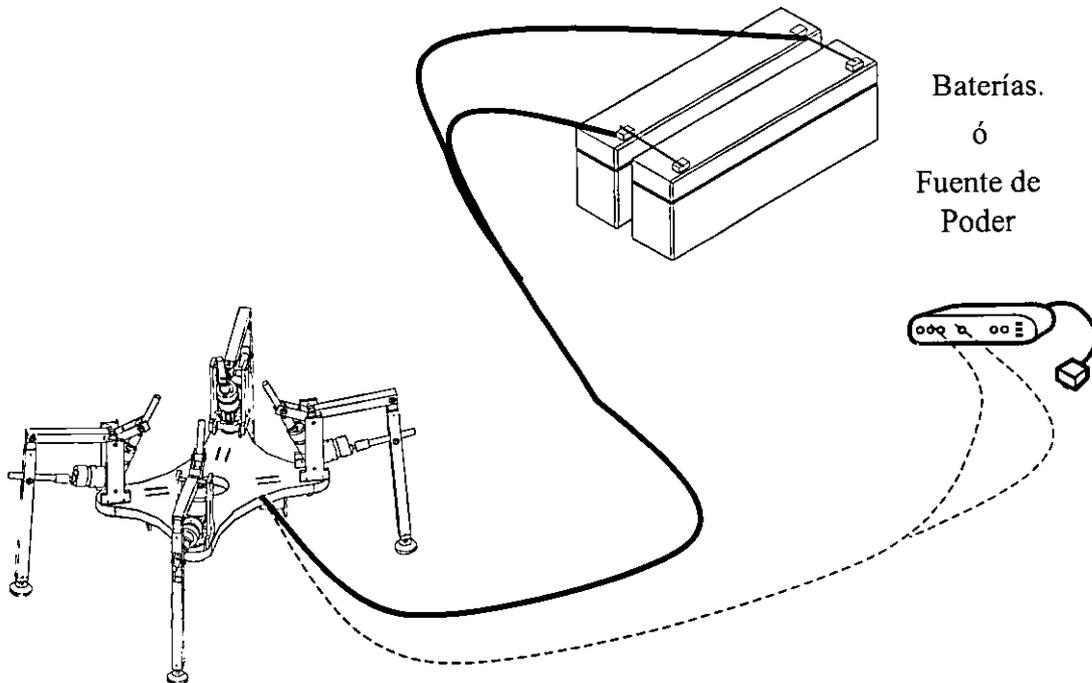


Figura 5.11 Fuente de Poder.



5.5 CONTROL DE LA SECUENCIA DE CAMINADO

El control de la secuencia de caminado que se emplea en este robot, es el denominado punto a punto, ya que dentro de los movimientos que realizan las extremidades en cada accionamiento, sólo importan los puntos inicial y final, alcanzándolos de manera secuencial, y de esta forma se obedezca una jerarquía de funciones dada por el programa de la marcha.

En un principio, la secuencia de marcha fue programada de la forma más sencilla posible, esto es por medio de una secuencia de movimientos basada en tiempos, llevada a cabo de forma continua. Las posiciones de la marcha, necesarias para el caminado, fueron alcanzadas mediante la activación de los motores, alternando en ciertos intervalos de tiempo la alimentación de los mismos, con base en una unidad de tiempo constante, lograda por medio del uso de un timer interno del microcontrolador 8031.

De esta forma el robot llevaba a cabo la secuencia de marcha en vacío, es decir, sin estar apoyado en la superficie, con una adecuada precisión. Sin embargo, al colocar el robot sobre el piso, presentó un comportamiento no satisfactorio al repetir la secuencia de caminado, debido principalmente al efecto de la inercia del cuerpo del robot, ya que en cada repetición del ciclo existía un error en la posición de las extremidades. Con este experimento se concluyó que un control de malla abierta no era adecuado, ya que las variables físicas influyen directamente en el desempeño del robot. Además, bajo esta estrategia, el microcontrolador no tiene conocimiento de los resultados de sus propias acciones.

Para resolver este problema, se necesitó asegurar que las extremidades alcanzaran las posiciones adecuadas para que el centro de gravedad del sistema quedara encerrado en el triángulo formado por las tres extremidades que se apoyan en el piso, con el fin de que el robot no cayera. Esto fue resuelto con la integración de los sistemas de percepción interno y externo aunado a la programación de eventos en el microcontrolador, estableciendo con ello un bloque de malla cerrada.

La estrategia de control la define el microcontrolador con el algoritmo programado a partir de la posición de cada extremidad. El uso de un dispositivo digital para medir la posición, es decir, un codificador, mide la posición de la extremidad con respecto al cuerpo. Con esta implementación, el microcontrolador conoce la información relacionada con sus acciones.

En la figura siguiente se muestra el diagrama del sistema de control de malla cerrada y sus elementos integrantes; medición, acondicionamiento de la señal, procesamiento, amplificación y accionamiento. El ciclo de la marcha se cierra midiendo los resultados de las acciones de las extremidades y utilizando dichas mediciones el microcontrolador toma la decisión de sus acciones futuras.

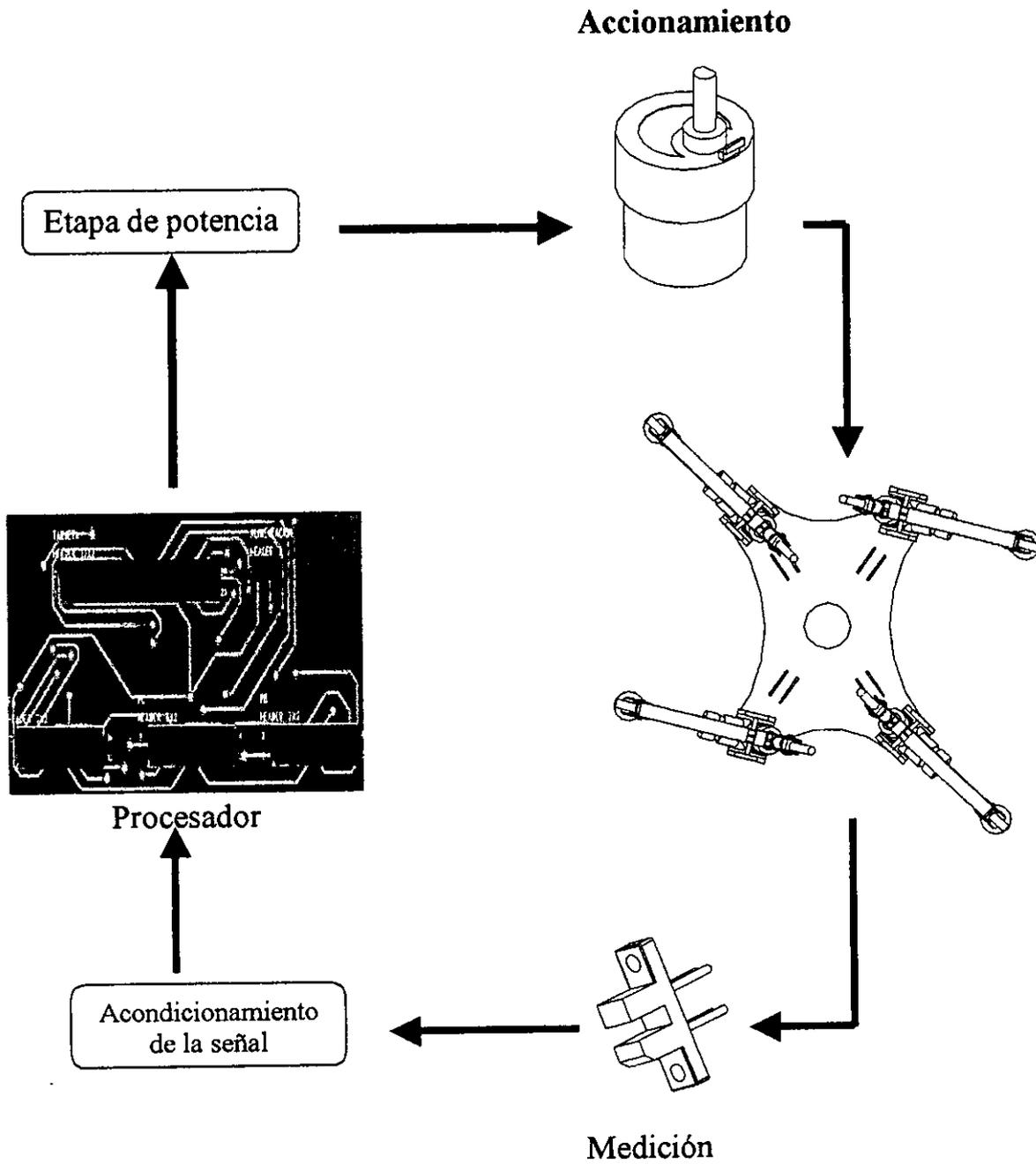


Figura 5.12 Diagrama del sistema de control de malla cerrada.



La matriz que representa los patrones de pisada de la secuencia de marcha para el prototipo, se describe a continuación:

	Pata 4	Pata 3	Pata 2	Pata 1	
Fase 1	0	0	0	0	=
Fase 2	0	0	0	1	
Fase 3	0	0	0	0	
Fase 4	1	0	0	0	
Fase 5	0	0	0	0	
Fase 6	0	0	1	0	
Fase 7	0	0	0	0	
Fase 8	0	1	0	0	

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Al inicio de la fase 1, todas las extremidades se encuentran apoyadas sobre el piso; en la fase 2 se levanta la extremidad 1; en la fase 3 la extremidad 1 se apoya nuevamente de manera que todas están apoyadas en el piso; en la fase 4 se levanta la extremidad 4 y en la fase 5 se vuelve apoyar. En las demás fases se sigue una secuencia similar con las extremidades que restan. Por último cuando la fase 8 es realizada se regresa a la fase 1. Esta es la secuencia programa en el microprocesador y se lleva a cabo para obtener el movimiento del prototipo.

El control y la secuencia de eventos están muy ligadas en la programación del microprocesador. Las funciones del microprocesador en este caso son las siguientes:

- La secuencia de funciones debe llevarse a cabo de manera automática.
- Debe tomarse decisiones de manera que las operaciones puedan llevarse a cabo de forma condicional dependiendo de la información de los sensores.
- Se requiere un control de la posición de las extremidades.

El funcionamiento automático del robot requiere de la secuencia de eventos, es decir, es necesario asegurar que cada etapa de la secuencia termine antes de comenzar la siguiente. Un programa basado en eventos se detiene cuando sus sensores dejan de indicar la conclusión satisfactoria de cualquier parte de la secuencia, es un problema que presenta el control del prototipo, ya que no se introdujo un control más avanzado. Por ejemplo, un control de malla cerrada que midiera tanto la posición como la velocidad, presentaría mayor estabilidad en la marcha. Para poder implementar este control programable de la posición y la velocidad, se requiere un microcontrolador con más de un procesador para satisfacer todas las funciones.

Los elementos de la secuencia que constituyen el programa para el cumplimiento de la secuencia de marcha del robot se ilustran con mayor claridad mediante diagramas de flujo. El siguiente diagrama muestra la secuencia de eventos o subrutinas llevadas a cabo en el control de la marcha. Esta representación sirve para resaltar algunas características del programa.

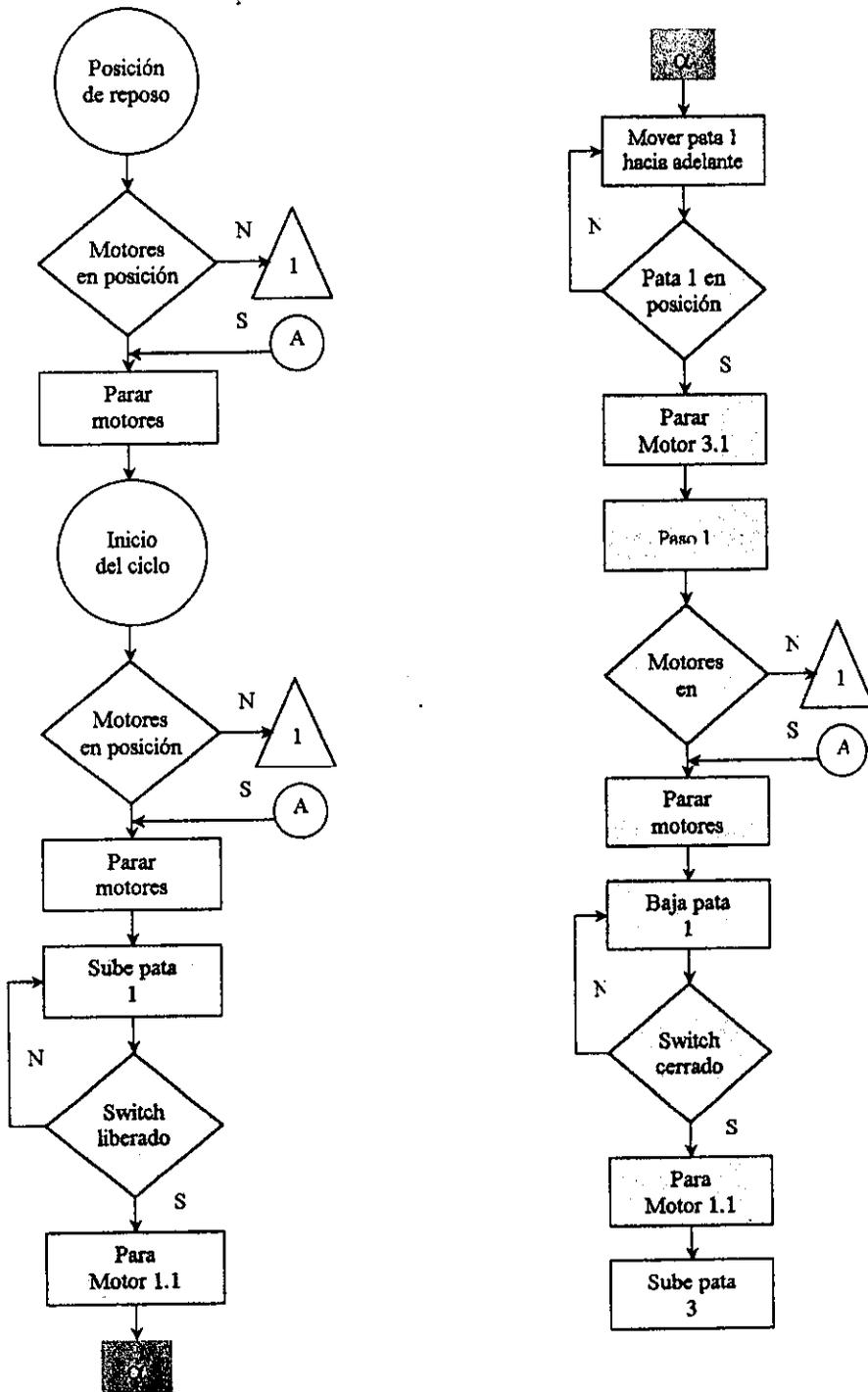


Figura 5.13 Diagrama de flujo para el caminado del robot. Los bloques sombreados conforman la secuencia que se repite para cada una de las cuatro extremidades.

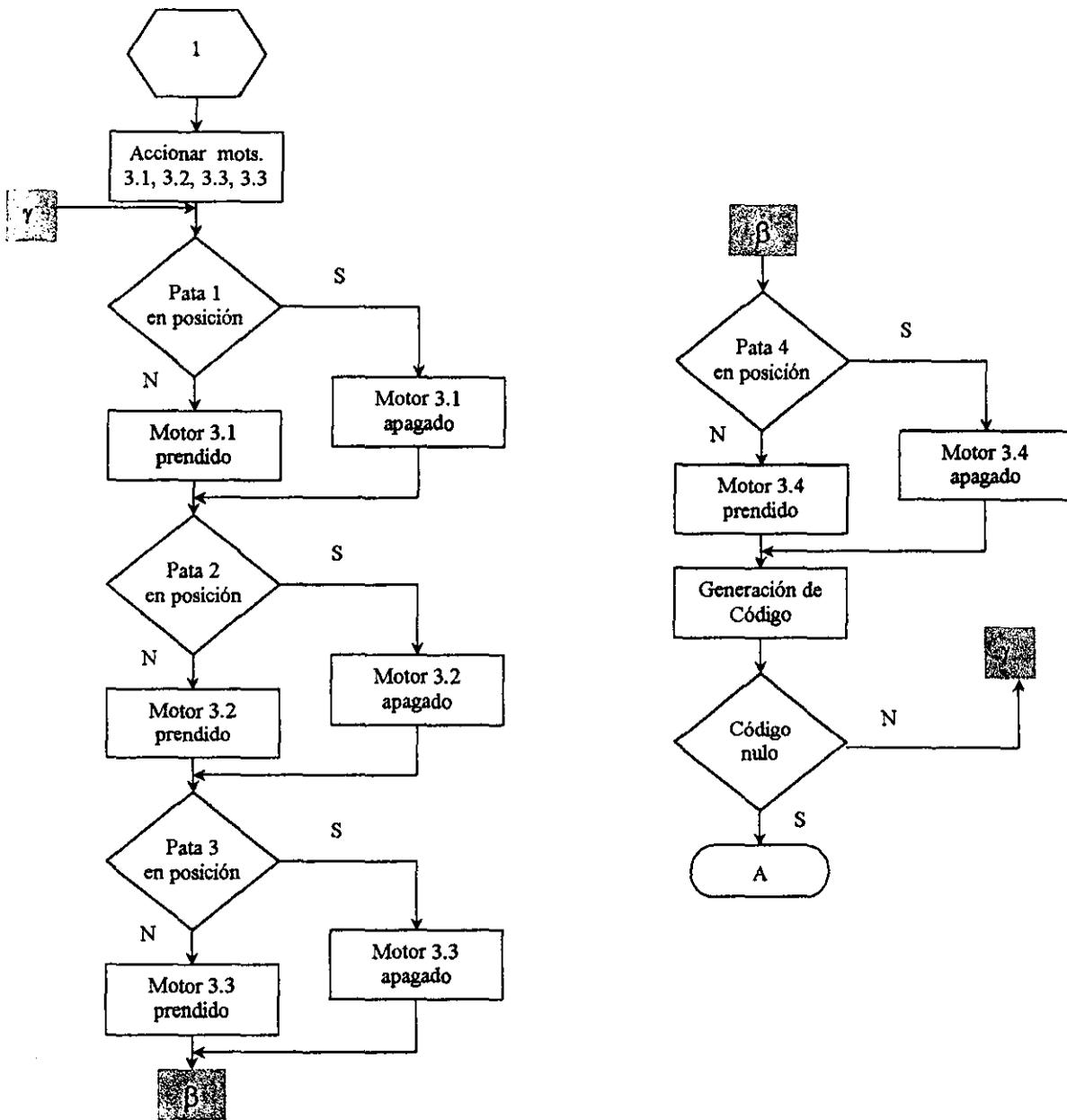


Figura 5.14 Diagrama de flujo de la subrutina 1. Esta subrutina coloca los motores en la posición adecuada para poder realizar el siguiente evento de la marcha.

El ángulo total de giro de cada extremidad, dado por medio de su respectivo motor número 3, es de 90°, los interruptores ópticos están colocados en los ángulo 0°, 30°, 60° y 90°, como se vió en la sección 5.2.1. Cuando una extremidad está colocada en el piso, el ángulo que avanza dicha extremidad en cada evento es 30°, cuando la extremidad es levantada la magnitud del ángulo que se desplaza en este evento es de 90°. Con el último avance se logra dar el paso, mientras que con los desplazamientos de 30° la extremidad empuja al cuerpo hacia delante.



Este ciclo es igual para todas las extremidades, y solamente se encuentra defasado, como se muestra en las figuras 5.15 y 5.16.

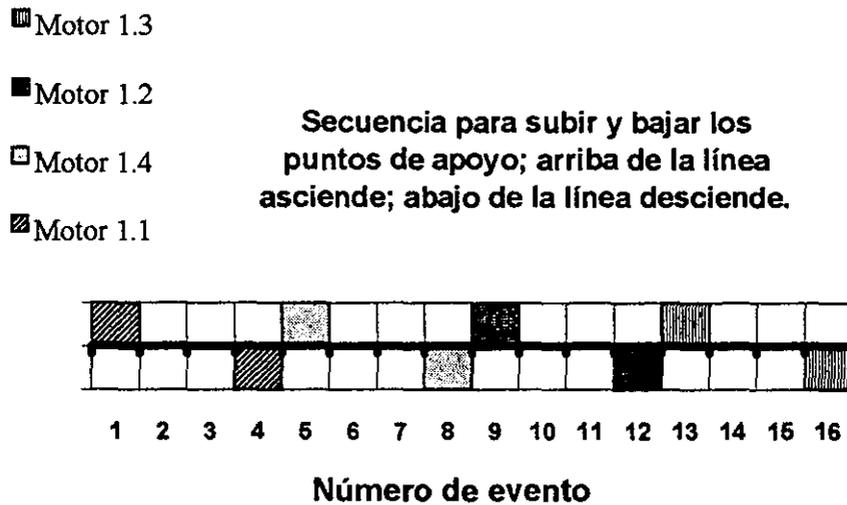


Figura 5.15 Secuencia de alimentación a los motores del sistema ascenso – descenso, para los 16 eventos (8 fases) de que consta el ciclo de un robot.

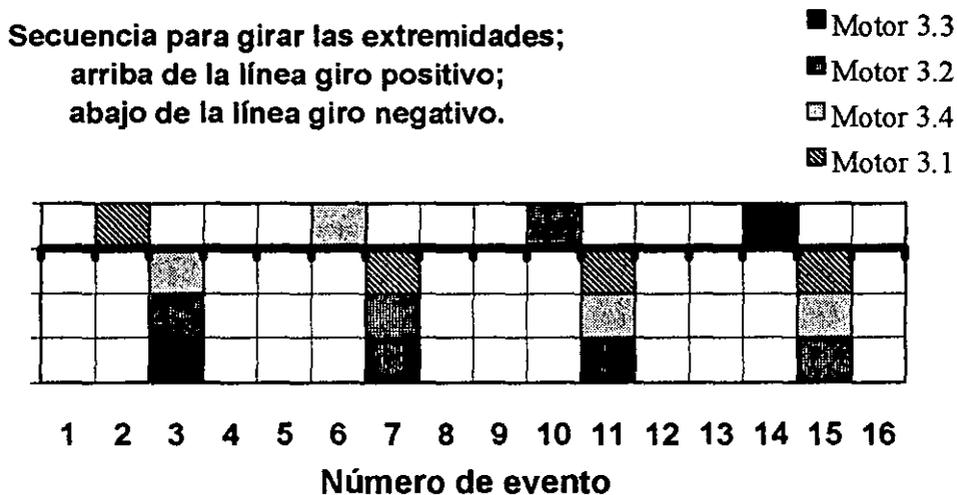


Figura 5.16 Secuencia de alimentación a los motores del sistema de rotación, para los 16 eventos de que consta el ciclo de un robot. En los eventos 3, 7, 11, y 15 se alimenta en paralelo con 12 volts a tres motores, la figura sólo muestra cuál motor se prende en cada evento.

El número de eventos se refiere a las acciones que deben realizar en orden secuencial las extremidades del robot, para poder llevar a cabo la marcha. Tales eventos están sujetos a la información proporcionada por los sensores, y no son realizados en



tiempos iguales, sino que requieren de una o varias condiciones dadas por las lecturas de los sensores, para poder cambiar al siguiente evento. Por simplicidad durante la marcha no se utiliza el sistema de apertura – cierre de la extremidad por lo que usa solamente 8 motores.

Número de evento	Condición (prender hasta que)
1	Interruptor de contacto 1 abierto
2	Sensor delantero 3 habilitado
3	Sensores traseros 1y 7, sensor delantero 5 , habilitados.
4	Interruptor de contacto 1 cerrado
5	Interruptor de contacto 4 abierto
6	Sensor trasero 4 habilitado
7	Sensores delantero 2 y 4, sensor delantero 2, habilitados
8	Interruptor de contacto 4 cerrado
9	Interruptor de contacto 2 abierto
10	Sensor delantero 7 habilitado
11	Sensores trasero 3 y 5, sensor delantero 1 habilitado
12	Interruptor de contacto 2 cerrado
13	Interruptor de contacto 3 abierto
14	Sensor trasero 0 habilitado
15	Sensores delanteros 0 y 6, sensor trasero 6, habilitado.
16	Interruptor de contacto 3 cerrado

Tabla 5.1 Condición de los sensores para cambiar de evento.

5.6 PROGRAMACIÓN

Como ya se mencionó, el robot caminante es controlado por un microprocesador 8031 de Intel. La programación de este circuito integrado se hizo en lenguaje ensamblador, en el que se escribe utilizando las formas nemotécnicas que representa cada instrucción del microprocesador. Asociada a cada instrucción o forma nemotécnica está la dirección de los datos a manipular. En el apéndice E se presenta el programa en lenguaje ensamblador utilizado para la marcha. El microprocesador ejecuta el programa en código máquina al leer y llevar a cabo en secuencia las instrucciones almacenadas en la memoria del CI 2864, la cual puede ser borrada y grabada mediante pulsos eléctricos proporcionados por el software de la memoria del CI 2764 del microcontrolador.

Para traducir el lenguaje ensamblador a código máquina se utilizó un programa de ensamblado llamado CYS-8051, este ensamblado crea el archivo de programa ejecutable que el microprocesador 8031 puede manipular.



Para poder tener una comunicación entre el robot caminante y la computadora, se utiliza un protocolo de comunicación serial RS232, y se conecta el conector DB9 del microcontrolador con el puerto serie de la computadora. El cable que se requiere para la comunicación serial, en su configuración más básica, necesita solamente de tres hilos, uno de los cuales es para transmisión de datos, otro para recepción de datos, y el restante es la señal de tierra. El microcontrolador utiliza una velocidad de transmisión en baudios de 2400, sin paridad, 8 bits por carácter y un bit de paro.

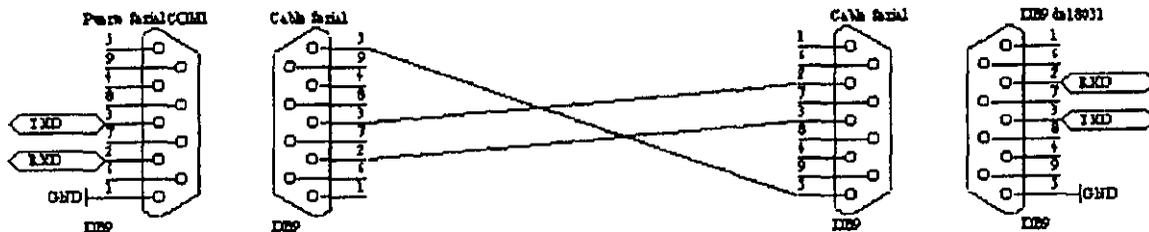
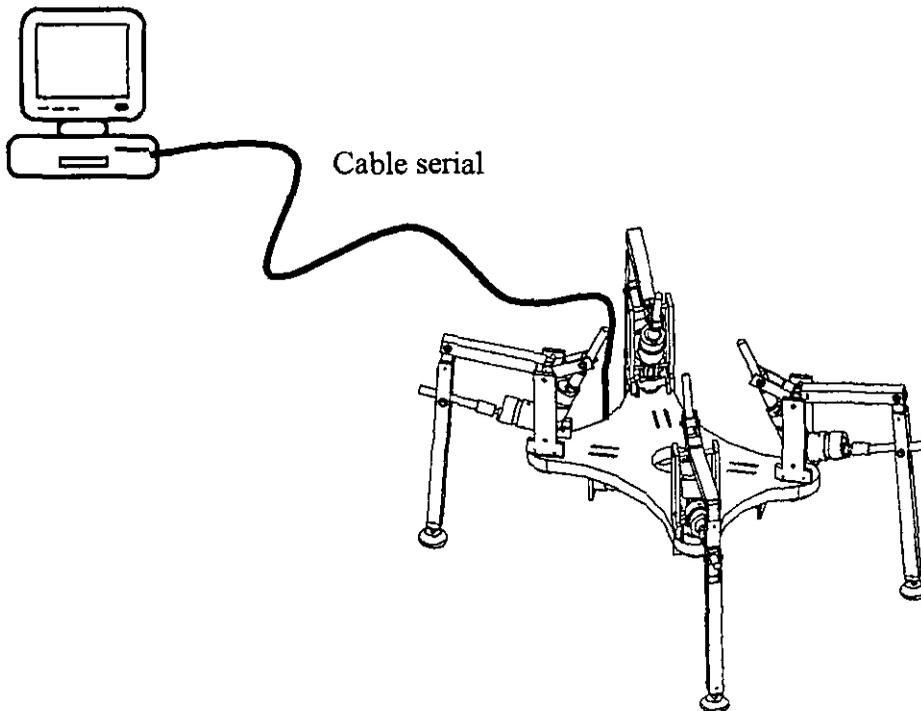


Figura 5.17
Esquema del diagrama de conexiones del cable serial.

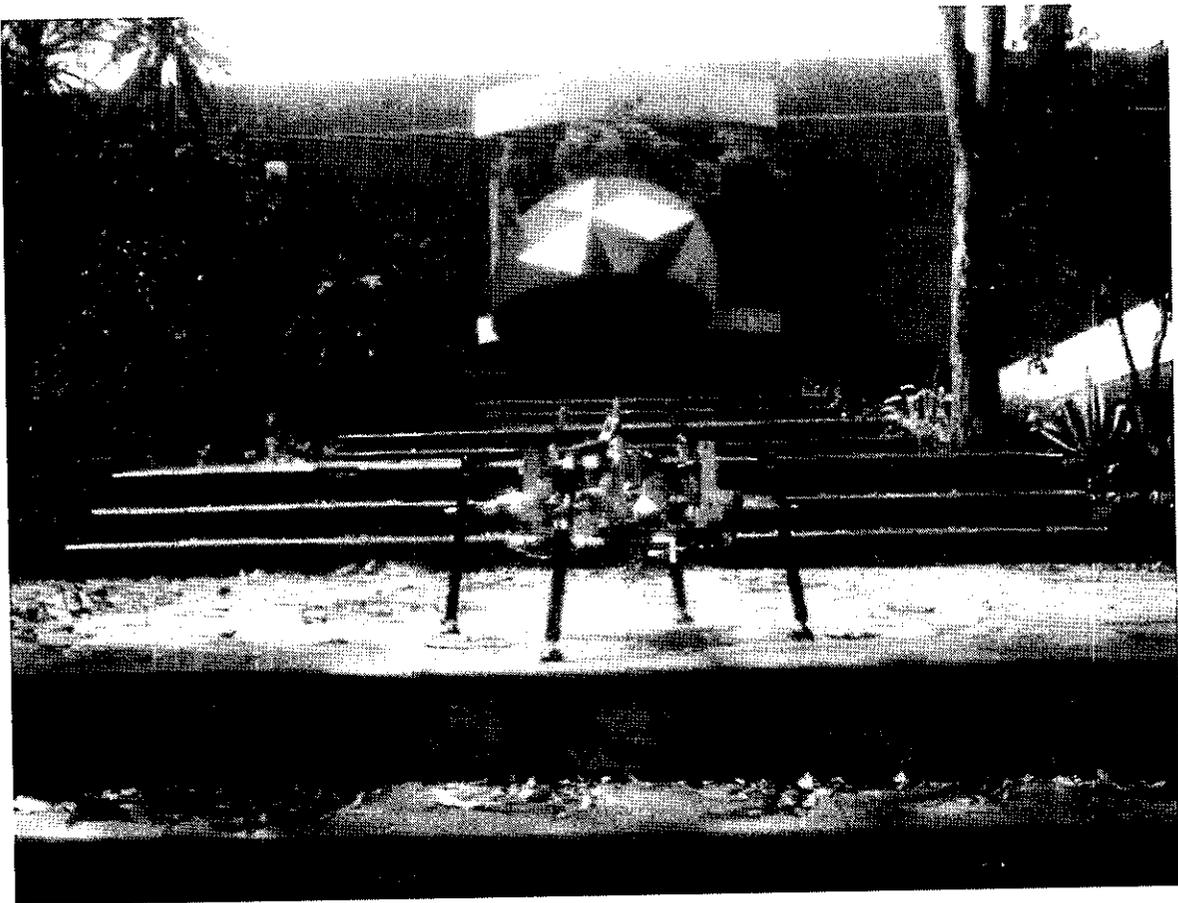
Con este tema terminamos la descripción del trabajo desarrollado en la tesis. En el capítulo posterior se lleva a cabo las conclusiones del proyecto. Mencionando las ventajas y desventajas de nuestro prototipo, así como también posibles mejoras en su desempeño.



Capítulo VI

CONCLUSIONES

Lo siguiente es una serie de consideraciones observadas al accionar el robot caminante, y al probar el programa de control de todo el sistema. Tales consideraciones son inherentes al proceso de diseño, ya que este modelo es sujeto a ser perfectible, y necesita una retroalimentación para poder solucionar errores que impidan el buen funcionamiento del mismo, así como también para integrar nuevas necesidades sobre las funciones que pueda llevar a cabo (aprendizaje, autonomía, etc.).





El objetivo de esta tesis fue integrar un primer acercamiento hacia el aprendizaje sobre este tipo de máquinas, desarrollándolo como un sistema mecatrónico, y dejarlo abierto para ulteriores mejoras o cambios, con el precedente de establecer bases. En este sentido, las conclusiones pueden agruparse para cada uno de los tres sistemas que integran a todo proyecto mecatrónico, y que trabajan sinérgicamente:

- Sistema mecánico.
- Sistema electrónico.
- Sistema de control.

El desempeño que pueda llevar a cabo el sistema en su totalidad depende o está sujeto al funcionamiento de estos tres subsistemas. Al efectuar las pruebas, se logró que el robot llevará a cabo la marcha para la que había sido preparado, y además se proporciona máxima flexibilidad posible en los subsistemas para poder llevar a cabo otros tipos de marcha, implementando diferentes algoritmos de control.

6.1 SISTEMA MECÁNICO

Las articulaciones se comportan de una manera adecuada, ya que la adaptación de los baleros o rodamientos de bolas, en estas partes, no sólo permiten el giro libre relativo de unos eslabones sobre otros, sino que también absorben las cargas que se pudieran presentar debido a las fuerzas estáticas y dinámicas, sin tener que sacrificar par o potencia de los motores en fricción de los cuerpos con movimientos relativos.

Por otro lado, la articulación esférica que se tiene en los puntos de apoyo de las extremidades le facilita al robot apoyarse sobre toda la planta sin importar la forma del terreno donde se transporte. Esta planta tiene además una superficie de hule, la cual le impide al robot patinarse sobre el terreno de apoyo, obteniendo con esto la fricción necesaria que la extremidad requiere para desplazar al cuerpo cuando ésta se encuentra apoyada.



La desviación que presenta el eslabón 1 sobre la vertical, producto de la carga que soporta al estar apoyada la extremidad sobre una superficie, afecta al sistema de rotación. Este problema puede ser mejorado mediante la adaptación de otro soporte para la rotación, de manera que se podrían tener dos posibilidades:

- Una es que en la parte superior del eslabón 1, se colocara este segundo soporte de giro, con la condición de que no estorbara a la trayectoria del tornillo 1, que



sobresale sobre tal eslabón, y se mueve junto con la extremidad, tanto cuando levanta, como cuando gira.

- La segunda posibilidad consiste en colocarlo en la parte inferior del cuerpo, realizando una extensión de la flecha que conecta la rueda, con el eslabón 1 de la extremidad. Esto también ayudaría a corregir la desviación de la vertical, y no requeriría una pieza tan complicada como la que sujetaría a la articulación rotacional del caso anterior, aunque disminuiría el espacio para librar obstáculos del robot.

Con cualquiera de estas dos posibilidades se puede mejorar la rotación, además de que la flecha que une a la rueda con la base del eslabón 1, no estaría sujeta a la flexión sobre su eje longitudinal, lo que le provoca un esfuerzo adicional al motor tres para girarlo. En este sentido, cabe mencionar que esta flecha se encuentra roscada en su extremo superior, y se sujeta con una tuerca por la parte de arriba del cuerpo, fijando ambas partes por medio de un tornillo (prisionero) como un cuerpo rígido. Esta unión presenta problemas de fijación, y algunas veces se suelta un poco el prisionero, provocando un juego en ésta, de manera que esto representa un punto a ser rediseñado, para impedir cualquier tipo de juego en el robot.

Las restantes uniones trabajan adecuadamente y no requieren un rediseño de sus partes. Los motores seleccionados son capaces de dar el par y la potencia requeridas de acuerdo a las gráficas en el análisis de fuerzas, y presentan un buen funcionamiento. Los eslabones que conforman las extremidades, soportan adecuadamente el peso de todo el conjunto, y no presentan deformaciones por torsión o por flexión al empujar el cuerpo para que avance.

En general el sistema mecánico cumple sus funciones adecuadamente, sin embargo presenta algunos juegos, derivados del desajuste de los tornillos en las partes de unión de los sistemas de transmisión de potencia, debido a que las vibraciones en los motores, y del movimiento del robot, los afloja. En este sentido, para el mejor funcionamiento del sistema en general, se aplicaron selladores en las partes que sujetan a unas piezas con otras, en su mayoría por medio de tornillos, de manera que conservarán su movimiento como conjuntos de cuerpos rígidos, con movimiento permitido, por medio de articulaciones.

6.2 SISTEMA ELECTRÓNICO

Las tarjetas electrónicas fabricadas para controlar el movimiento del robot, distribuyen los componentes en forma modular, de manera que puedan ser identificados los problemas fácilmente, para poder arreglar o sustituir los componentes dañados de una manera sencilla. Esto también facilita la colocación, sobre el cuerpo, a manera de ahorrar espacio, ya que pudieron ser colocados en tandem, y se pueden desarmar para tener un fácil acceso sobre ellos en caso de que alguna señal presente un error.



Los sensores colocados en los costados del cuerpo, también fueron diseñados de forma modular, es decir pequeñas tarjetas fueron sujetas a cada uno para poder identificar cualquier mal funcionamiento, y así poder sustituirlo, sin desmontar otra cosa más que el mismo sensor.

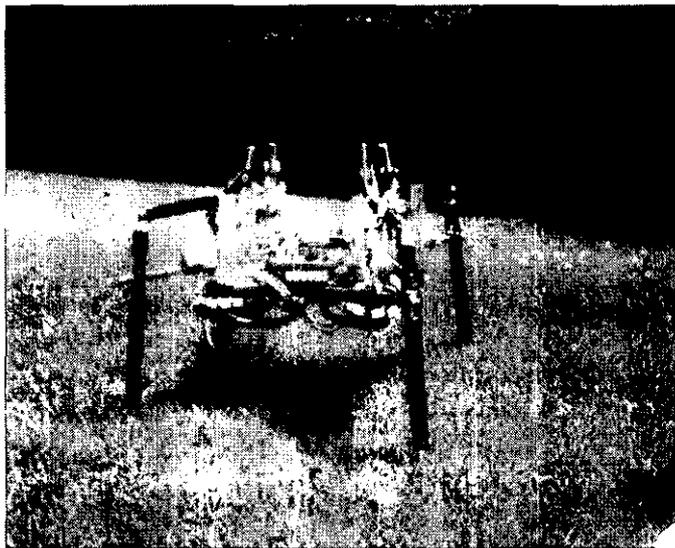
Los cables que conducen las señales de alimentación y disparo de los sensores en los costados están confinados en el interior de un tubo aislante, para evitar enredarse con las partes en movimiento y mejorar la estética misma del robot.

Tanto las tarjetas de potencia como las de los sensores, no presentaron errores durante las pruebas, ya que fueron debidamente revisadas y armadas, y ejecutaron las acciones ordenadas por el microprocesador adecuadamente.

6.3 SISTEMA DE CONTROL

El balanceo del robot durante el caminado es un punto importante, para llevar a cabo una secuencia de marcha. Como se mencionó anteriormente, el centro de gravedad del sistema debe permanecer siempre dentro de un triángulo formado por las tres extremidades apoyadas, para que la máquina no se caiga durante la marcha. Durante las pruebas, se observó que es necesario tener un control por eventos para que las extremidades lleven a cabo esta condición, ya que con un sistema de malla abierta arrastraba errores en los ángulos necesarios en las extremidades que al final traían como consecuencia el desplome del robot.

El control por eventos permite que el conjunto de las extremidades se mueva únicamente hasta que se han completado las condiciones necesarias para entrar en la



siguiente fase del ciclo. Los sensores en los costados envían las señales al microcontrolador que cumplen tales condiciones, y de esta manera se logra la marcha del robot. En este sentido lo que se observó fue que tal marcha cumple con la condición del centro de gravedad dentro del triángulo, sin embargo se observan ciertos problemas en el avance del robot referentes al desnivel del cuerpo.

Un problema que presenta el control del prototipo, ya que no se introdujo un control más avanzado, es decir, un control de malla cerrada que

midiera tanto la posición como la velocidad, presentaría mayor estabilidad en la marcha. Para poder implementar este control programable de la posición y la velocidad, se requiere un microcontrolador con más de un procesador para satisfacer todas las funciones.



Este balanceo sobre la horizontal, se puede mejorar implementando un control a través de sensores de nivel, sobre el sistema de ascenso-descenso del robot, de manera que al desplazarse, el cuerpo del robot se mantenga horizontal, y los actuadores del sistema, regulen el ascenso o descenso de las extremidades para mantenerlo así. Esto tendría que funcionar paralelamente al programa de control por eventos, para evitar incrementar el número de eventos del robot.

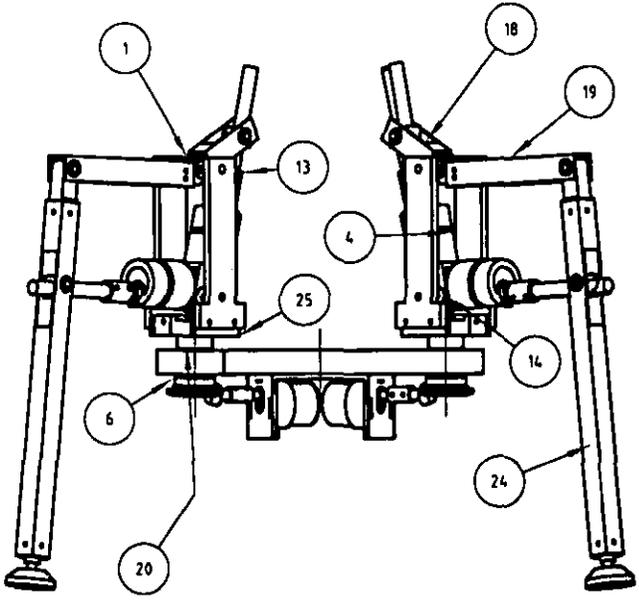
El sistema de control tiene la opción de mejorarse continuamente debido a que el modelo ya se tiene construido, y se pueden realizar un sin número de pruebas para experimentar con el robot, y aumentar la investigación en este tema.

6.5 CONCLUSIONES FINALES

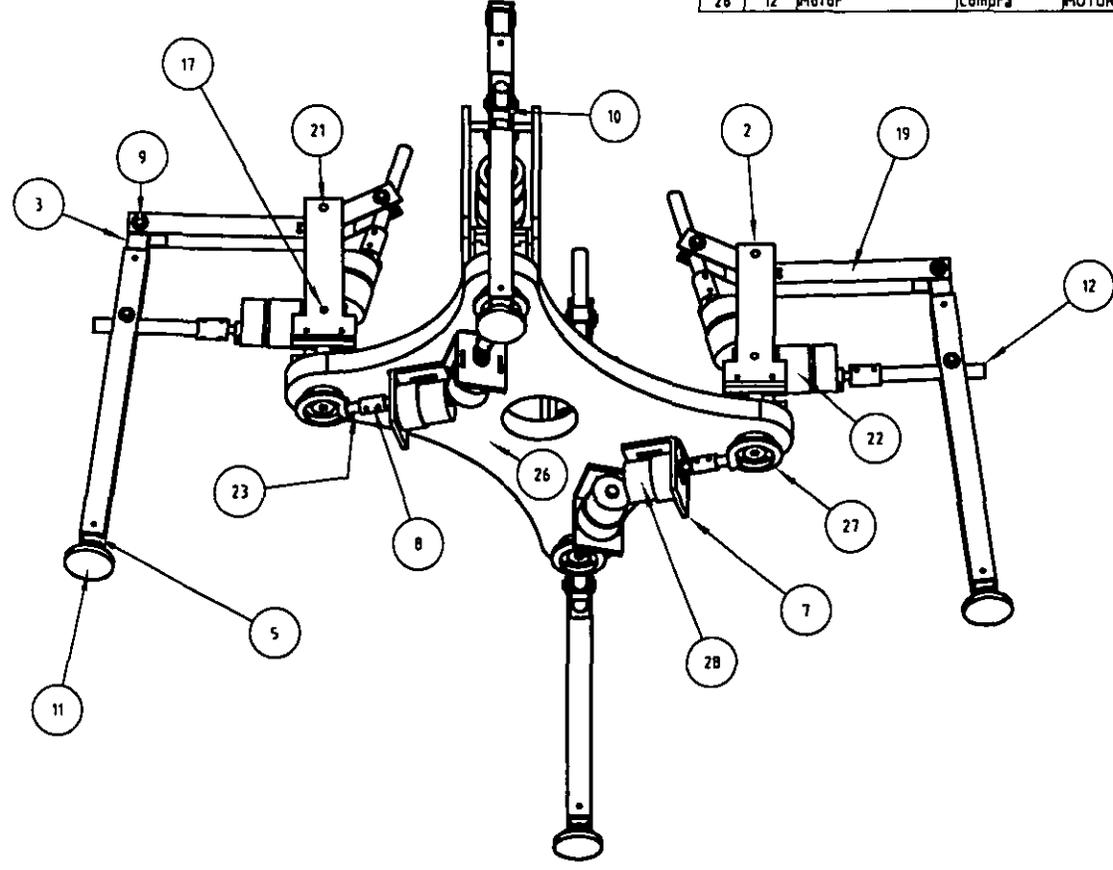
Al inicio del trabajo del tema de tesis se planteó el siguiente objetivo; conjuntar los conocimientos adquiridos para desarrollar un proyecto sinérgico que involucre e integre distintas ramas como son ingeniería mecánica, electrónica y de computación, esto motivo un conocimiento más profundo en el estudio de la robótica y de sus áreas afines. Se alcanzaron las siguientes metas; construir y diseñar un robot de desplazamiento discreto que satisfaga de una manera eficaz todos los requerimientos que debe tener una máquina caminante; y proporcionar un diseño que pueda ser base de otros proyectos, para su mejoramiento y perfección, para estimular la participación de nuevos estudiantes para futuros proyectos relacionados con este tipo de disciplinas.

APÉNDICE B
PLANOS DE CONJUNTO
Y DE DETALLE

1	2	3	4
PARTE N°		CANTIDAD	



Lista de Partes					
Parte	Canl	Descripción	Origen	Dibujo	Material
1	8	Eslabón 1, parte 2	Maquinado	ESL 2	Aluminio
2	8	Base, parte 2	Maquinado	BAS2	Aluminio
3	4	Eslabón 2, parte 2	Maquinado	PATA 2	Aluminio
4	4	Soporte, motor 1	Maquinado	SOP2	Aluminio
5	4	Eslabón 2, parte 4	Maquinado	PATA 4	Aluminio
6	4	Flecha	Maquinado	FLECHA2	Aluminio
7	4	Soporte, motor 3	Maquinado	SOPORTE4	Aluminio
8	4	Cople del piñon	Maquinado	SUJETA	Aluminio
9	32	Balero de 5 mm	Compra	BALERO2	Acero
10	8	Tuerca	Compra	TUERCA	Hierro
11	4	Eslabón 2, parte 3	Compra	PATA 3	Aluminio
12	8	Tornillo	Compra	TOR POT	Acero
13	8	Cople del tornillo	Maquinado	COPLE	Aluminio
14	12	Balero de 5 mm	Compra	BALERO	Acero
15	4	Balero de 12 mm	Compra	RDD	Acero
16	4	Eje 6 X 19 mm	Compra	PIVOTE2	Acero
17	4	Eje 5 X 62 mm	Compra	PIVOTE3	Acero
18	4	Eslabón 1, parte 3	Maquinado	ESL 3	Aluminio
19	4	Eslabón 1, parte 1	Maquinado	ESL1 1	Aluminio
20	4	Contra, flecha	Maquinado	BAS3	Aluminio
21	4	Eje 6 X 62 mm	Compra	PIVOTE	Acero
22	4	Soporte, motor 2	Maquinado	SOP1	Aluminio
23	4	Piñon	Compra	PINON	Acero
24	4	Eslabón 2, parte 1	Maquinado	PATA 1	Aluminio
25	4	Base, parte 1	Maquinado	BAS1	Aluminio
26	1	Cuerpo	Maquinado	CUERPOF	Nylamid
27	4	Rueda	Compra	CREMALLERA	Acero
28	12	Motor	Compra	MOTOR	

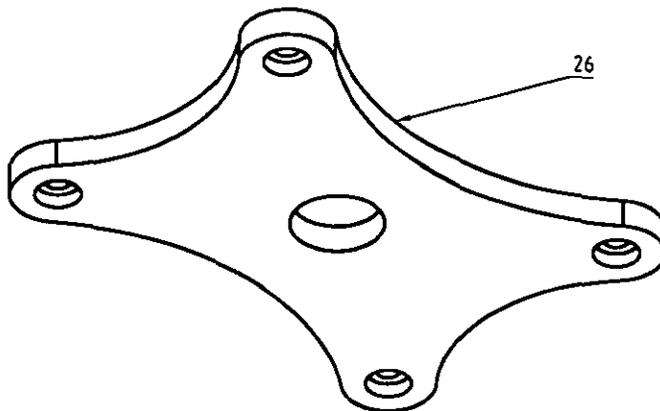
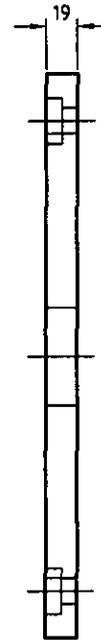
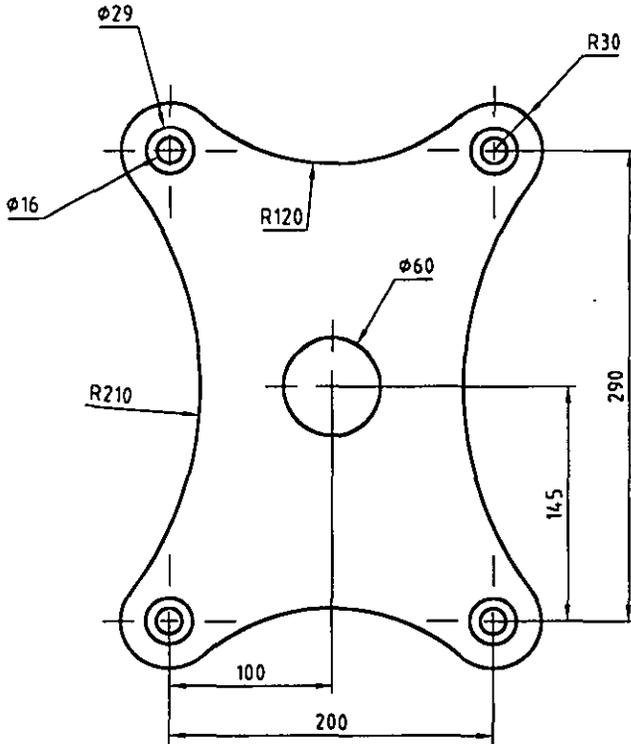
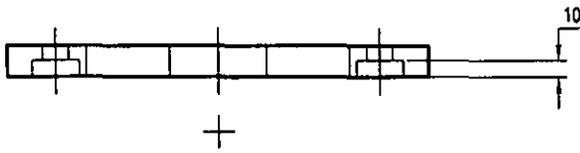


DIBUJO N°	0	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.		MATERIAL	
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV
				Archivo	FINAL.dwg
				FECHA	14/08/01
				ESCALA	



ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO			PLANO DE CONJUNTO		
Acotaciones	Tolerancias	HOJA		1/1	
mm					

1	2	3	4
PARTE N° 26		CANTIDAD 1	

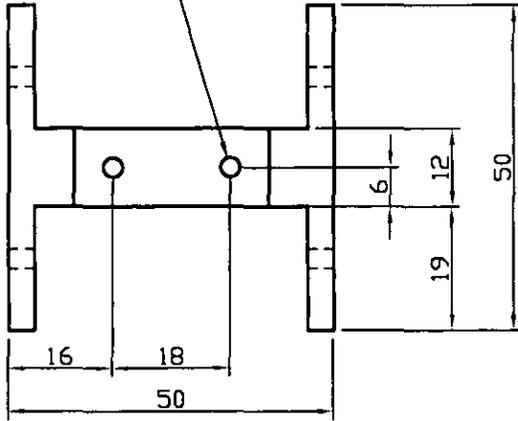


DIBUJO N° 1	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL NYLAMID	
Diseño ESM	Revisó MAHE	Aprobado por VJGV	Archivo body.dwg	FECHA 14/08/01	ESCALA
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO			CUERPO		
Acotaciones mm			Tolerancias		HOJA 1/1

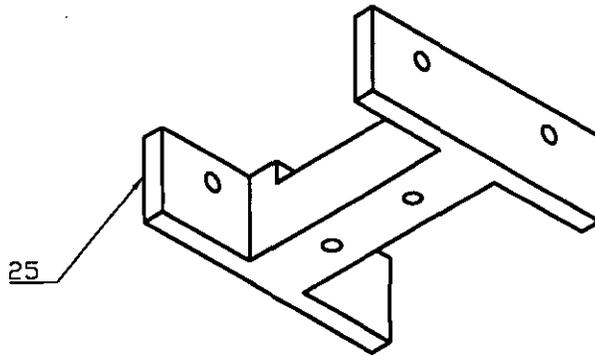
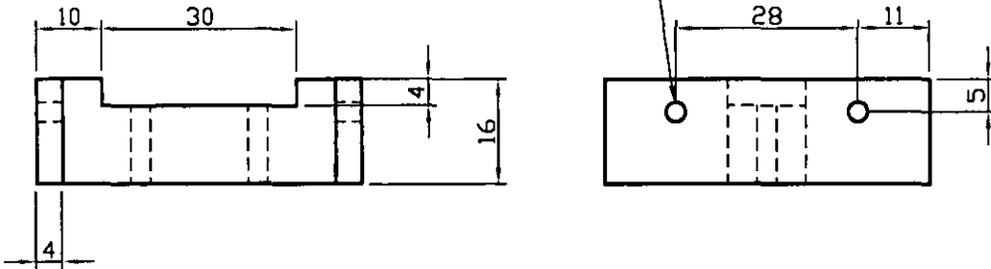


1	2	3	4
PARTE N°	25	CANTIDAD	4

Ø1/8" - 40UNC - 2B.

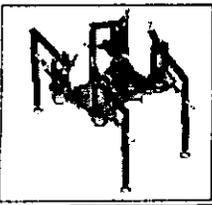
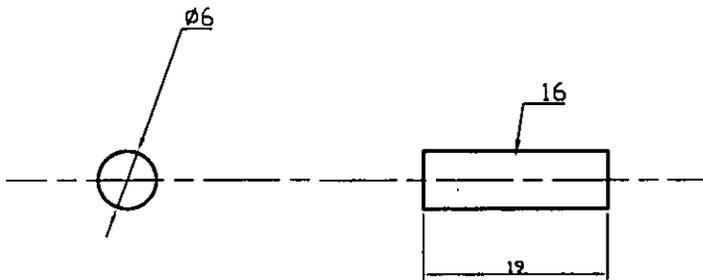
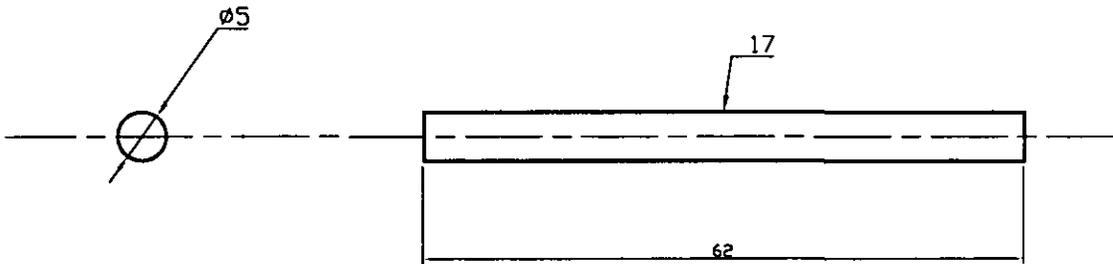
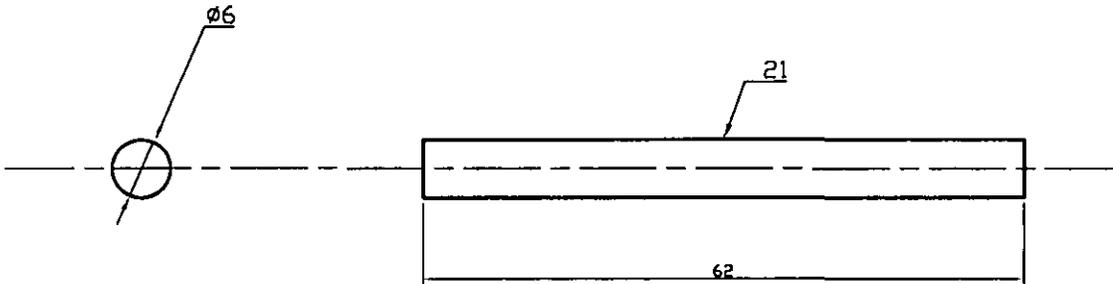


Ø1/8" - 40UNC - 2B.



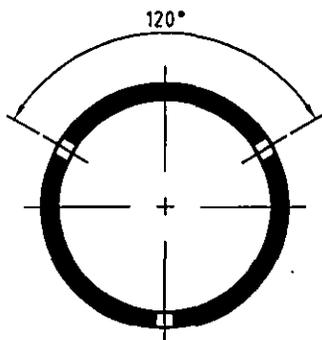
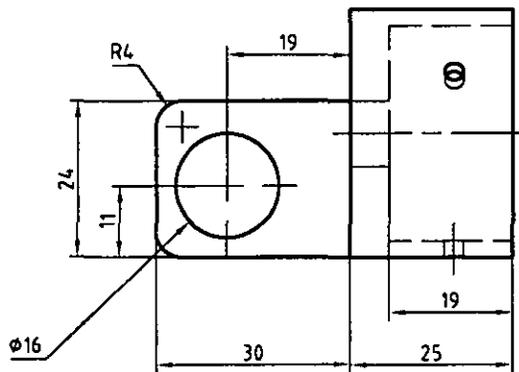
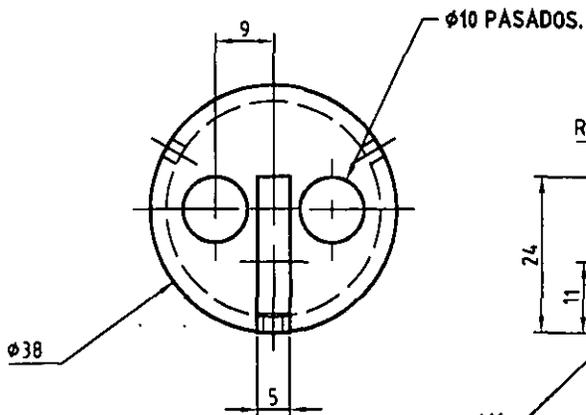
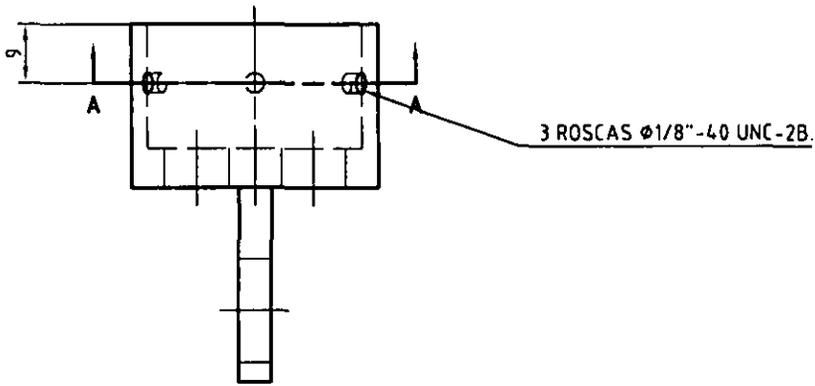
DIBUJO N° 3		DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL ALUMINIO	
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo bas1.dwg
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO				BASE, PARTE 1		
Acotaciones mm		Tolerancias				HOJA 1/2

1	2	3	4
PARTE N°	16, 17, 21	CANTIDAD	4 c/u

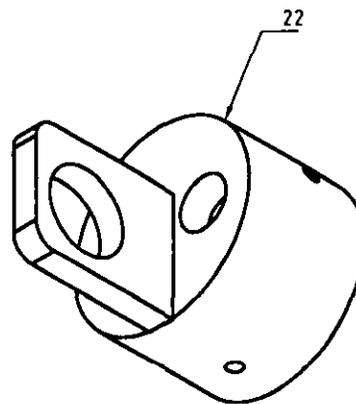


DIBUJO N°	4	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL	ACERO					
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo	pivotes.dwg	FECHA	17/01/01	ESCALA	
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO					EJES 15, 16, 28						
Acofataciones mm					Tolerancias				HOJA		1/1

1	2	3	4
PARTE N° 22		CANTIDAD 4	



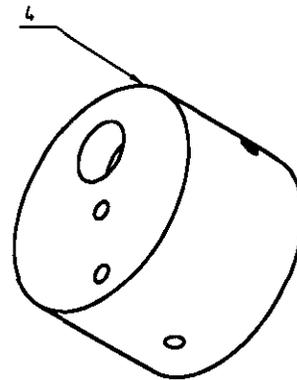
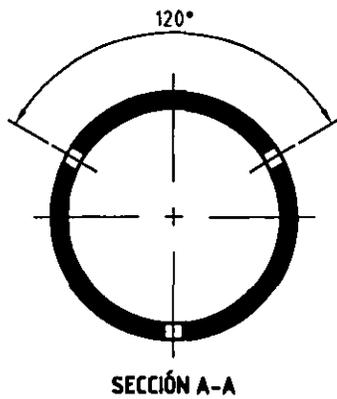
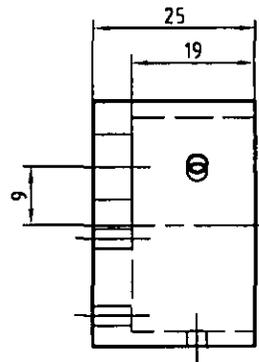
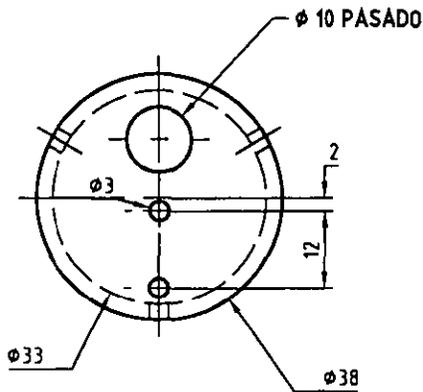
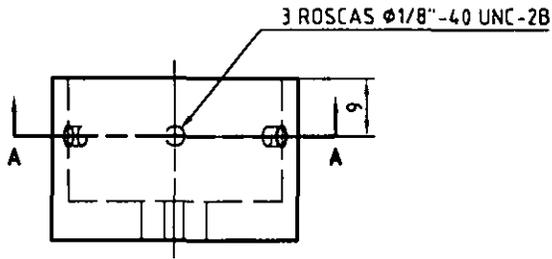
SECCIÓN A-A



DIBUJO N° 5		DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL ALUMINIO	
Diseño ESM	Revisó MAHE	Aprobado por VJGV	Archivo art1.dwg	FECHA 14/08/01	ESCALA	
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO			SOPORTE DEL MOTOR 2			
Anotaciones mm		Tolerancias		HOJA 1/1		

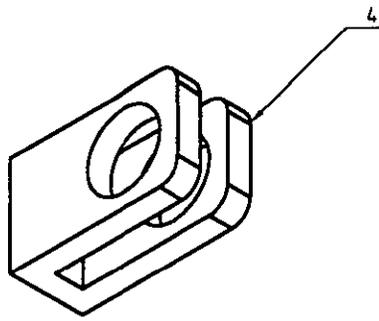
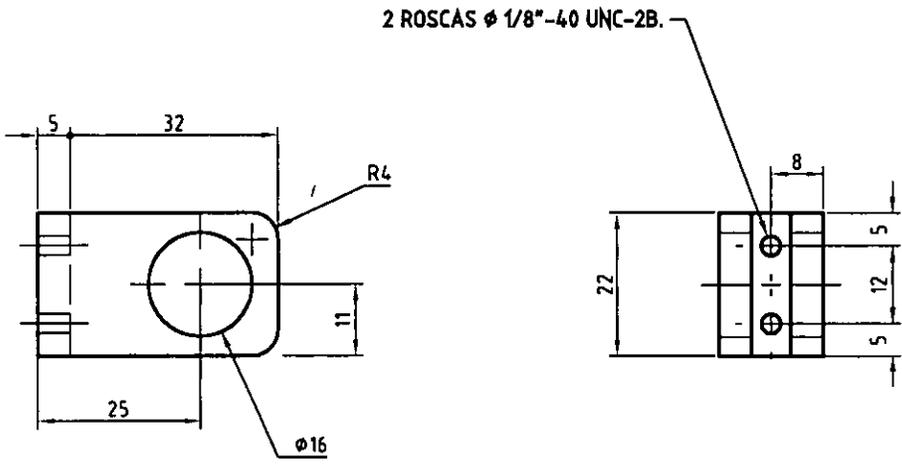
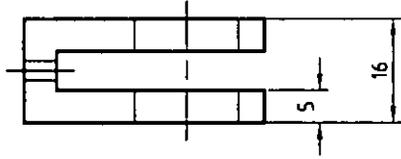


1	PARTE N° 4	3	4
	CANTIDAD 4		



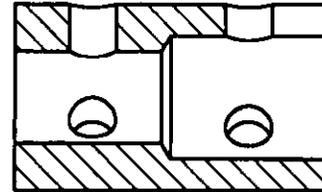
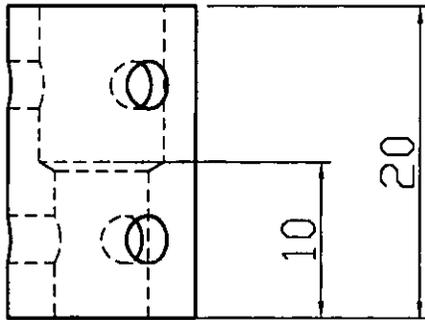
DIBUJO N° 6		DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL ALUMINIO	
Diseño ESM	Revisó MAHE	Aprobado por VJGV	Archivo art2_1.dwg	FECHA 14/08/01	ESCALA	
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO			SOPORTE DEL MOTOR 1, PARTE 1			
Acotaciones mm		Tolerancias		HOJA 1/2		

1	PARTE N°	2	CANTIDAD	3	4
---	----------	---	----------	---	---

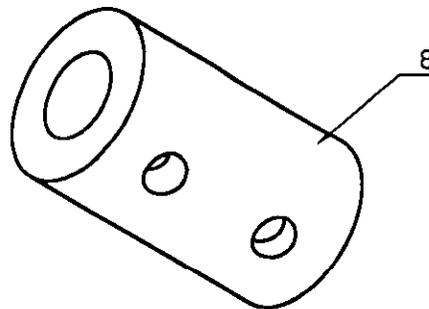
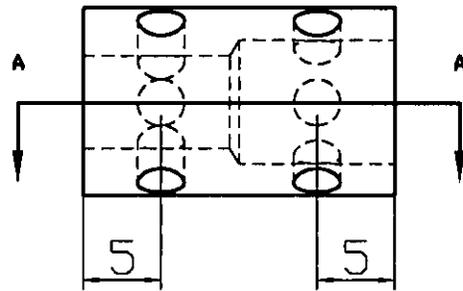
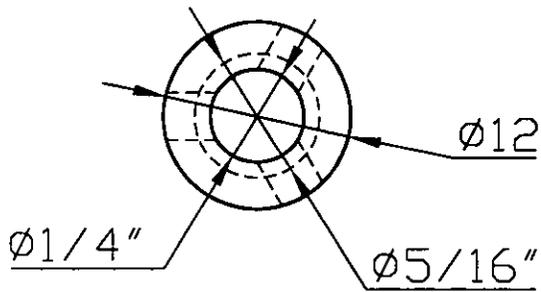


DIBUJO N° 6		DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL	ALUMINIO
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO		SOPORTE DEL MOTOR 1, PARTE 2		FECHA	14/08/01	ESCALA
Acolaciones mm		Tolerancias				HOJA
1		4				2/2

1	2	3	4
PARTE N°	8	CANTIDAD	4

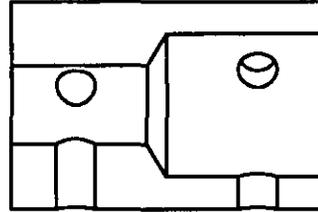
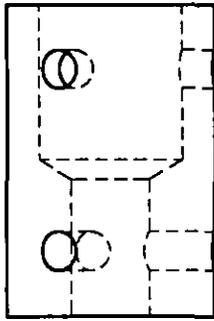


SECCION A-A

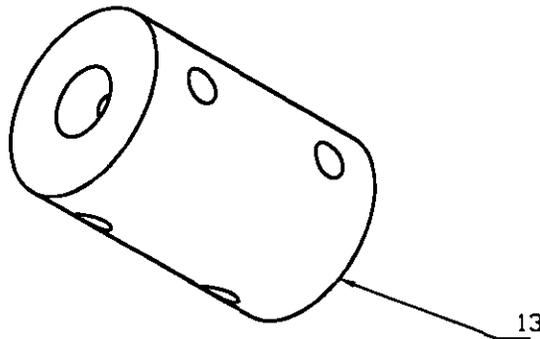
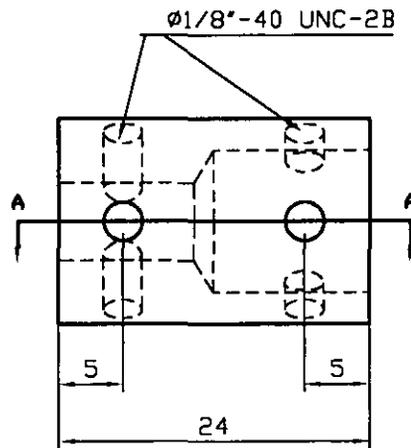
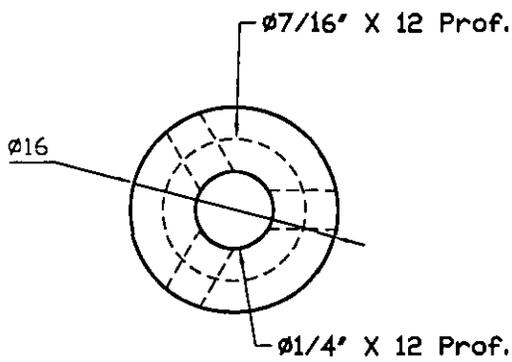


DIBUJO N°	8	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL	ALUMINIO				
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo sujeta.dwg	FECHA	17/01/01	ESCALA	
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO					COPLÉ DEL PIÑÓN.					
Acofaciones mm					Tolerancias				HOJA	1/1

1	2	3	4
PARTE N°	13	CANTIDAD	8



SECCIÓN A-A

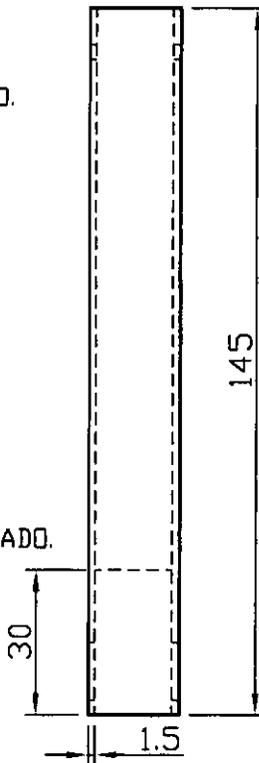
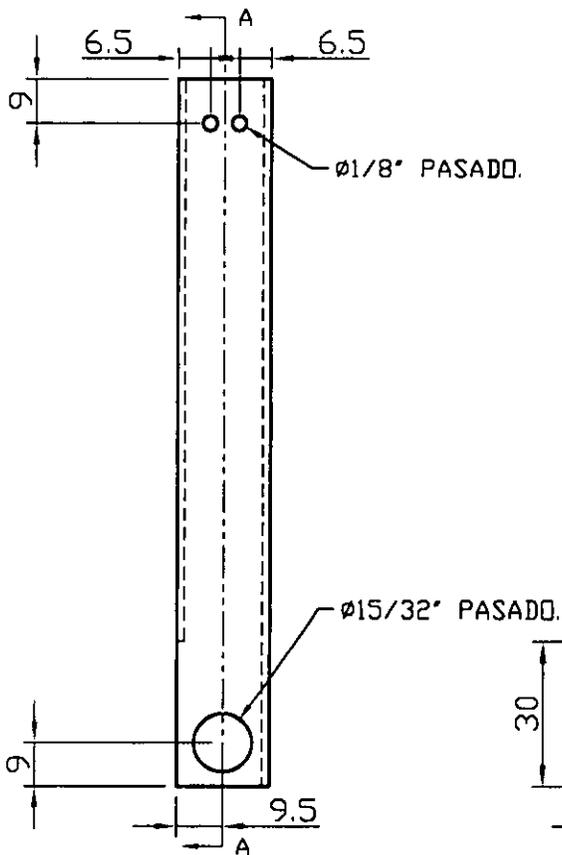
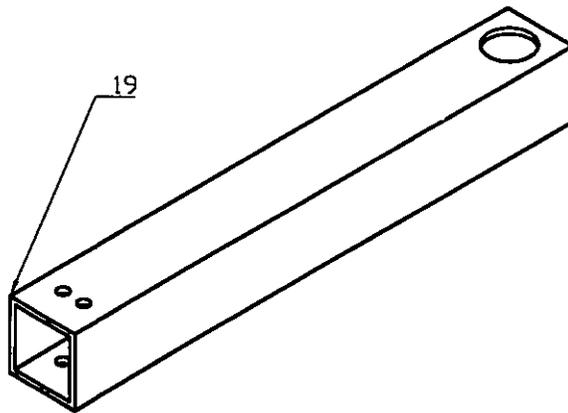
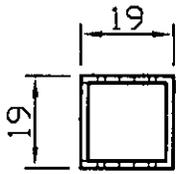


DIBUJO N° 9	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.	MATERIAL ALUMINIO
Diseño ESM	Revisó MAHE	Aprobado por VJGV
	Archivo cople.dwg	FECHA 14/08/01
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO		ESCALA
		HOJA 1/1
Anotaciones mm		Tolerancias



1	2	3	4
---	---	---	---

1	2	3	4
PARTE N°	19	CANTIDAD	4

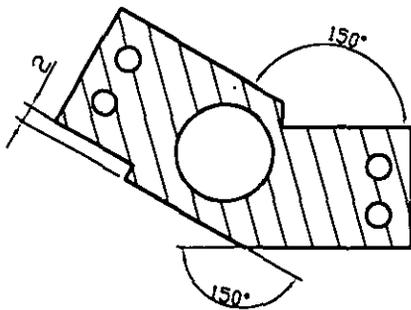
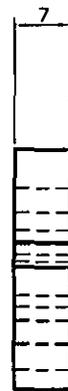
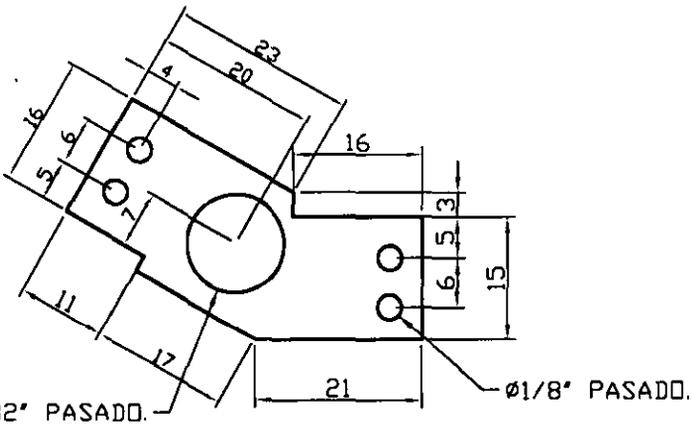
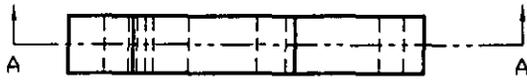


SECCIÓN A-A

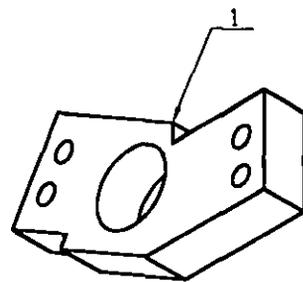


DIBUJO N°	10	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL	ALUMINIO
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo est1_1.dwg
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO				ESLABÓN 1, PARTE 1		
Acotaciones mm				Tolerancias		HOJA 1/3

1	2	3	4
PARTE N°	1	CANTIDAD	8



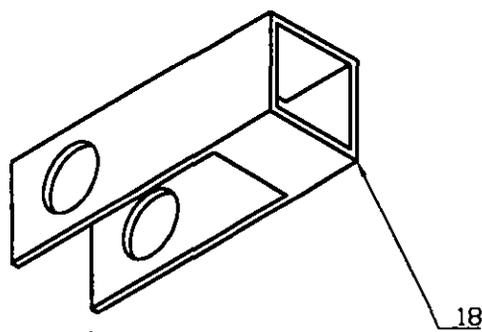
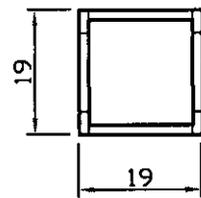
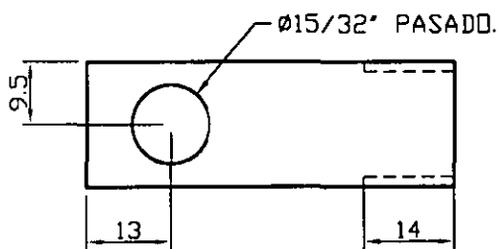
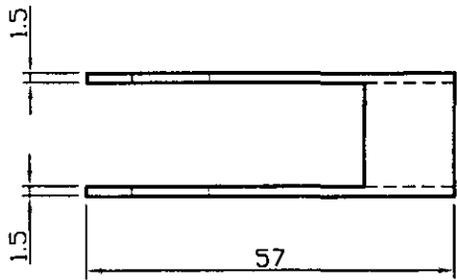
SECCIÓN A-A



DIBUJO N°	10	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL	ALUMINIO
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo est_2.dwg
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO				ESLABÓN 1, PARTE 2		
Acotaciones mm				Tolerancias		HOJA 2/3



1	2	3	4
PARTE N°	18	CANTIDAD	4



DIBUJO N°	10	DEPTO. DE MECATRÓNICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.			MATERIAL	ALUMINIO			
Diseño	ESM	Revisó	MAHE	Aprobado por	VJGV	Archivo esl_3.dwg	FECHA	18/01/01	ESCALA
ROBOT MÓVIL DE DESPLAZAMIENTO DISCRETO					ESLABÓN 1, PARTE 3				
Acoraciones mm					Tolerancias				HOJA
									3/3

1									
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4

APÉNDICE C

LISTADO DEL PROGRAMA DEL ANÁLISIS DE FUERZAS

PROGRAMA EN MATHEMATICA PARA OBTENER LAS FUERZAS EN LOS MOTORES 1 Y 2

```

d = .1;          "longitud del eslabón 1";
a = .14;        "longitud del eslabón 2";
b = .1;         "longitud del eslabón 3";
m = 0.05;       "longitud de la extensión del eslabón 2";
n = 0.1;        "longitud del eslabón 1";
l = .35;        "longitud del eslabón 3 y de su extensión";
R32 = 0.09115;  "long. del CG del eslabón 2 al eslabón 3";
R12 = 0.04885;  "long. del CG del eslabón 2 al eslabón 1";
R23 = 0.18288;  "long. del CG del eslabón 3 al eslabón 2";
R43 = 0.08288;  "long. del CG del eslabón 3 al eslabón 4";
R14 = 0.05795;  "long. del CG del eslabón 4 al eslabón 1";
R34 = 0.08205;  "long. del CG del eslabón 4 al eslabón 3";
Rp = 0.12712;   "long. del CG del eslabón 3 al pto. de apoyo P";
m2 = 0.06468;   "masa del eslabón 2";
m3 = 0.1574;    "masa del eslabón 3";
m4 = 0.1805;    "masa del eslabón 4";
Ig2 = 0.174983; "momento de inercia del eslabón 2";
Ig3 = 0.249490; "momento de inercia del eslabón 3";
Ig4 = 0.283563; "momento de inercia del eslabón 4";
Fpx = 10;        "fuerza normal contra el piso";
Fpy = 5;         "fuerza de fricción contra el piso";
y = 0.1;         "ángulo de avance del tornillo";
o = 0.005;       "radio medio del tornillo";
ñ = 0.1578;      "coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca";
tf = 3;          "tiempo de recorrido";
qf = 0.012;      "posición inicial del tornillo 1";
z = 0.012;
m = 0.053;
n = 0.1;
ListPlot[Table[
  h[q] := (qf (1 - 30/52) x (27 x (60/8) x (t/tf^3) - 81 x (180/16) x (t^2/tf^4) + 243 x (120/32) x (t^3/tf^5))) /; 0 < t < 1;
  h[q] := 0 /; 1 <= t < 2;
  h[q] :=
    (qf (1 - 30/52) x (27 x (60/8) x ((t - (1/3) tf)/tf^3) - 81 x (180/16) x ((t - (1/3) tf)^2/tf^4) +
      243 x (120/32) x ((t - (1/3) tf)^3/tf^5))) /; 2 <= t <= 3; "aceleración del tornillo 1";

```

$$g[q] := \left(qf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{30}{8} \right) \times \left(\frac{t^2}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{60}{16} \right) \times \left(\frac{t^3}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{30}{32} \right) \times \left(\frac{t^4}{tf^5} \right) \right) \right) // ; 0 \leq t < 1;$$

$$g[q] := 0.00478 // ; 1 \leq t < 2;$$

$$g[q] :=$$

$$\left(qf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{30}{8} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^2}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{60}{16} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^3}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{30}{32} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^4}{tf^5} \right) \right) \right) // ;$$

$2 \leq t \leq 3$; "velocidad del tornillo 1";

$$F[q] := \left(qf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{10}{8} \right) \times \left(\frac{t}{tf} \right)^3 - 81 \times \left(\frac{15}{16} \right) \times \left(\frac{t}{tf} \right)^4 + 243 \times \left(\frac{6}{32} \right) \times \left(\frac{t}{tf} \right)^5 \right) + 0.1247095 // ; 0 \leq t < 1;$$

$$F[q] := 0.00248 + 0.00478 \times \left(t - \frac{tf}{3} \right) + 0.1247095 // ; 1 \leq t < 2;$$

$$F[q] :=$$

$$\left(qf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{10}{8} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^3}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{15}{16} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^4}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{6}{32} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^5}{tf^5} \right) \right) \right) +$$

$0.00478 \left(\frac{1}{3} tf \right) + 0.1247095 // ; 2 \leq t \leq 3$; "posición del tornillo 1";

$$c[c] := \left(z \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{60}{8} \right) \times \left(\frac{t}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{180}{16} \right) \times \left(\frac{t^2}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{120}{32} \right) \times \left(\frac{t^3}{tf^5} \right) \right) // ; 0 \leq t < 1;$$

$$c[c] := 0 // ; 1 \leq t < 2;$$

$$c[c] :=$$

$$\left(z \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{60}{8} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{180}{16} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^2}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{120}{32} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^3}{tf^5} \right) \right) \right) // ;$$

$2 \leq t \leq 3$; "aceleración del tornillo 2";

$$v[c] := \left(z \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{30}{8} \right) \times \left(\frac{t^2}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{60}{16} \right) \times \left(\frac{t^3}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{30}{32} \right) \times \left(\frac{t^4}{tf^5} \right) \right) // ; 0 \leq t < 1;$$

$$v[c] := 0.00478 // ; 1 \leq t < 2;$$

$$v[c] :=$$

$$\left(z \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{30}{8} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^2}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{60}{16} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^3}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{30}{32} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^4}{tf^5} \right) \right) \right) // ;$$

$2 \leq t \leq 3$; "velocidad del tornillo 2";

$$p[c] := \left(z \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{10}{8} \right) \times \left(\frac{t}{tf} \right)^3 - 81 \times \left(\frac{15}{16} \right) \times \left(\frac{t}{tf} \right)^4 + 243 \times \left(\frac{6}{32} \right) \times \left(\frac{t}{tf} \right)^5 \right) + 0.165 // ; 0 \leq t < 1;$$

$$p[c] := 0.00248 + 0.00478 \times \left(t - \frac{tf}{3} \right) + 0.165 // ; 1 \leq t < 2;$$

$$p[c] :=$$

$$\left(z \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{10}{8} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^3}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{15}{16} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^4}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{6}{32} \right) \times \left(\frac{(t - (\frac{1}{3} tf))^5}{tf^5} \right) \right) \right) +$$

$0.00478 \left(\frac{1}{3} tf \right) + 0.165 // ; 2 \leq t \leq 3$;

"posición del tornillo 1";

$$\alpha = \left(\text{ArcCos} \left[\left(\frac{m^2 + n^2 - (f[q])^2}{2 \times m \times n} \right) \right] \right);$$

$$\text{alpha} = \left(\frac{\alpha \times 180}{3.1416} \right);$$

theta2 = 195 - alpha; "relación entre el ángulo theta2 y alfa";

$$\theta 2 = \left(\frac{\text{theta} 2 \times 3.1416}{180} \right);$$

$$b 1 = 2 \times a \times b \times \text{Cos}[\theta 2] - 2 \times b \times d;$$

$$b 2 = -(2 \times a \times b \times \text{Sin}[\theta 2]);$$

$$b 3 = d^2 + a^2 + b^2 - (p[c])^2 - 2 \times a \times d \times \text{Cos}[\theta 2];$$

$$\theta 3 = \left(\frac{b 2}{\text{Abs}[b 2]} \right) \left(\text{ArcSin} \left[\left(\frac{-b 3}{\sqrt{b 1^2 + b 2^2}} \right) \right] \right) - \text{ArcTan} \left[\left(\frac{b 1}{b 2} \right) \right]; \text{"obtención del valor de theta 3"};$$

$$\text{theta} 3 = \left(\frac{\theta 3 \times 180}{3.1416} \right);$$

$$b 1 1 = 2 \times d \times (p[c]) - 2 \times a \times (p[c]) \times \text{Cos}[\theta 2];$$

$$b 2 2 = -2 \times a \times (p[c]) \times \text{Sin}[\theta 2];$$

$$b 3 3 = d^2 + a^2 - b^2 + (p[c])^2 - 2 \times a \times d \times \text{Cos}[\theta 2];$$

$$\theta 4 = \left(\frac{b 2 2}{\text{Abs}[b 2 2]} \right) \left(\text{ArcSin} \left[\left(\frac{-b 3 3}{\sqrt{b 1 1^2 + b 2 2^2}} \right) \right] \right) - \text{ArcTan} \left[\left(\frac{b 1 1}{b 2 2} \right) \right]; \text{"obtención del valor de theta 4"};$$

$$\text{theta} 4 = \left(\frac{\theta 4 \times 180}{3.1416} \right);$$

$$\omega 2 = g[q] \times m;$$

$$\alpha 2 = h[g] \times m;$$

$$\omega 3 = \frac{a \times \omega 2 \times \text{Sin}[\theta 4 - \theta 2]}{b \times \text{Sin}[\theta 3 - \theta 4]} + \frac{v[c]}{b \times \text{Sin}[\theta 3 - \theta 4]};$$

$$\omega 4 = \frac{a \times \omega 2 \times \text{Sin}[\theta 2 - \theta 3]}{(p[c]) \times \text{Sin}[\theta 4 - \theta 3]} + \frac{v[c]}{(p[c]) \times \text{Tan}[\theta 4 - \theta 3]}; \text{"obtención de las velocidades angulares"};$$

$$u 1 = -a \times (\omega 2)^2 \times \text{Cos}[\theta 2] - a \times \alpha 2 \times \text{Sin}[\theta 2] - b \times (\omega 3)^2 \times \text{Cos}[\theta 3] - (r[c]) \times \text{Cos}[\theta 4] + (p[c]) \times (\omega 4)^2 \times \text{Cos}[\theta 4] + (v[c]) \times (\omega 4) \times \text{Sin}[\theta 4];$$

$$u 2 = -a \times (\omega 2)^2 \times \text{Sin}[\theta 2] + a \times \alpha 2 \times \text{Cos}[\theta 2] - b \times (\omega 3)^2 \times \text{Sin}[\theta 3] - (r[c]) \times \text{Sin}[\theta 4] + (p[c]) \times (\omega 4)^2 \times \text{Sin}[\theta 4] - (v[c]) \times (\omega 4) \times \text{Cos}[\theta 4];$$

$$\alpha 3 = \frac{u 1 + u 2}{b \times \text{Sin}[\theta 3 - \theta 4]};$$

$$\alpha 4 = \frac{u 1 + u 2}{(p[c]) \times \text{Sin}[\theta 3 - \theta 4]};$$

"obtención de las aceleraciones angulares";

$$R = \begin{pmatrix} R12 & R12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R32 & R32 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R23 & R23 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R43 & R43 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R34 & R34 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R14 & R14 \end{pmatrix};$$

$$Ang = \begin{pmatrix} \cos[\theta 2] & 0 \\ 0 & \sin[\theta 2] \\ \cos[\theta 3] & 0 \\ 0 & \sin[\theta 3] \\ \cos[\theta 4] & 0 \\ 0 & \sin[\theta 4] \end{pmatrix};$$

$$M = R \cdot Ang;$$

$$R_{px} = R_p \times \cos[\theta 3];$$

$$R_{py} = R_p \times \sin[\theta 3];$$

$$ag2x = M[1, 1] \times (\alpha 2 + (\omega 2)^2);$$

$$ag2y = M[1, 2] \times (\alpha 2 + (\omega 2)^2);$$

$$ag3x = M[3, 1] \times (\alpha 3 + (\omega 3)^2);$$

$$ag3y = M[3, 2] \times (\alpha 3 + (\omega 3)^2);$$

$$ag4x = M[6, 1] \times (\alpha 4 + (\omega 4)^2);$$

$$ag4y = M[6, 2] \times (\alpha 4 + (\omega 4)^2);$$

$$Dis = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -M[1, 2] & M[1, 1] & -M[2, 2] & M[2, 1] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M[3, 2] & -M[3, 1] & -M[4, 2] & M[4, 1] & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M[5, 2] & -M[5, 1] & -M[6, 2] & M[6, 1] & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$on = \begin{pmatrix} m2 \times ag2x \\ m2 \times ag2y \\ I_{g2} \times \alpha 2 \\ (m3 \times ag3x) - F_{px} \\ (m3 \times ag3y) - F_{py} \\ (I_{g3} \times \alpha 3) - (R_{px} \times F_{py}) + (R_{py} \times F_{px}) \\ m4 \times ag4x \\ m4 \times ag4y \\ I_{g4} \times \alpha 4 \end{pmatrix};$$

```

So = LinearSolve[Dis, Con]; "solución de la matriz de fuerzas";
i = So[[8, 1]];
F12 =  $\sqrt{\text{So}[[1, 1]]^2 + \text{So}[[2, 1]]^2}$ ; "fuerza del eslabón 2 sobre el 1";
F32 =  $\sqrt{\text{So}[[3, 1]]^2 + \text{So}[[4, 1]]^2}$ ; "fuerza del eslabón 2 sobre el 3";
F43 =  $\sqrt{\text{So}[[5, 1]]^2 + \text{So}[[6, 1]]^2}$ ; "fuerza del eslabón 3 sobre el 4";
F14 =  $\sqrt{\text{So}[[7, 1]]^2 + \text{So}[[8, 1]]^2}$ ;
"fuerza del eslabón 4 sobre el 1";
Par = So[[9, 1]];
FT1 =  $\left( \frac{2 \times f[q] \times \text{Par}}{m^2 + (f[q])^2 - n^2} \right)$ ; "Fuerza normal al tornillo 1";
j =  $\left( \frac{(\text{Sin}[\tilde{n}] + (y \times \text{Cos}[\tilde{n}]))}{(\text{Cos}[\tilde{n}] - (y \times \text{Sin}[\tilde{n}]))} \right)$ ;
Tol = FT1  $\times o \times \left( \frac{(\text{Sin}[\tilde{n}] + (y \times \text{Cos}[\tilde{n}]))}{(\text{Cos}[\tilde{n}] - (y \times \text{Sin}[\tilde{n}]))} \right) \times 100$ ; "Par sobre el tornillo 1";
To2 = F43  $\times o \times \left( \frac{(\text{Sin}[\tilde{n}] + (y \times \text{Cos}[\tilde{n}]))}{(\text{Cos}[\tilde{n}] - (y \times \text{Sin}[\tilde{n}]))} \right) \times 100$ ; "Par sobre el tornillo 2";
{t, Tol}, {t, 0, tf, 0.1}], PlotJoined -> True, Frame -> True,
TextStyle -> {FontSlant -> "Plain", FontFamily -> "Helvetica", FontSize -> 12, FontWeight -> "Bold",
FontColor -> GrayLevel[0.001]},
FrameLabel -> {"Tiempo [s]", "Par necesario en el motor 2 [N×cm]", "Gráfica 2", ""},
PlotStyle -> {Thickness[0.005], Hue[0.7]}, GridLines -> {Automatic, Automatic},
Background -> GrayLevel[0.95]

```

PROGRAMA EN MATHEMATICA PARA OBTENER LAS FUERZAS EN EL MOTOR 3

```

Ibod= 08.0;           "Momento de inercia del cuerpo";
pp= { .5, .6, .7};   "vector de posición del centro de gravedad de la extremidad";
pbod= { .7, .5, .4}; "vector de posición del centro de gravedad del cuerpo";
mp= 0.40258;         "masa de la extremidad";
Mbod= 10.38968;      "masa del cuerpo";
rpañ= 0.2;           "radio del piñon";
rrud= 1.2;           "radio de la rueda";
nf= 1.047;           "ángulo de giro final";
tf= 9;               "tiempo de giro";
q= 0.138;

```

```
ListPlot[Table[
```

$$f[Vw_] := \left(nf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{30}{8} \right) \times \left(\frac{t^2}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{60}{16} \right) \times \left(\frac{t^3}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{30}{32} \right) \times \left(\frac{t^4}{tf^5} \right) \right) \right) /; 0 \leq t < 3;$$

$$f[Vw_] := q /; 3 \leq t < 6;$$

```
f[Vw_] :=
```

$$\left(nf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{30}{8} \right) \times \left(\frac{\left(t - \left(\frac{1}{3} tf \right) \right)^2}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{60}{16} \right) \times \left(\frac{\left(t - \left(\frac{1}{3} tf \right) \right)^3}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{30}{32} \right) \times \left(\frac{\left(t - \left(\frac{1}{3} tf \right) \right)^4}{tf^5} \right) \right) \right) /; 6 \leq t \leq 9;$$

```
V= {0, 0, f[Vw]};    "perfil de velocidad angular";
```

$$p[Aan_] := \left(nf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{60}{8} \right) \times \left(\frac{t}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{180}{16} \right) \times \left(\frac{t^2}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{120}{32} \right) \times \left(\frac{t^3}{tf^5} \right) \right) \right) /; 0 \leq t < 3;$$

$$p[Aan_] := 0 /; 3 \leq t < 6;$$

```
p[Aan_] :=
```

$$\left(nf \left(1 - \frac{30}{52} \right) \times \left(27 \times \left(\frac{60}{8} \right) \times \left(\frac{\left(t - \left(\frac{1}{3} tf \right) \right)}{tf^3} \right) - 81 \times \left(\frac{180}{16} \right) \times \left(\frac{\left(t - \left(\frac{1}{3} tf \right) \right)^2}{tf^4} \right) + 243 \times \left(\frac{120}{32} \right) \times \left(\frac{\left(t - \left(\frac{1}{3} tf \right) \right)^3}{tf^5} \right) \right) \right) /; 6 \leq t \leq 9;$$

```
A= {0, 0, p[Aan]};   "perfil de aceleración angular";
```

```
op= Cross[op, V];    "velocidad del vector del CG de la extremidad";
```

```
obod= Cross[obod, V]; "velocidad del vector del CG del cuerpo";
```

```
Ho= (IbodxV) + (mpx(Cross[op, op]) + (Mbodx(Cross[obod, obod])));
```

```
"cantidad de momiviento angular en el punto O";
```

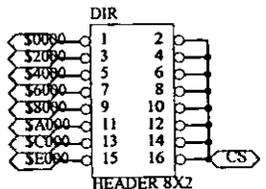
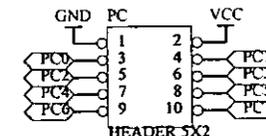
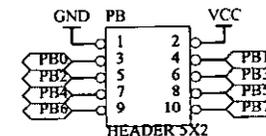
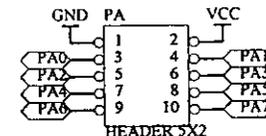
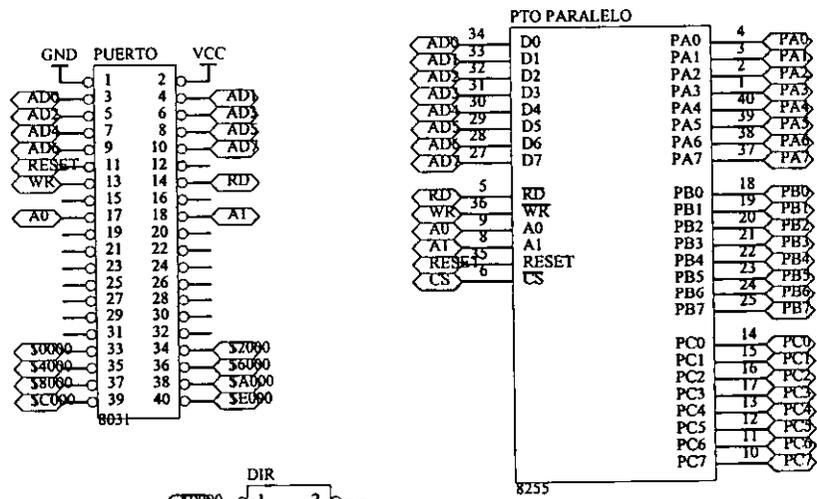
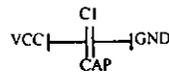
```
Mo= (Cross[V, Ho]) + (IbodxA);
```

```
"suma de momentos sobre el punto O";
```

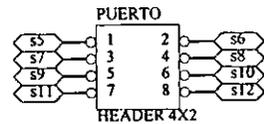
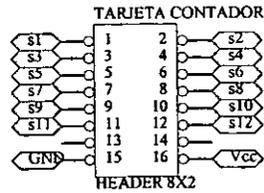
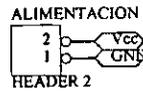
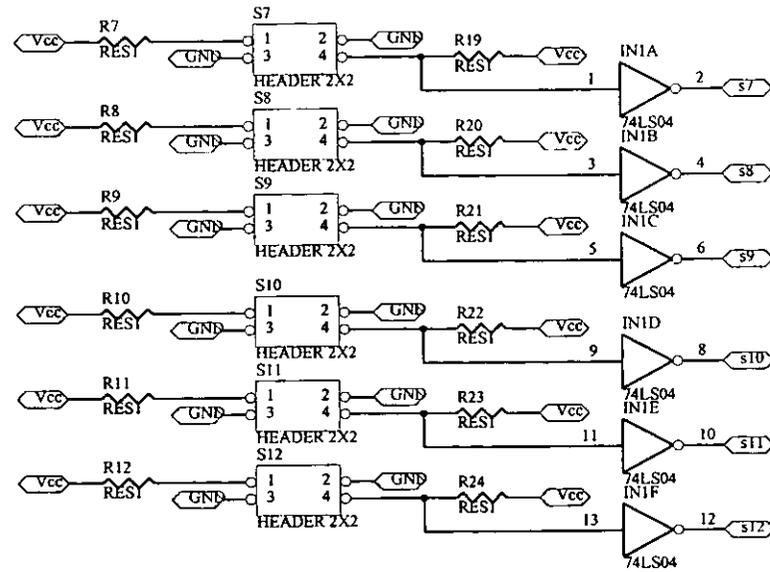
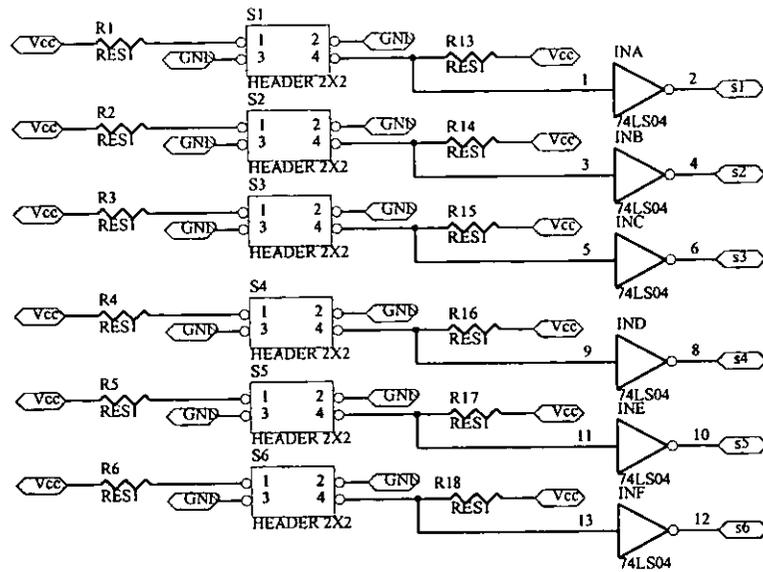
```
MatrixForm[Mb];  
x = (Ibod x A);  
To3 =  $\left(\frac{\text{rpm} \pi}{\text{rad}}$ ) x Mb[[3]] x 100; "par del motor 3";  
x = (Ibod x A);  
{t, To3}, {t, 0, 9, 0.1}], PlotJoined -> True, Frame -> True,  
TextStyle -> {FontSlant -> "Plain", FontFamily -> "Helvetica", FontSize -> 12, FontWeight -> "Bold",  
  FontColor -> GrayLevel[0.001]},  
FrameLabel -> {"Tiempo [s]", "Par del motor 3 [N x cm]", "Par en el giro de la extremidad", ""},  
GridLines -> {Automatic, Automatic}, PlotStyle -> {Thickness[0.005], Hue[0.68]},  
Background -> GrayLevel[0.95]
```

APÉNDICE D

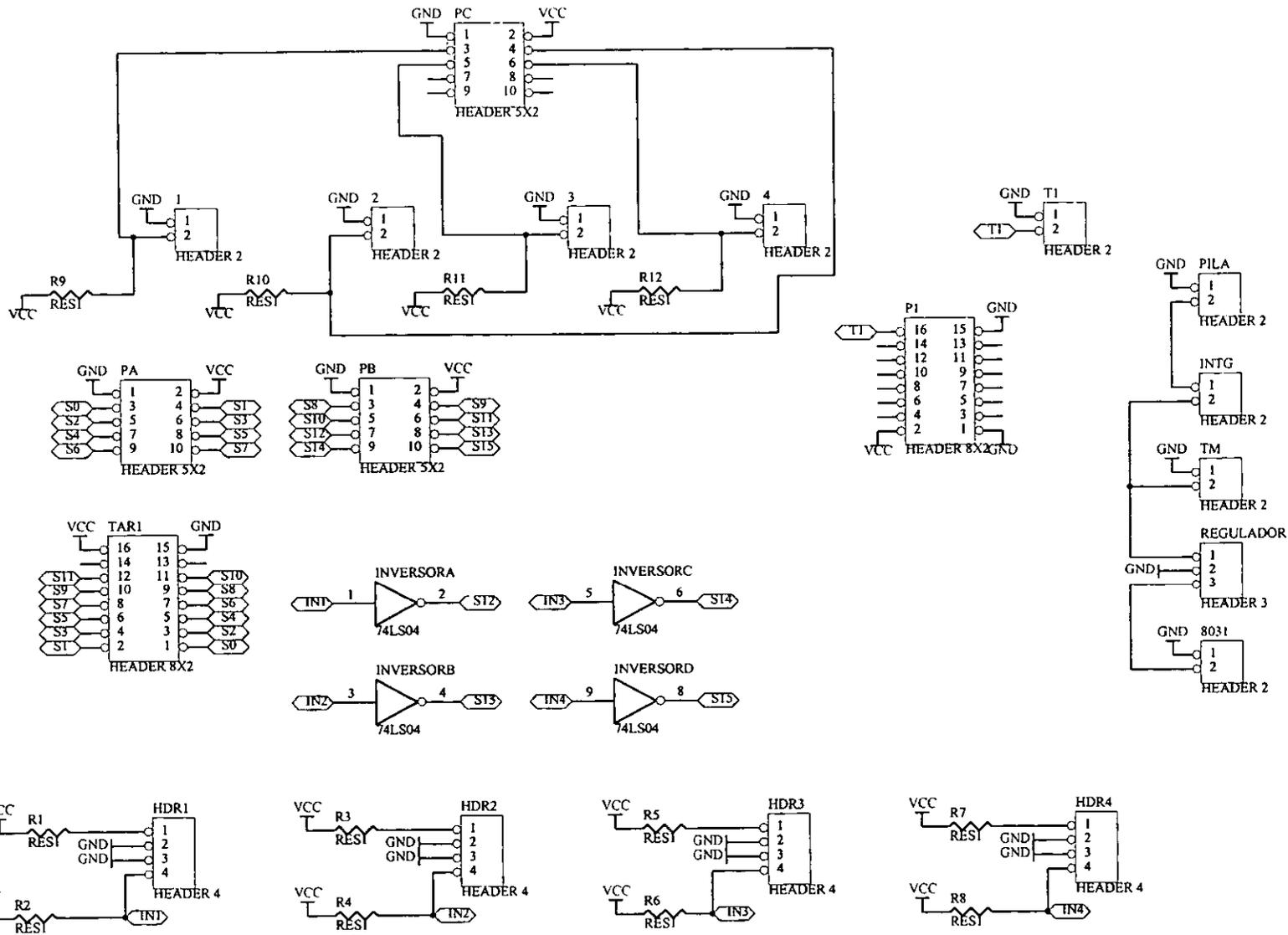
DIAGRAMAS ELECTRÓNICOS



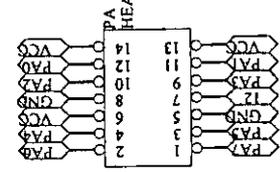
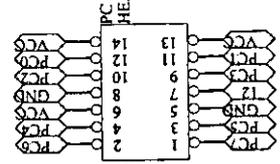
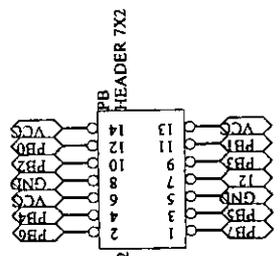
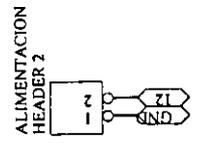
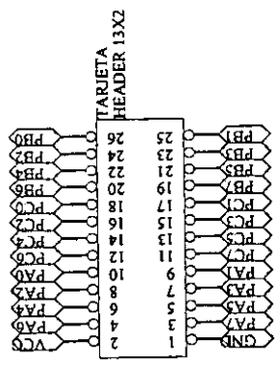
Title			
EXPANSIÓN DEL PUERTO PARALELO DEL 8031			
Size	Number	Revision	
Letter		ESM	
Date:	16-Oct-2001	Sheet of	
File:	WMEC3\UMARCO\electronica\8255	Drawn By:	MAHE



Title			TARJETA DE SENSORES 1		
Size	Number	Revision			
Letter		ESM			
Date:	16-Oct-2001	Sheet of			
File:	\\MEC3\CMARCO\electronica\SEN	Drawn by:	MAHE		



Title			TARJETA DE SENSORES 2		
Size	Number			Revision	ESM
Letter					
Date:	16-Oct-2001	Sheet of			
File:	WMEC3\CMARCO2\electronica\exp	Drawn By:	MAHE		



APÉNDICE E
LISTADO DEL PROGRAMA
DE CONTROL

Apéndice E: Programa de control

MOT1	EQU 30H		
MOT2	EQU 31H	HOME:	LCALL VALOR
MOT3	EQU 32H		LCALL SUMA
MOT4	EQU 33H	CICLO:	LCALL PUERTO A
MOT	EQU 38H		LCALL COMPARA
AUX	EQU 36H		MOV A,MOT
AUX1	EQU 37H		CJNE A,#00H,CICLO
			RET
	ORG 2000H	POSICION:	LCALL VALOR1
	LJMP 2040H		LCALL SUMA
		CICL:	LCALL PUERTO A
			LCALL COMPAR
	ORG 2040H		MOV A,MOT
	LCALL PAUSA		CJNE A,#00H,CICL
			RET
	MOV DPTR,#0E003H	PASO1:	LCALL VAL1
	MOV A,#80H		LCALL SUMA
	MOVX @DPTR,A	CIC:	LCALL PUERTO A
			LCALL COMP
	MOV DPTR,#06003H		MOV A,MOT
	MOV A,#9BH		CJNE A,#00H,CIC
	MOVX @DPTR,A		RET
		PASO2:	LCALL VAL2
	INICIO: LCALL HOME		LCALL SUMA
	LCALL STOP	CIC1:	LCALL PUERTO A
	LCALL POSICION		LCALL COM
	LCALL STOP		MOV A,MOT
REW:	LCALL SUBE1		CJNE A,#00H,CIC1
	LCALL STOP		RET
	LCALL PATA1	PASO3:	LCALL VAL3
	LCALL STOP		LCALL SUMA
	LCALL PASO1	CIC2:	LCALL PUERTO A
	LCALL STOP		LCALL CO
	LCALL BAJA1		MOV A,MOT
	LCALL STOP		CJNE A,#00H,CIC2
	LCALL SUBE4		RET
	LCALL STOP	PASO4:	LCALL VAL4
	LCALL PATA4		LCALL SUMA
	LCALL STOP	CIC3:	LCALL PUERTO A
	LCALL PASO2		LCALL COMPAR
	LCALL STOP		MOV A,MOT
	LCALL BAJA4		CJNE A,#00H,CIC3
	LCALL STOP		RET
	LCALL SUBE2	PATA1:	LCALL ASIG1
	LCALL STOP		LCALL SUMA
	LCALL PATA2	LOOP1:	LCALL PUERTO A
	LCALL STOP		LCALL CHK1
	LCALL PASO3		MOV A,MOT
	LCALL STOP		CJNE A,#00H,LOOP1
	LCALL BAJA2		RET
	LCALL STOP		
	LCALL SUBE3	PATA2:	LCALL ASIG3
	LCALL STOP		LCALL SUMA
	LCALL PATA3	LOOP2:	LCALL PUERTO A
	LCALL STOP		LCALL CHK3
	LCALL PASO4		MOV A,MOT
	LCALL STOP		CJNE A,#00H,LOOP2
	LCALL BAJA3		RET
	LCALL STOP		
	LJMP REW		

Apéndice E: Programa de control

PATA3:	LCALL ASIG4 LCALL SUMA	COMPAR3:	LCALL SUMA MOV A,AUX1 JB ACC.5,RETURN MOV MOT4,#00H LCALL SUMA RET
LOOP3:	LCALL PUERTO A LCALL CHK4 MOV A,MOT CJNE A,#00H,LOOP3 RET	COMP:	MOV DPTR,#06000H MOVX A,@DPTR MOV AUX,A JB ACC.0,COMP1 MOV MOT1,#00H LCALL SUMA
PATA4:	LCALL ASIG2 LCALL SUMA	COMP1:	MOV A,AUX JB ACC.6,COMP2 MOV MOT2,#00H LCALL SUMA
LOOP4:	LCALL PUERTO A LCALL CHK2 MOV A,MOT CJNE A,#00H,LOOP4 RET	COMP2:	MOV DPTR,#06001H MOVX A,@DPTR MOV AUX1,A JB ACC.2,COMP3 MOV MOT3,#00H LCALL SUMA
PUERTO A:	MOV DPTR,#0E000H MOV A,MOT MOVX @DPTR,A RET	COMP3:	MOV A,AUX1 JB ACC.4,RETURN MOV MOT4,#00H LCALL SUMA RET
COMPARA:	MOV DPTR,#06000H MOVX A,@DPTR MOV AUX,A JB ACC.3,COMPARA1 MOV MOT1,#00H LCALL SUMA	COM:	MOV DPTR,#06000H MOVX A,@DPTR MOV AUX,A JB ACC.1,COM1 MOV MOT1,#00H LCALL SUMA
COMPARA1:	MOV A,AUX JB ACC.7,COMPARA2 MOV MOT2,#00H LCALL SUMA	COM1:	MOV A,AUX JB ACC.7,COM2 MOV MOT2,#00H LCALL SUMA
COMPARA2:	MOV DPTR,#06001H MOVX A,@DPTR MOV AUX1,A JB ACC.3,COMPARA3 MOV MOT3,#00H LCALL SUMA COMPARA3: MOV A,AUX1 JB ACC.7,RETURN MOV MOT4,#00H LCALL SUMA RET	COM2:	MOV DPTR,#06001H MOVX A,@DPTR MOV AUX1,A JB ACC.1,COM3 MOV MOT3,#00H LCALL SUMA
RETURN:	RET	COM3:	MOV A,AUX1 JB ACC.7,RETURN1 MOV MOT4,#00H LCALL SUMA RET
COMPAR:	MOV DPTR,#06000H MOVX A,@DPTR MOV AUX,A JB ACC.3,COMPAR1 MOV MOT1,#00H LCALL SUMA	RETURN1:	RET
COMPAR1:	MOV A,AUX JB ACC.5,COMPAR2 MOV MOT2,#00H LCALL SUMA	CO:	MOV DPTR,#06000H MOVX A,@DPTR MOV AUX,A JB ACC.2,CO1 MOV MOT1,#00H LCALL SUMA
COMPAR2:	MOV DPTR,#06001H MOVX A,@DPTR MOV AUX1,A JB ACC.3,COMPAR3 MOV MOT3,#00H	CO1:	MOV A,AUX

Apéndice E: Programa de control

	JB ACC.4,CO2		LCALL PAUSAL
	MOV MOT2,#00H		RET
	LCALL SUMA		
CO2:	MOV DPTR,#06001H	SUBE3:	MOV DPTR,#0E001H
	MOVX A,@DPTR		MOV A,#08H
	MOV AUX1,A		MOVX @DPTR,A
	JB ACC.0,CO3		LCALL PAUSAL
	MOV MOT3,#00H		RET
	LCALL SUMA		
CO3:	MOV A,AUX1	SUBE4:	MOV DPTR,#0E001H
	JB ACC.6,RETURN1		MOV A,#01H
	MOV MOT4,#00H		MOVX @DPTR,A
	LCALL SUMA		LCALL PAUSAL
	RET		RET
VALOR:	MOV MOT1,#40H	BAJA1:	MOV DPTR,#06002H
	MOV MOT2,#10H		MOVX A,@DPTR
	MOV MOT3,#04H		JB ACC.0,BAJ1
	MOV MOT4,#01H		RET
	RET	BAJ1:	MOV DPTR,#0E001H
			MOV A,#040H
VALOR1:	MOV MOT1,#00H		MOVX @DPTR,A
	MOV MOT2,#20H		LJMP BAJA1
	MOV MOT3,#00H		
	MOV MOT4,#02H	BAJA2:	MOV DPTR,#06002H
	RET		MOVX A,@DPTR
			JB ACC.1,BAJ2
VAL1:	MOV MOT1,#00H		RET
	MOV MOT2,#10H	BAJ2:	MOV DPTR,#0E001H
	MOV MOT3,#08H		MOV A,#020H
	MOV MOT4,#02H		MOVX @DPTR,A
	RET		LJMP BAJA2
VAL2:	MOV MOT1,#40H	BAJA3:	MOV DPTR,#06002H
	MOV MOT2,#10H		MOVX A,@DPTR
	MOV MOT3,#08H		JB ACC.2,BAJ3
	MOV MOT4,#00H		RET
	RET	BAJ3:	MOV DPTR,#0E001H
			MOV A,#04H
VAL3:	MOV MOT1,#40H		MOVX @DPTR,A
	MOV MOT2,#00H		LJMP BAJA3
	MOV MOT3,#08H		
	MOV MOT4,#02H	BAJA4:	MOV DPTR,#06002H
	RET		MOVX A,@DPTR
			JB ACC.3,BAJ4
VAL4:	MOV MOT1,#40H		RET
	MOV MOT2,#10H	BAJ4:	MOV DPTR,#0E001H
	MOV MOT3,#00H		MOV A,#02H
	MOV MOT4,#02H		MOVX @DPTR,A
	RET		LJMP BAJA4
SUBE1:	MOV DPTR,#0E001H	ASIG1:	MOV MOT1,#80H
	MOV A,#080H		MOV MOT2,#00H
	MOVX @DPTR,A		MOV MOT3,#00H
	LCALL PAUSAL		MOV MOT4,#00H
	RET		RET
SUBE2:	MOV DPTR,#0E001H	ASIG2:	MOV MOT1,#00H
	MOV A,#010H		MOV MOT2,#00H
	MOVX @DPTR,A		MOV MOT3,#00H

Apéndice E: Programa de control

```

MOV MOT4,#01H
RET
ASIG3:  MOV MOT1,#00H
        MOV MOT2,#20H
        MOV MOT3,#00H
        MOV MOT4,#00H
        RET
ASIG4:  MOV MOT1,#00H
        MOV MOT2,#00H
        MOV MOT3,#04H
        MOV MOT4,#00H
        RET
CHK1:   MOV DPTR,#06000H
        MOVX A,@DPTR
        MOV AUX,A
        JB ACC.0,REGRE
        MOV MOT1,#00H
        LCALL SUMA
        RET
CHK2:   MOV DPTR,#06001H
        MOVX A,@DPTR
        MOV AUX1,A
        JB ACC.7,REGRE
        MOV MOT4,#00H
        LCALL SUMA
        RET
CHK3:   MOV DPTR,#06000H
        MOVX A,@DPTR
        MOV AUX,A
        JB ACC.4,REGRE
        MOV MOT2,#00H
        LCALL SUMA
        RET
CHK4:   MOV DPTR,#06001H
        MOVX A,@DPTR
        MOV AUX1,A
        JB ACC.3,REGRE
        MOV MOT3,#00H
        LCALL SUMA
        RET
REGRE:  RET
SUMA:   MOV A,MOT1
        ADD A,MOT2
        ADD A,MOT3
        ADD A,MOT4
        MOV MOT,A
        RET
STOP:   MOV DPTR,#0E001H
        MOV A,#00H
        MOVX @DPTR,A
        MOV DPTR,#0E000H
        MOV A,#00H
        MOVX @DPTR,A
        RET
        END 0000H

```