



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

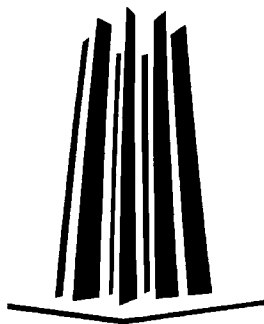
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN
SISTEMA ROBÓTICO TIPO
HEXÁPODO DESDE UN PUNTO DE
VISTA MECATRÓNICO.”**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO
P R E S E N T A
VÍCTOR ALAÍN PÉREZ SALAZAR.**

ASESOR DE TESIS: ING. JOSÉ MANUEL RAMÍREZ MORA.

F. E. S. A R A G Ó N, 2 0 0 9





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

DEDICATORIAS.

A mis padres Víctor María Pérez Pérez y Silvia Salazar Contreras

Quienes con su ejemplo y dedicación me han enseñado la importancia de la preparación, la constancia y el esfuerzo para la realización de una vida prospera. Por su paciencia para esperar este momento y su apoyo incondicional durante toda la vida.

A mi esposa Varinia Rentería Ayala que tanto quiero y que tanta paciencia me tiene; que este sea un ejemplo de lo grande y fuertes que podemos llegar a ser estando juntos.

A mi hija Geraldine Sareth Pérez Rentaría, que me demuestra día a día que la vida es hermosa, con su sonrisa, alegría e inocencia me motiva para ser mejor cada día.

A mi hijo, por demostrarme que siguen existiendo los milagros y enseñarme que siempre hay una esperanza para un mejor futuro.

A mi hermano Mario Iván Pérez Salazar, por su eterna amistad, fortaleza y entusiasmo. Por los grandes y maravillosos momentos que hemos vivido juntos.

A todos los maestros, profesores e ingenieros que contribuyeron a mi preparación especialmente al Ing. José Manuel Ramírez Mora, Luis Flores y Francisco Raúl.

Gracias.

INDICE

OBJETIVO	
INTRODUCCIÓN	I
CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES.	1
1.1 Reseña Histórica	1
1.2 Características de un robot	7
1.2.1 Definición de robot	13
1.2.2 Sistemas que conforman un robot	15
CAPITULO 2: ROBOTS MOVILES	25
2.1 Introducción.	25
2.2 Características de los caminantes	26
2.2.1 Secuencia de pisadas	27
2.2.2 Estabilidad estática	29
2.2.3 Marcha	30
CAPITULO 3: DISEÑO Y ANÁLISIS DE POSICIÓN, CINEMÁTICO Y DINAMICO.	38
3.1 Introducción.	38
3.2 Diseño conceptual	39
3.3 Descripción de las extremidades	41
3.3.1 Propuesta del mecanismo	41
3.4 Descripción del cuerpo	44
3.5 Transmisión de potencia	44
3.6 Estabilidad Estática	45
3.7 Modelo Dinámico	47
3.7.1 Ecuaciones de movimiento de Lagrange	50
3.7.2 Modelado dinámico de robots	51
3.7.3 Modelado dinámico de robots con accionadores	53
CAPITULO 4: COMPONENTES ELECTRÓNICOS, CONTROL Y PROGRAMACIÓN	56
4.1 Introducción	56
4.2 Principios generales de diseño PCB	60
4.2.1 Compatibilidad electromagnética y diafonía	62
4.3 Sistema de decisión	63
4.4 Sistema de sensado	71
4.5 Electrónica de potencia	80
4.6 Fuente de poder	84
4.7 Control de la secuencia de caminado	86
4.8 Programación	87
CONCLUSIONES	100
BIBLIOGRAFIA	102
APENDICES	EN DISCO COMPACTO

INTRODUCCIÓN.

Los robots han logrado captar la atención del mundo cuando se han aplicado a accidentes nucleares, localización de naufragios, exploración de volcanes y viajes espaciales. Están cambiando la forma en la que construimos, mantenemos la seguridad, producimos y distribuimos energía y alimentos al mundo. Se han convertido en herramientas para producir, trabajar y realizar labores peligrosas en la Tierra y fuera de ella. Los robots están expandiendo los límites de la experiencia humana.

La robótica está experimentando un crecimiento explosivo en los últimos cincuenta años propulsado por los avances en computación, sensores, electrónica y software, contando hoy en día con una amplia gama de máquinas inteligentes, hábiles y precisas que trabajan para el hombre. Los robots están ya en la antesala de revolucionar los procedimientos que se emplean en la agricultura, la minería, el transporte, la educación y hasta nuestra vida cotidiana, atrayendo no solo nuestra imaginación sino también nuestros mercados.

El término robot se acuña en los años veinte del pasado siglo, naciendo la robótica industrial en los años cincuenta, en la cual se trata fundamentalmente de dotar de flexibilidad a los procesos productivos manteniendo al mismo tiempo la productividad que se consigue con una máquina automática especializada. Siendo de ésta manera los robots un símbolo de un alto nivel de industrialización de una sociedad. En su gran mayoría estos robots se conciben como brazos manipuladores. Cabe mencionar que la finalidad de estos robots es mejorar la producción, reducir costos y mejorar la calidad de la manufactura de los productos, y no el despido masivo de trabajadores como se piensa comúnmente.

Otro sector de creciente importancia en las aplicaciones de la robótica es el de los robots de servicios, entre los cuales se incluyen los robots domésticos, robots de ayuda a los discapacitados y robots asistentes en general. Este sector también denominado de robots móviles que se diferencia de los robots industriales por no encontrarse anclados, sino que poseen la libertad de desplazarse por el terreno, por el agua e incluso volar.

Los robots son máquinas en las que se integran sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos, de comunicaciones e informáticos para su control en tiempo real, percepción del entorno y programación. Por ende se consideran también como sistemas mecatrónicos.

Siendo la Mecatrónica la disciplina que integra en un solo ramo los sistemas de control basados en microprocesadores, los sistemas eléctricos, los sistemas electrónicos, los sistemas de comunicaciones, los sistemas mecánicos y los sistemas de informática cuyos propósitos son proporcionar mejores productos, procesos y sistemas.

INTRODUCCIÓN.

La palabra Mecatrónica quizás nos suene extraña y ajena a la mayoría, lo cierto es que sus avances han impactado a muchas de las actividades humanas; por ejemplo un gran número de dispositivos y equipos en nuestros hogares como cafeteras, lavadoras, hornos de microondas, equipos de sonido, teléfonos celulares, alarmas y los tableros de los automóviles están integrados con chips o microprocesadores que interpretan la información y les permite funcionar autónomamente. En las oficinas hay fotocopiadoras e impresoras que activan comandos para su programación y fácil manejo con sólo oprimir algunos botones. El sector productivo opera complejos sistemas de manufactura flexible y robots en las industrias automotriz, química, farmacéutica, aeronáutica, nuclear, entre otras. En estos dispositivos y equipos hay una interacción de los sistemas mecánicos de precisión con los de control electrónico y la información computarizada, a esta dinámica se le conoce como Ingeniería Mecatrónica.

Japón destaca a nivel internacional por sus múltiples avances en el campo de las ciencias de materiales, robótica, ingeniería electrónica, metalúrgica, sísmica entre otras. Y han sido ellos (japoneses) quienes dan a conocer el concepto de Mecatrónica en el año de 1969 bajo la marca registrada de *Mechatronics* perteneciente a *Yaskawa Electric Corporation* quienes en 1982 deciden liberar el uso del concepto Mecatrónica a nivel internacional.

Por tanto la Mecatrónica se considera como la unión sinérgica de varias disciplinas siendo sus pilares fundamentales la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica – electrónica y la ingeniería en sistemas informáticos; teniendo a su alcance varias ramas de importancia tales como el control, control de procesos, etc.

La tesis consta de cinco capítulos y 5 apéndices que contienen los diagramas y técnicas propuestas a seguir en la construcción del sistema, así como los listados de programación propuestos para su control y hojas de datos de los dispositivos propuestos.

Los capítulos 1 y 2 son de carácter introductorio donde se abordan los datos históricos más sobresalientes, así como definiciones, sistemas constituyentes y algunas clasificaciones.

El capítulo 3 se divide en dos partes: la primera donde se presentan las generalidades y criterios que intervienen en el diseño de la máquina caminante, descripción y metodología para llevar a cabo el diseño del prototipo.

La segunda se aborda en 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.

INTRODUCCIÓN.

El capítulo 4 muestra el diseño de los sistemas de control así como los software`s requeridos para poder programarlos, dando un especial cuidado a las características de los dispositivos propuestos.

El capítulo 5 muestra las conclusiones generadas a lo largo del diseño del prototipo, de manera separada por sistema, y presenta al final un cuadro de conclusiones generales.

I.1 RESEÑA HISTÓRICA.

En este capítulo pretendemos introducir la noción de robótica tratando sus antecedentes.

En el término robot confluyen las imágenes de máquinas para la realización de trabajos productivos y de imitación de movimientos y comportamientos de seres vivos. Los robots actuales son obras de ingeniería y como tales concebidas para producir bienes y servicios o explotar recursos naturales. Desde ésta perspectiva son máquinas con las que se continúa una actividad que parte de los propios orígenes de la humanidad, y que desde el comienzo de la Edad Moderna se fundamenta esencialmente en conocimientos científicos y en nuestro siglo especialmente el desarrollo de máquinas ha estado fuertemente influido por el progreso tecnológico. De esta forma se pasa de máquinas que tienen por objetivo exclusivo la amplificación muscular del hombre, aquellos capaces de procesar información hasta aquellos capaces de imitar los movimientos del hombre o de la naturaleza (animales).

Existe una larga tradición de autómatas desde el mundo griego hasta nuestro siglo, pasando por los autómatas de los artesanos franceses y suizos del siglo XVIII, que ya incorporaban interesantes dispositivos mecánicos para el control automático de movimientos.

Podríamos situar el origen de la idea de *robot* en la mitología de la antigua Grecia. Cuenta la leyenda que el dios griego Hefesto (el Vulcano romano) creó mujeres mecánicas de oro para ayudarle en su fragua. Estas eran capaces de hacer los trabajos más complicados pues las había creado muy hábiles.

Los alquimistas de la Edad media decían poder crear vida artificial a partir de semen humano e intrincados procesos rayanos en el ocultismo, creando así lo que denominaban homúnculos. También en la Edad Media se fabricaron innumerables autómatas mecánicos para adornar las catedrales de la época, como parte de los relojes y en pequeñas cajas musicales.

Más adelante, en el año 1522 y también según la leyenda, el rabino de Praga Jehuda Löw creó un ser a partir del barro y carente de espíritu llamado Golem. Para ello uso las formulas sagradas contenidas en el Sefer Yetzirah y sus conocimientos de la Kabbalah.

La publicación de Frankenstein de Mary Shelley en 1818 supone el inicio de la ciencia-ficción. El libro narra la historia del DR. Víctor Frankenstein, el cual en un laboratorio con sofisticados artilugios crea vida artificial en un monstruo que llega a ser temido y acaba destruyendo a su propio creador. El modelo de Frankenstein ha sido tomado como referencia en numerosas ocasiones como el de monstruo que supone una amenaza para su creador, habiéndose repetido en numerosas historias desde los relatos de Asimov hasta Matrix pasando por 2001; Odisea en el espacio, o Terminator.

En 1897, sólo dos años después de que los hermanos Lumiere asombraran al mundo con su invento, aparece el primer robot de la historia del cine en la película *Gugusse et l'Automate* de Melies.

El término *robot* se introduce en la lengua inglesa apareciendo por primera vez en 1921, en la obra teatral *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)* del novelista y autor dramático checo *Karel Capek* en cuyo idioma la palabra *robota* significa fuerza de trabajo o servidumbre. El término tiene amplia aceptación y pronto se aplica a autómatas construidos en los años veinte y treinta que se exhiben en ferias, promociones de productos, películas y otras aplicaciones más o menos festivas. Se trata de imitar movimientos de seres vivos pero también de demostrar técnicas de control remoto, incluyéndose en algunos casos funciones sensoriales primarias.

La obra de Capek es en gran medida responsable de algunas de las creencias mantenidas popularmente acerca de los mismos en nuestro tiempo, incluyendo la perfección de los robots como máquinas humanoides dotadas con inteligencia y personalidades individuales. Esta imagen se reforzó en la película alemana de robots *Metrópolis* de 1926 con el robot andador eléctrico y su perro "Sparko" escrita por Thea von Harbour, quien es una auténtica pionera en la temática de la robótica en el cine de ciencia-ficción, convirtiendo a esta novela en una obra de arte y el primer largometraje de ciencia-ficción.

Es inevitable hablar de Asimov y sus robots positrónicos si se habla de los robots en la ciencia-ficción, y es que Isaac Asimov escribió un buen conjunto de relatos y de novelas sobre ellos. En realidad, pueden desglosarse en dos partes bien diferenciadas.

- Los relatos cortos de robots positrónicos: 1942 publica "las cavernas de acero" donde quedan asentadas las tres leyes de la robótica.
- Posteriormente en sus últimas novelas introduce la ley cero de la robótica.

Las leyes de la robótica enunciadas por Asimov en 1940 son:

- Ley 1: Un robot no podrá dañar a un ser humano, ni por pasividad permitir el daño a un ser humano.
- Ley 2: Un robot debe obedecer las órdenes dadas por un ser humano, excepto aquellas que entren en conflicto con la primera ley.
- Ley 3: Un robot debe proteger su existencia, mientras esta protección no entre en conflicto con la primera y/o segunda ley.
- Ley cero: Un robot no puede perjudicar a la humanidad ni, por omisión, permitir que la humanidad sufra daño, aún cuando ello entre en conflicto con las otras tres leyes.

Desde un punto de vista cronológico estos cuentos pueden situarse en un futuro relativamente cercano a nuestra época con una humanidad que

todavía no ha rebasado los límites del sistema solar, y en ellos se plantean, a veces con toques humorísticos y a veces con innegable lirismo distintas circunstancias en las que se ponen a prueba las leyes de la robótica, auténtica piedra angular de estos relatos.

Más recientemente en 1977 llega a la pantalla la película *La Guerra de las Galaxias* donde aparece la pareja de robots más famosa hasta nuestros días R2D2 y C3PO, escrita por George Lucas.

En 1984 encontramos otro gran y famoso robot en la película *Terminator* protagonizada por Arnold Schwarzeneger y dirigida por James Cameron. Que bien puede funcionar como otro contra ejemplo a las leyes de la robótica de Asimov.

En 1987 encontramos a *Robocop* un caso típico de formación de cyborg, que se encarga de mantener la ley y el orden en la ciudad de Detroit.

Así en 1999 aparece *Matrix* que es un excelente compendio de todo cuanto hemos hablado hasta ahora. Basada en una historia clásica de mesianismo, esta película se convierte en un crisol donde se funden muchos de los tópicos de género que hemos analizado, desde la guerra contra la inteligencia artificial en la que la humanidad ha sido barrida ante el empuje de su propia creación, pasando por los humanos mejorados de rancia estirpe ciberpunk (las escenas de lucha aceleradas) hasta llegar a las implicaciones de una simulación completa e interactiva de la realidad.

Hasta aquí no hemos hecho más que un breve relato de la historia de los robots en ciencia-ficción; pero lo cierto es que los robots industriales modernos parecen primitivos al compararlos con las expectativas que han creado los medios de comunicación y la ciencia-ficción durante las pasadas décadas, ya que aun en día cuando hablamos de robots la imaginación nos traslada a un mundo de ciencia-ficción con máquinas que vimos en películas, de apariencia casi humana algunos, otros con cierta similitud, algunos con “instinto” asesino, otros con gran sentido del humor y simpáticos, otros inofensivos pero cascarrabias, etc., pero luego “bajamos” a nuestra realidad y observamos que muchas de las tareas que desarrollamos diariamente, la mayoría de ellas repetitivas, bien podrían ser realizadas por algún autómatas preparado para tal fin. Pues esa es una de las funciones que un robot de esta época debería tranquilamente realizar para nosotros.

Cabe hacer notar que en el párrafo anterior ocupamos el término *debería realizar* en vez de *realiza*. Y esto es una de las deudas que tiene la robótica con nosotros (la humanidad). De cualquier manera existen hoy en día algunos robots para uso cotidiano, pero aún no están al alcance de todos, económicamente hablando.

Los robots industriales surgen de la convergencia de tecnologías del control automático y en particular del control de máquinas herramientas, de los manipuladores teleoperados y de la aplicación de computadores en tiempo real.

Mediante el control automático de procesos se pretende concebir y realizar algoritmos que permitan gobernar un proceso sin la intervención de agentes exteriores, especialmente el hombre. En particular, se presentan problemas de seguimiento automático de señales de consigna, las cuales sirven como referencia del valor deseado de una variable dentro de un proceso, mediante los denominados servosistemas. Estos sistemas generan automáticamente señales de control que tratan de anular la diferencia entre la señal de consigna y la señal medida en el proceso u objeto que se pretende controlar. Un problema similar es el de la regulación automática mediante la cual se pretende mantener una consigna, aunque se presenten perturbaciones que tiendan a separar el sistema de las condiciones deseadas.

Tanto los servo sistemas como los reguladores se basan en el principio de la realimentación. Las señales de consigna o referencia se comparan con medidas de variables del proceso u objeto, y su diferencia se emplea para generar acciones de control sobre el propio proceso. En los sistemas de control automático esta cadena acción – medida- acción se realiza sin la intervención del hombre.

Los primeros trabajos que condujeron a los robots industriales de hoy día se remontan al período que siguió inmediatamente a la Segunda Guerra Mundial.

De esta forma, se generalizan los sistemas de control automático de variables de procesos industriales y, en particular, sistemas de control de posición y velocidad. Se emplean también sistemas de control realimentado en barcos o aviones que deben seguir automáticamente una determinada trayectoria (pilotos automáticos) o en el posicionamiento de radares.

Durante los años finales de la década de los cuarenta, comenzaron programas de investigación en Oak Ridge y Argonne National Laboratories para desarrollar manipuladores mecánicos controlados de forma remota para manejar materiales radioactivos. Estos sistemas eran del tipo “maestro-esclavo”, también conocidos como teleoperadores, los cuales consistían de un par de pinzas una “maestra” y una “esclava” acopladas por mecanismos que permitían que la pinza “esclava”, en contacto con el material peligroso, reprodujera los movimientos de la pinza “maestra” accionada por un operador.

Con respecto a las máquinas herramienta de control numérico, hay que señalar los proyectos que se desarrollaron en EE.UU. a finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta. Se combinaban los progresos en el diseño de servosistemas con las recientes experiencias técnicas de computación digital. De esta forma, el contorno de corte era codificado en cinta de papel perforado, utilizándose para generar automáticamente las órdenes a los servomecanismos de la máquina. En 1953 se presentaba en el “Massachusetts Institute of Technology” (MIT) una máquina de estas características.

Tradicionalmente, en la realización de sistemas de control automático se han empleado diversas tecnologías tales como la neumática, hidráulica y, posteriormente, la eléctrica. A finales de los años sesenta y comienzos de los setenta los mini computadores encuentran una importante acogida en aplicaciones de control. La aparición en 1972 del microprocesador suministra un impulso decisivo al control por computador haciendo rentables numerosísimas aplicaciones entre las que se encuentra el control de robots. Los avances en microelectrónica de los años ochenta, con los circuitos de gran escala de integración (LSI), acentúan esta tendencia.

Posteriormente se añadió realimentación de la fuerza acoplado mecánicamente el movimiento de las unidades “maestra” y “esclavo” de forma que el operador podía sentir las fuerzas que se desarrollaban entre ambas pinzas y su entorno. A mediados de los años cincuenta el acoplamiento mecánico se sustituyó por sistemas eléctricos e hidráulicos tales como el *Handyman* de General Electric y el *Minotaur I* construido por General Mills.

En 1954 el ingeniero americano George Devol patentó el que se considera el primer robot industrial al que llamó “dispositivo de transferencia programada articulada”, un manipulador cuya operación podía ser programada (y por tanto cambiada) y que podía seguir una secuencia de pasos de movimientos determinados por las instrucciones en el programa. La clave era el uso de una computadora en conjunción con un manipulador para producir una máquina que podía ser “enseñada” para realizar una variedad de tareas de forma automática.

Aunque los robots programados ofrecían una herramienta de fabricación nueva y potente, se hizo patente en los años sesenta que la flexibilidad de estas máquinas se podía mejorar significativamente mediante el uso de una realimentación sensorial.

Mientras tanto, otros países (en particular Japón) comenzaron a ver el potencial de los robots industriales. Ya en 1968, la compañía *Kawasaki Heavy Industries* negoció una licencia con *Unimation* para sus robots.

Durante los años setenta se centró un gran esfuerzo de investigación sobre el uso de sensores externos para facilitar las operaciones manipulativas. En Stanford, Bolles y Paul (1973), utilizando realimentación visual como de fuerzas, demostraron que un brazo *Stanford* controlado por computadora, conectado a un PDP-10, efectuaba el montaje de bombas de agua de automóvil.

En el principio del siglo XX encontramos algo retrasada la tan mentada era robótica, sobretodo si comparamos la realidad con las películas de ciencia-ficción que vemos a diario. En la actualidad, en la industria, robots realizan tareas que antes estaban destinadas para los operarios humanos. Estos certeros dispositivos realizan sus tareas con mayor exactitud, velocidad, repetitividad, son incansables, realizan trabajos peligrosos y hasta inaccesibles para una persona y hasta son más

económicos que sus “contrapartes” humanos. Asimismo, es necesario recalcar que hoy en día se encuentran dispositivos que cumplen sólo con la función de entretener, sin realizar trabajo útil, aun cuando pueden utilizar tecnología avanzada. Podemos encontrar una variedad inmensa de robots y de posibles tareas que realizan cada uno de ellos. Por ejemplo: EL Sojourner, de la misión espacial Pathfinder, proyecto de la NASA, que tocó suelo marciano el 04/07/1997, un robot que imita el movimiento de las alas de una mariposa, habiendo algunos ingeniosos modelos que logran poner en vuelo al insecto, el perro robot de Sony llamado *Aibo*, que pesa unos 16 Kg y cuesta US \$ 2000. Tiene el aspecto de un can común y su comportamiento es como tal; Existen robots cirujanos que realizan intervenciones quirúrgicas con la presteza de un colega humano, donde se necesita arriesgar vidas humanas es mejor no hacerlo. Los robots son útiles para desempeñar estas tareas tan peligrosas.

Actores de metal hubo y habrá muchos, máquinas y digitalizados, ¿quién no vio la guerra de las galaxias, terminator y muchas películas más donde los héroes y villanos nos deleitaban con sus andanzas?. Y a pesar de este retraso se pensaba que no se podría construir un robot con aspecto, o parecido a un hombre. Pues hoy la compañía HONDA nos muestra a su robot *Asimo* que mide 120 cm pesa 43 Kg y puede moverse a una velocidad de hasta 1.6 m/h.. Y ya que estamos hablando de robots con capacidades humanas a Kismet con gestos casi humanos, que es un robot autónomo diseñado para las relaciones sociales con los humanos y a la vez es la cabeza de otro proyecto: Cog. Kismet se centra en el reconocimiento y actúa frente a gestos emocionales humanos.

Como puede verse los robots se encuentran montados en cadenas de producción en industrias de todo tipo alrededor de todo el mundo: automotores, electrónica, aviación, fábricas, etc., Y seguramente algún objeto que utilicemos hoy en día fue confeccionado en parte al menos por una máquina. Pueden cortar, soldar, manipular, pintar, etc. Hay por supuesto un sinnúmero de robots que vuelan, robots submarinos, microbots, nanobots, en fin se clasifican de las maneras que se puedan imaginar.

El futuro de los robots promete un pasar increíble, ya que el hombre acompaña sus avances y creaciones con todas las “herramientas” que tiene a su alcance para realizar sus tareas, y sobre todo las que sean peligrosas o directamente imposibles para el.

La robótica es una actividad que entusiasma a cualquiera, pues se siente maravilloso participar en el diseño, armado y ajuste de un dispositivo que muchas veces tiene “vida” propia y que realiza tareas que le son propias a su creador, al margen que da la posibilidad de utilizar la electrónica, la mecánica, la neumática, la informática, la matemática, la física, y por que no hasta la administración y economía, en fin, con las más variadas disciplinas que nos ayudaran a conseguir nuestro objetivo: la construcción de un robot.

I.2 CARACTERÍSTICAS DE UN ROBOT.

Existe una amplia gama de robots cuya utilidad depende de las aplicaciones para las cuales fueron diseñados. La evolución de los robots a lo largo de la historia ha dado lugar a muchas características y clasificaciones posibles, las cuales, la mayor parte de las veces no son rigurosas y se van modificando conforme avanza la tecnología.

Una clasificación un tanto general, de acuerdo a la utilidad social de los robots sería la siguiente:

- Robots industriales.
- Vehículos de control remoto.
 - Terrestres.
 - Marinos.
 - Aéreos
 - Espaciales.
- Prótesis para uso humano.
- Robots didácticos.
 - Estáticos.
 - Móviles.
- Robots de juguete.
- Robots de uso casero.
- Otros tipos.

Los robots industriales: Son los que más aplicación útil han tenido para la sociedad, ya que los productos que ellos fabrican por lo general son para uso masivo. También llamados *manipuladores*, realizan tareas repetitivas y se emplean en gran escala dentro de la industria automotriz, en la electrónica y en otras, donde se utilizan para armar o ensamblar automáticamente los respectivos productos, taladran, ponen componentes, los ajustan, sueldan, pintan, transportan piezas, etc. Generalmente tienen la forma de un *brazo mecánico*, que se encuentra anclado en uno de sus extremos.

Los vehículos de control remoto: Pueden ser clasificados dentro de la categoría de robots y se utilizan para movilizar herramientas o instrumentos en los sitios donde el hombre no puede acceder debido a las condiciones físicas o climáticas del lugar. Podemos citar como ejemplos los robots que se emplean para construir túneles, apagar incendios, los militares, los misiles teledirigidos, los vehículos espaciales teledirigidos o autónomos.

Prótesis para uso humano: También pueden considerarse como robots, ya que reemplazan funciones de los miembros inferiores y superiores de los seres humanos. Se han desarrollado verdaderas obras de arte en aparatos electromecánicos y electrónicos que realizan en forma parecida *el trabajo de las manos con sus dedos y las piernas*.

Los robots didácticos o experimentales: Están dedicados a la enseñanza y aprendizaje de la robótica y *no cumplen una tarea específica como tal*; existen básicamente dos tipos de robots didácticos los *estáticos* y los *móviles*.

Los robots de juguete : Son dispositivos generalmente fabricados en serie, y que imitan o inclusive cumplen algunas funciones similares a las de los robots didácticos o experimentales. Hay algunos con forma humanoides o de robots tipo vehículo de control remoto, algunos tienen control remoto, otros funcionan de forma autónoma y otros tienen una interface a una computadora.

Los robots de uso casero: Este tipo de robots debe tener libre movimiento, es decir no debe estar conectado a un control remoto externo, y por lo tanto tiene un sistema de control propio. Podría pensarse en ellos para que limpien, nos preparen y sirvan los alimentos, transporten objetos, etc..

Otros tipos de robots: Evidentemente, estos robots no se pueden clasificar en las categorías mencionadas, y que tienen diferentes aplicaciones, como las manos teledirigidas que sirven para trabajar con productos radioactivos o peligrosos, o las plataformas automatizadas para el manejo de mercancías en bodegas o libros en bibliotecas, etc.

Como todo dispositivo funcional, los robots tienen una estructura formada por diferentes sistemas o subsistemas y componentes; Si observamos la forma y funcionamiento de los diferentes tipos de robots podremos deducir que todos tienen algo en común, tales como las siguientes características:

- La estructura o chasis.
 - Endoesqueleto.
 - Exoesqueleto.
- Las fuentes de movimiento.
- Los medios de transmisión de movimiento.
- Los medios de locomoción.
- Los medios de agarre.
- La fuente de alimentación.
- Los sensores.
- Los circuitos de control.

La estructura o chasis: Es la encargada de darle forma al robot y sostener sus componentes. Puede estar constituida por numerosos materiales, como plásticos, metales, etc. y tener muchas formas diferentes. Así como en la naturaleza, los robots pueden ser de tipo “*endoesqueleto*”, donde la estructura es interna y los demás componentes se localizan de manera externa, o de tipo “*exoesqueleto*”, donde la estructura está por fuera y cubre o protege los demás elementos. Las formas de las estructuras son de lo más variadas, tanto hasta donde la imaginación y la aplicación que se le va a dar al robot lo permitan.

Las fuentes de movimiento: Son las que otorgan el movimiento al robot. Una de las más utilizadas es el motor eléctrico, comúnmente el motor de CC (corriente continua), siendo también bastante utilizados los servomotores y los motores paso a paso. Una fuente de movimiento nueva que esta empezando a gozar de bastante utilización son los *músculos eléctricos*, basados en un metal especial llamado *nitinol*.

Medios de transmisión de movimiento: Estos medios se ocupan cuando la fuente de movimiento no maneja directamente los medios de locomoción del robot, esto hace necesario una *interfase* entre ambos sistemas (fuente de movimiento y medios de locomoción), por ejemplo la transformación de movimientos lineales en circulares y viceversa, suelen emplearse conjuntos de engranes, cadenas cinemáticas para tal fin.

Medios de locomoción: Son los sistemas que permiten al robot desplazarse de un sitio a otro si éste debe hacerlo, el más común y simple son las ruedas y le siguen en importancia las piernas y las orugas.

Medios de agarre: Algunos robots deben sostener o manipular algún objeto y para ello se emplean estos medios, el más común es la mano mecánica mejor conocido como “gripper” y es un derivado de la mano humana, aunque ya en nuestros días existen algunos prototipos de manos casi idénticas y flexibles que la mano humana.

La fuente de alimentación: Esta depende de la aplicación que le sea asignada al robot, así si el robot se tiene que desplazar autónomamente seguramente se alimentará con baterías eléctricas recargables, pero si por el contrario no debe desplazarse o debe hacerlo mínimamente, se puede alimentar con corriente alterna a través de un convertidor, también si el robot es de mínimo consumo de energía puede ser alimentado a través de celdas solares o de baterías comunes.

Los sensores: Este sistema es que le permite a los robots actuar con cierta inteligencia al interactuar con el medio; ya que estos componentes detectan o perciben ciertos fenómenos o situaciones que le permiten al robot tomar, en un momento dado, una decisión. Estos componentes pretenden simular los sentidos que tienen los seres vivos. Estos componentes pueden encontrarse de muchas formas y de diferentes variables, es decir, los hay que sensan la luminosidad, la temperatura, la distancia, la presión e incluso hay cámaras de video que dotan de “visión artificial” al robot.

Los circuitos de control: Se dice que son el “cerebro” del robot y en la actualidad están formados por componentes electrónicos más o menos complejos dependiendo de las funciones del robot y lo que tenga que manejar. Actualmente los microprocesadores y microcontroladores, así como otros circuitos específicos para el manejo de motores y relés, los convertidores A/D y D/A, reguladores de voltaje, simuladores de voz, etc. permiten diseñar y construir tarjetas de control para robots muy eficientes y de costo no muy elevado. El bajo costo actual de una PC permite utilizarla para controlar robots de cualquier tipo utilizando las ventajas que supone dicho dispositivo.

Pasando al entorno industrial, podemos observar lo siguiente: Los sistemas automáticos de manipulación de piezas u objetos podemos distinguir tres partes estructurales muy bien definidas.

La primera es la máquina propiamente dicha, o sea todo el sistema mecánico y los motores o actuadores y el sistema de agarre o sujeción de los objetos.

La segunda serían los sensores de fuerza, visión y sonido que son detectores necesarios para que la máquina sepa exactamente el estado de todas las variables que precisa para una correcta actuación.

La tercera es el sistema de control y el lenguaje de programación que forma el sistema de toma automática de decisiones, que incluye la planificación, el control de los movimientos y la interpretación de los datos que proporcionan los sensores.

Detallando ahora estos elementos podemos ver la estructura de un robot de tipo industrial en la siguiente tabla.

- El manipulador.
- El controlador.
 - De posición.
 - Cinemático.
 - Dinámico.
 - Adaptativo.
 - Neumáticos.
 - Hidráulicos.
 - Eléctricos.
 - Aprehensor.
 - Herramienta.
- Los elementos motrices.
- El elemento terminal.
- Los sensores.

El brazo manipulador: Son los elementos mecánicos que propician el movimiento del elemento terminal. Los elementos rígidos del brazo están relacionados entre si mediante articulaciones, las cuales pueden ser giratorias o prismáticas. El número de elementos del brazo y el de las articulaciones que los relacionan determinan los *grados de libertad* del manipulador.

El controlador: Es el dispositivo que se encarga de regular el movimiento de los elementos del brazo, y de todo tipo de acciones, cálculos y procesos de información. La complejidad del control varía con los parámetros que se manejan, existiendo varias categorías de controlador.

Los elementos motrices o actuadores: Se encargan de mover las articulaciones, a través de cables poleas, cadenas, engranajes, etc. Su clasificación se realiza de acuerdo al tipo de energía que utilizan.

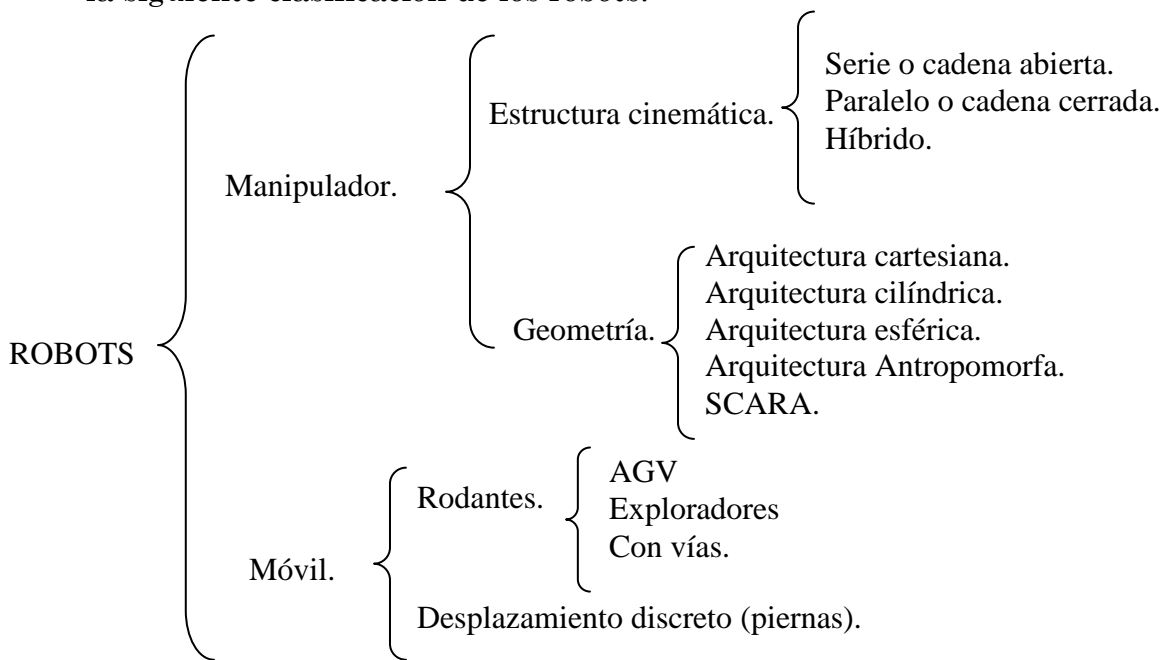
El elemento terminal: Se ubica al final del brazo, puede ser una “garra” o una herramienta, según sea necesario, y es la encargada de concretar la acción o tarea prevista.

Los sensores: Es el subsistema que brinda información a cerca del medio o proceso que realiza el brazo, es decir mantienen siempre actualizada la información.

Como se mencionó anteriormente, pueden estar, o no, presentes todas estas características en un sistema robótico; Pero lo que dejan apreciar, de manera clara, es que los sistemas robóticos pueden ser clasificados dependiendo de su finalidad o utilidad y que actualmente se tiene considerada en dos grandes ramas.

Así mismo, las características anteriormente descritas, nos dan el primer acercamiento a una definición de robot, que aunque muy difusa, si deja en claro que los robots son sólo máquinas donde se utilizan los avances tecnológicos, principalmente electrónicos, que el hombre ha logrado alcanzar con su experiencia en dicho campo.

En base a las características anteriormente descritas podemos hacer la siguiente clasificación de los robots:



Características básicas que definen un robot.

Grados de libertad. { Es el número de movimientos básicos e independientes que posicionan los elementos de un robot.

Precisión repetitiva. { Es la capacidad de volver a situarse la mano en un punto determinado un número indefinido de veces.

- Capacidad de carga.** { Es el peso máximo que el robot puede manipular.

- Región espacial de trabajo.** { Es el volumen en el cual el robot puede manipular objetos. Se define según las coordenadas de programación.

- Área de trabajo lineal.** { Es la superficie plana sobre la cual el robot puede manipular objetos.

- Velocidad** { Es la rapidez con que trabaja un robot, es una medida de su rendimiento.

- Coordenadas de los movimientos** { Es el tipo de sistema de posicionamiento y orientación del elemento terminal del robot.

- Tipo de actuador.** { Es el tipo de elemento motriz que genera los movimientos de las articulaciones del robot.

- Programabilidad** { Es la manera de cómo se programa el robot para sus tareas.

I.2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT.

En la literatura técnica los robots suelen ser definidos como máquinas que pueden llevar a cabo, de una manera independiente, tareas complejas de naturaleza física y mental. Éste debe de interactuar, a su vez, con su ambiente, y debe ser capaz de almacenar experiencia a partir de las labores que llevan a cabo.

La definición adoptada por el Instituto Norteamericano de Robótica aceptada internacionalmente para Robot es:

Manipulador multifuncional y reprogramable, diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos programados y variables que permiten llevar a cabo diversas tareas.

La definición anterior puede reducirse groseramente para su manejo como:

- Manipulador multifuncional programable.

Si buscamos en otras fuentes especializadas o diccionarios encontraremos:

- Aparato automático que realiza funciones normalmente ejecutados por los hombres.
- Máquina con forma humana.

Otra de las definiciones más aceptadas considera que los robots son:

Dispositivos mecánicos capaces de realizar tareas que podrían desempeñar seres humanos.

Bajo esta definición todas las máquinas que intervienen en una cadena de ensamblaje de coches, son robots, aun cuando no son muy inteligentes en apariencia. Hoy en día denominamos a estas máquinas “*Robots Industriales*”.

Desde inicios o mediados de los 90, han surgido nuevas máquinas más inteligentes. A estos nuevos robots se les conceden capacidades perceptivas (vista, oído y tacto principalmente) reducidas en comparación con la capacidad de percepción de los seres vivos. Estas nuevas máquinas que en apariencia son más inteligentes y que suelen adaptarse a entornos cotidianos se suelen denominar “*Robots de Servicio*” o “*Robots Inteligentes*”.

Por lo tanto, ninguna de las definiciones anteriores engloba a todos los dispositivos existentes, por lo cual se hace necesaria una definición más amplia de lo que realmente es un robot. Por tal motivo surge una definición más generalizada de ellos:

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 trabajo.¹

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 adecuado para ejecutar una tarea previamente definida.

¹ La Tombe Jean Claude. "Robots Motion Planning". Kluwer Academics Boston 1991.

I.2.2. SISTEMAS QUE CONFORMAN UN ROBOT.

En la siguiente figura se muestra el esquema básico de un robot (Silva 1984). En ella se identifican el sistema mecánico, actuadores, sensores y el sistema de control como elemento básico necesario para cerrar la cadena actuación – medidas – actuación.

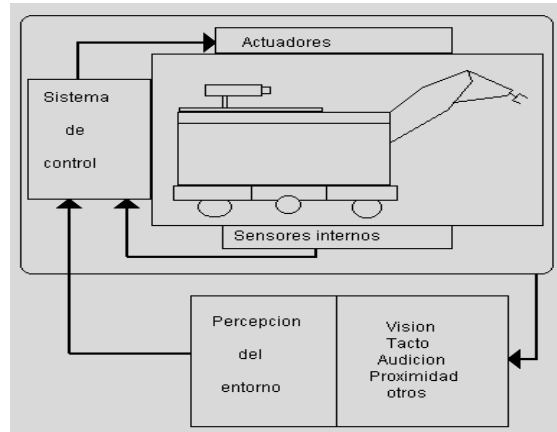


Fig. 1.1 el robot y su Interacción con el entorno.

El sistema de percepción del entorno puede estar constituido por sensores internos y/o externos, o simplemente no existir y, sin embargo, el sistema completo sigue siendo considerado 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 el sistema de control del robot; esto es en esencia un robot móvil.

También 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.

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

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

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

1. Aquellos que carecen de todo sistema sensorial, primera generación.

2. Aquellos que integran sensores de tipo interno, segunda generación.
3. Y aquellos que integran un sistema sensorial completo y complejo (sensores internos y externos), tercera generación.

Según la clasificación anterior los robots de la tercera generación son los únicos inteligentes, siempre y cuando tengan la suficiente capacidad de tomar decisiones a partir de la información de sus sensores externos.

La evolución de los robots conduce a una generación que incorpora los sentidos de la vista, el oído, el tacto 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 estos 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.

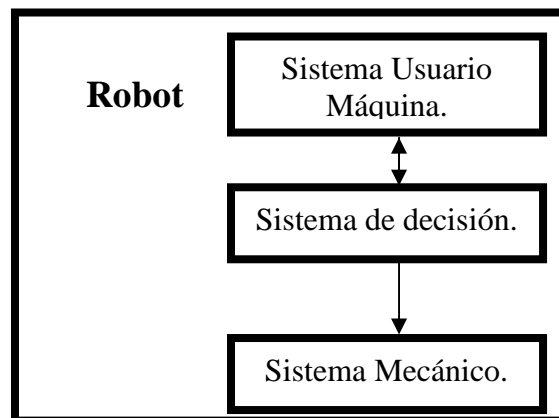
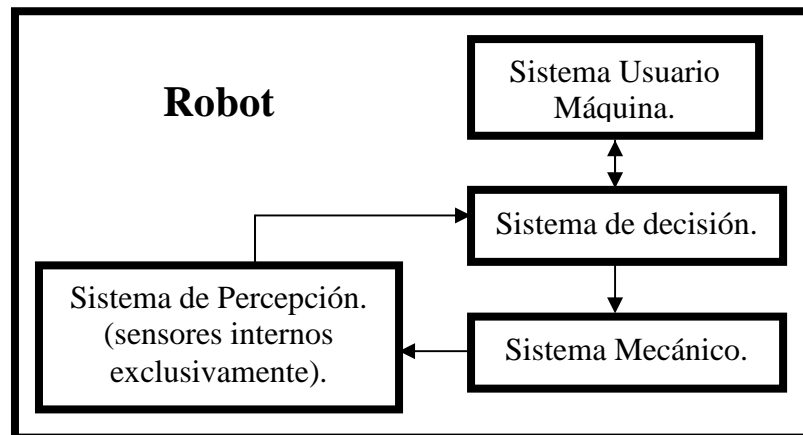


Fig. 1.2 Esquema Básico de un Robot de 1ª generación.

Fig. 1.3
Esquema Básico de un Robot de 2ª Generación, que ya incluye un sistema de sensores internos.



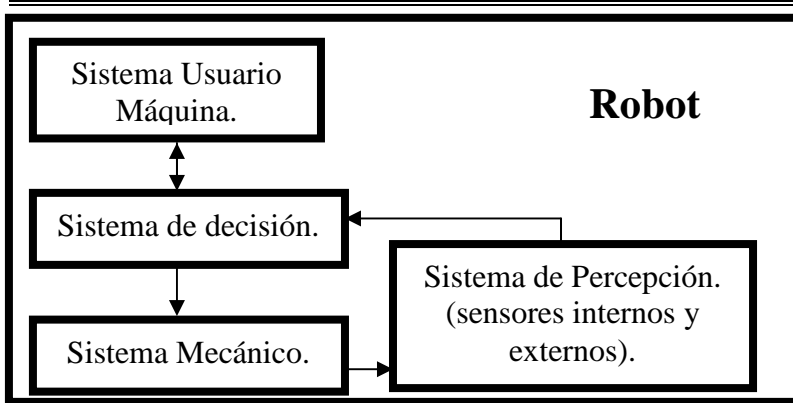


Fig. 1.4
Esquema Básico de un Robot de 3ª Generación que incorpora en sus sistemas un bloque de sensores internos y externos.

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 el control de las operaciones a realizar.

En general, este sistema está formado por microprocesadores o microcontroladores, los cuales llevan a cabo la tarea 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 les 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 basado en algoritmos matemáticos y/o lógicos.

Sistemas usuario maquina.

Este sistema tiene que ver con la transferencia de información entre los diferentes niveles y proporciona la interfase hombre – máquina para la transferencia de la información del usuario. Comúnmente cuenta con un sistema de despliegue gráfico para visualizar la comunicación, también cuenta con un sistema de entrada de datos y un software traductor que ayuda al usuario a introducir sus instrucciones en lenguaje máquina.

Sistema de percepción.

Comúnmente llamado sistema de sensado o simplemente sensores, son los encargados de obtener información para poder brindar una “imagen” del entorno al sistema de decisión para que el robot pueda interactuar con el ambiente físico. Dicha información esta basada en propiedades o variables físicas mientras que los parámetros de salida están relacionados con la información por transmitir.

Este sistema esta conformado por dos bloques que son el sistema de sensores interno y el bloque de sensores externos. Los sensores internos son los encargados de “medir” el estado de la estructura mecánica y, en

particular, giros o desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, fuerzas y pares; estos sensores permiten cerrar “bucles” de control de las articulaciones de la estructura mecánica. Los sensores externos permiten dotar de sentidos al robot, la información que suministran es utilizada por el sistema de percepción para aprender la realidad del entorno.

Sistema mecánico.

Son dispositivos que se pueden considerar convertidores de movimiento, en tanto transforma el movimiento de una forma a otra. Por ejemplo, con un mecanismo un movimiento lineal se puede convertir en un movimiento rotacional; un movimiento que se produce en una dirección en uno con otra dirección en ángulo recto respecto de la primera; un movimiento lineal alterno en uno rotacional, como en el motor de combustión interna, donde el movimiento alterno de los pistones se convierte en el de el cigüeñal y éste, a su vez, lo transfiere al eje de la transmisión.

Entre los elementos mecánicos están los mecanismos de barras articuladas, levas, engranes, cremalleras, cadenas, correas de transmisión, etcétera.

Muchos de los efectos que antes se obtenían con el uso de mecanismos en la actualidad se logran mediante sistemas de microprocesadores. No obstante, los mecanismos todavía son útiles en los sistemas mecatrónicos para la realización de las siguientes tareas:

1. Amplificación de fuerzas; por ejemplo, la que se obtiene mediante palancas.
2. Cambio de velocidad; por ejemplo, mediante engranes.
3. Transferencia de rotación de un eje a otro; por ejemplo, una banda sincrónica.
4. Determinados tipos de movimiento; por ejemplo, los que se obtienen mediante un mecanismo de retorno rápido.

En un robot el sistema mecánico esta constituido por la estructura del esqueleto y el conjunto de cadenas cinemáticas formada 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.

El sistema mecánico está compuesto por diversas articulaciones. El aumento del número de articulaciones aporta mayor maniobrabilidad pero dificulta el problema del control, obteniéndose normalmente menores precisiones por acumulación de errores.

En este punto conviene indicar que las ecuaciones que describen el movimiento del brazo articulado son ecuaciones diferenciales no lineales y acopladas, para las que, en un caso general, resulta difícil obtener soluciones analíticas. Físicamente los términos de acoplamiento representan: pares gravitacionales que dependen de la posición de las articulaciones, pares de reacción debidos a las aceleraciones de otras articulaciones, y pares debido a la aceleración de Coriolis y fuerzas centrífugas. La magnitud de estas interacciones depende de las características del robot y de la utilidad que se le dará a este.

Actuadores.

El sistema de actuadores son los elementos de los sistemas de control (sistema de decisión) que transforman la salida de un microprocesador, microcontrolador o sistema de control en una acción de control; es decir, es el sistema que suministra la energía necesaria para el movimiento del robot, mediante la transformación de algún tipo de energía, ya sea eléctrica, neumática o hidráulica en energía mecánica dando lugar a la generación de un desplazamiento, ya sea de tipo lineal o rotacional.

Estos elementos de actuación mecánica, también conocidos con el nombre de elementos de accionamiento, se clasifican básicamente en dos tipos: actuadores rotacionales y actuadores lineales. Los actuadores rotacionales son capaces de proporcionar una rotación continua, como es el caso de los motores (c.d., paso a paso, etc.); y los actuadores lineales tienen un desplazamiento lineal limitado como es el caso de los pistones neumáticos.

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas.

Existen tres tipos de actuadores:

- Hidráulicos
- Neumáticos
- Eléctricos

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos.

Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simples posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren demasiado equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento. Los actuadores eléctricos también son muy utilizados en los aparatos mecatrónicos.

Por todo esto es necesario conocer muy bien las características de cada actuador para utilizarlos correctamente de acuerdo a su aplicación específica.

Sistemas de actuación hidráulicos.

Los actuadores hidráulicos son los que han de utilizar un fluido a presión, generalmente un tipo de aceite, para que el robot pueda movilizar sus mecanismos. Los actuadores hidráulicos se utilizan para robots grandes, los cuales presentan mayor velocidad y mayor resistencia mecánica.

Para las aplicaciones que exijan una carga útil pesada (por lo general, mayor de 10 libras y tan alta como 2000 libras), el dispositivo hidráulico es el sistema a elegir. Los altos índices entre potencia y carga, la mayor exactitud, la respuesta de mayor frecuencia con un desempeño más suave a bajas velocidades y el amplio rango de velocidad, son algunas de las ventajas del acondicionamiento hidráulico sobre los actuadores neumáticos.

La presión es aplicada de la misma manera que la neumática en un émbolo que se encuentra dentro de un compartimiento hermético. Este se encuentra acoplado mecánicamente a un vástago que se mueve linealmente de acuerdo a la presión aplicada. Los cálculos para la fuerza ejercida por un cilindro hidráulico son las mismas que para los cilindros neumáticos.

Sin embargo, poseen una diferencia fundamental; el cilindro hidráulico del mismo tamaño que el neumático produce una mayor fuerza. Las principales aplicaciones la podemos encontrar en máquinas troqueladoras, en cargadores y en maquinarias pesada para obras civiles.

Para la aplicación de los actuadores hidráulicos, se necesita de una bomba que envíen al líquido también a presión a través de una tubería o de mangueras especiales para el transporte del mismo.

Estos actuadores son de poco uso en la industria si lo comparamos con la acogida de los actuadores neumático y eléctrico; esto se debe entre otras cosas a los grandes requisitos para el espacio de piso y las condiciones de gran riesgo provenientes del escurrimiento de fluidos de alta presión.

En esta clase de actuadores también encontramos cilindros de simple o de doble efecto y en cuanto a los elementos de control y protección son muy similares a los sistemas neumáticos.

Sistemas de actuación neumáticos.

En los actuadores neumáticos se comprime el aire abastecido por un compresor, el cual viaja a través de mangueras. Los robots pequeños están diseñados para funcionar por medio de actuadores neumáticos.

Los robots que funcionan con actuadores neumáticos están limitados a operaciones como la de tomar y situar ciertos elementos. Los actuadores neumáticos consisten tanto en cilindros lineales como en actuadores rotatorios proveedores del movimiento. Los actuadores neumáticos son menos costosos y más seguros que otros sistemas, sin embargo, es difícil controlar la velocidad o la posición debido a la compresibilidad del aire que se utiliza. La exactitud se puede incrementar mediante paros mecánicos y los robots accionados en forma neumática son útiles para las aplicaciones ligeras que involucran las operaciones de recoger-colocar.

- Cilindros o pistones neumáticos. En este tipo de actuador, el movimiento se transmite mediante la acción de un pistón alojado dentro de un cilindro a presión. Un cilindro está compuesto básicamente de tres partes: el compartimiento; de donde realmente proviene el nombre de cilindro, el émbolo y el vástago.
- Cilindro de doble vástago. Posee vástago en ambos extremos del compartimiento.
- Cilindro tándem. Son dos cilindros acoplados mecánicamente, de modo que la fuerza resultante es la suma de la fuerza de cada cilindro.
- Cilindro multiposicional. También son dos cilindros acoplados mecánicamente, de modo que si las longitudes de cada uno son diferentes, se pueden obtener cuatro posiciones distintas con dos señales de control.
- Cilindro de impacto. Es un cilindro con dos cámaras de aire, en una de cuales se acumula una presión que luego es liberada de manera rápida sobre la cámara que contiene el émbolo. El resultado es un movimiento del vástago con velocidad tal que se transforma en un fuerte impacto.
- Cilindro de giro. Estos cilindros poseen un acople mecánico, que transforma el movimiento lineal de un vástago interno en un movimiento de giro sobre una pieza circular externa

Algunas características de los cilindros neumáticos.

- Cilindros de simple efecto: Este término es dado a los actuadores que utilizan la presión del aire para generar el movimiento del eje en un solo sentido. Para el regreso, luego de eliminar la presión del aire, se utilizan resortes que empujan al eje hasta su posición de reposo.
- Cilindro de doble efecto: Son llamados así los actuadores que utilizan el aire a presión para generar los dos movimientos del eje, es decir, la ida y el regreso.

Dispositivos neumáticos de movimiento rotativo.

Motores de aire comprimido.

Los motores de aire comprimido son actuadores neumáticos que transforman la presión del aire en movimiento mecánico giratorio. Una de sus aplicaciones es el control de válvulas de cierre en las tuberías para líquidos.

Elementos de control neumático.

- Electro-válvulas. Para poder controlar el lapso de fluido, a través de los diferentes sistemas que trabajan con aire comprimido, es necesario interponer entre el sistema de control y el elemento actuador, una interfase que sirva para la conversión de la señal de control, que está basada en corriente eléctrica, en movimiento mecánico que obstruya o permita el paso del aire a presión.
- Reguladores de caudal. Son dispositivos que se instalan sobre los orificios de entrada o salida de aire en los diferentes sistemas mecánicos. Su principal función es controlar la velocidad del desplazamiento del vástago de los cilindros. Si el caudal es muy grande, el cilindro actúa de manera casi instantánea, hasta el punto de sentirse el golpe al finalizar su carrera.

Sistemas de actuación eléctricos.

Se le da el nombre de actuadores eléctricos cuando se usa la energía eléctrica para que el robot ejecute sus movimientos. Los actuadores eléctricos se utilizan para robots de tamaño mediano, pues éstos no requieren de tanta velocidad ni potencia como los robots diseñados para funcionar con actuadores hidráulicos. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetitividad.

Los sistemas de acondicionamiento eléctrico han llegado a ser los que más predominan en los ambientes robóticos industriales. Aunque no proporcionan la velocidad o la potencia de los sistemas hidráulicos, los dispositivos eléctricos ofrecen una mayor exactitud y repetitividad, necesitan de un menor espacio de piso y, como consecuencia, son muy adecuados para el trabajo preciso, como el ensamblaje.

Por lo general, los robots se pueden accionar con un acondicionamiento eléctrico, por medio de los motores de paso a paso o de los servomotores. En la actualidad, los motores paso a paso predominan en los robots “instructores” pequeños, los cuales se emplean en las instituciones educativas o en los ambientes de laboratorios automatizados.

Una salida de un motor paso a paso consiste en incrementos de movimiento angular discreto iniciado por una serie de pulsos eléctricos discretos. Los robots dirigidos por un motor paso a paso se utilizan para aplicaciones de trabajo ligero, debido a que una carga pesada puede ocasionar una pérdida de pasos y la subsecuente inexactitud.

Los servomotores de proporcionan un control excelente con los requisitos de mantenimiento mínimos. El control del momento de torsión es posible si, respectivamente, se controlan el voltaje o la corriente que se aplican al motor. Las ventajas que tales motores ofrecen incluyen un momento de torsión elevado, un tamaño pequeño de estructura y una carga ligera, así como una curva de velocidad lineal, lo cual reduce el esfuerzo computacional.

Los actuadores de solenoide utilizan el principio de la atracción electromagnética para producir el movimiento mecánico. La mayor ventaja es su velocidad de respuesta, ya que el movimiento es casi instantáneo al flujo de corriente eléctrica. Sin embargo una de sus desventajas es su tamaño comparado con la fuerza que produce. En el momento que se energiza la bobina, el campo magnético creado por ésta, hace que la armadura se deslice hacia ella, logrando con esto, que el vástago

presente un movimiento lineal igual al de la armadura. Cuando la bobina se desenergiza, el resorte hace que el vástago regrese a su posición de reposo.

Elementos de control.

Contactores.

Son actuadores que sirven de interfase entre los mandos de control y los actuadores eléctricos de mayor potencia. Por medio de la excitación eléctrica de una bobina, el magnetismo creado por ella, atrae un dispositivo mecánico que a su vez conmuta uno o varios interruptores mecánicos que pueden manejar corrientes elevadas.

Los contactores más comunes poseen bobinas de control a 110 o 220 voltios y contienen un juego de 4 interruptores conmutables, uno como auxiliar y los otros tres utilizados para las fases de la corriente trifásica utilizada comúnmente en la industria.

Elementos de protección.

Breakers.

Son simplemente interruptores o bloqueadores, que se encargan de aislar la corriente de potencia de entrada, de los diferentes sistemas eléctricos controlados. Estos son instalados serialmente con las líneas de potencia y vienen diseñados para soportar determinadas corrientes de

tal manera que si sobrepasa el límite, este se activa y aísla la corriente eléctrica de potencia. Deben ser instalados en el circuito antes del contactor.

2. ROBOTS MÓVILES.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Usualmente el campo de desarrollo de los robots se ha enfocado primordialmente a los robots manipuladores para las tareas de producción de la industria, sin embargo, tanto dentro como fuera de la industria, existen diversas tareas que pueden ser llevadas a cabo por otro tipo de robots, llamados robots móviles. Estos pueden llevar a cabo funciones como la exploración espacial y terrestre, búsqueda de yacimientos minerales, investigación submarina, misiones peligrosas (tales como la exploración de un cráter de un volcán en actividad o en plantas nucleares), mantenimiento, etc.

El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica, restringido inicialmente al alcance de una estructura mecánica anclada en uno de sus extremos. Se trata también de incrementar la autonomía limitando en todo lo posible la intervención humana.

Desde el punto de vista de la autonomía, los robots móviles tienen como precedentes los dispositivos electromecánicos, tales como los denominados “micro-mouse”, creados desde los años treinta para desarrollar funciones inteligentes tales como descubrir caminos en laberintos.

En los años ochenta el incremento espectacular de la capacidad computacional y el desarrolló de nuevos sensores, mecanismos y sistemas de control, permitió aumentar la autonomía en los robots; cabe mencionar los desarrollos de robots móviles, tanto para la navegación en interiores como para exteriores¹.

La autonomía de un robot móvil se basa en el sistema de navegación automática; en estos sistemas se incluyen las tareas de planificación, percepción y control.

En los robots móviles, de navegación en exteriores, el problema de la planificación, en el caso más general, puede descomponerse en planificación global de la misión, de la ruta, de la trayectoria y, finalmente evitar obstáculos no esperados.

En un robot para interiores, la misión podría consistir en determinar a que habitación hay que desplazarse, mientras que la ruta establecería el camino desde la posición inicial a una posición en la habitación, definiendo puntos intermedios de paso.

Una vez realizada la planificación de la trayectoria, es necesario planificar movimientos concretos y controlar dichos movimientos para mantener al vehículo en la trayectoria planificada. De esta forma, se plantea

¹ Bares y otros, 1988.

el problema del seguimiento de caminos; asimismo es necesario resolver el problema de control y regulación de velocidad del vehículo.

Nótese también que el control del robot requiere disponer de medidas de su posición y orientación, a intervalos de tiempo suficientemente cortos. La técnica más simple consiste en la utilización de la odometría a partir de las medidas suministradas por los sensores situados en los ejes de movimiento.

Dentro de la categoría de los robots móviles existen dos tipos de locomoción o formas de desplazamiento; el desplazamiento continuo y el desplazamiento discreto. Los robots móviles de desplazamiento continuo son aquellos que utilizan para su movimiento de traslación ruedas o rieles; y se les llama de esta forma debido a que su medio de soporte se encuentra siempre en contacto con la superficie en la cual el robot ha de desplazarse. Mientras que los robots de desplazamiento discreto utilizan extremidades (piernas) para poder desplazarse, ocupando de esta manera sólo algunos puntos discretos para su soporte y marcha.

Los robots con ruedas suelen ser más comunes debido a las facilidades que ofrecen su construcción y control. Mientras que los robots con piernas o robots caminantes presentan un equipo más complejo para poder igualar las capacidades de carga de un robot con ruedas, así como un complejo sistema de control para gobernar su marcha.

Generalmente pueden encontrarse robots caminantes en versiones tipo bípedo, cuadrúpedo, hexápodo y araña (ocho extremidades) sin haber una regla en cuanto la cantidad de extremidades, la limitante resulta en la complejidad de la estructura del sistema mecánico y de control.

El diseño del presente proyecto queda situado dentro de la categoría de robot caminante de desplazamiento discreto tipo hexápodo, es decir, un robot capaz de caminar o marchar mediante la coordinación y control de seis extremidades.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS CAMINANTES

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 el cuerpo sobre ésta para darle al sistema movimiento hacia delante. Esto es denominado 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 restricciones:

- *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.

2.2.1. 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 un funcionamiento secuencial.

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

1-2-3	}	Salto con tres patas.
1,2-3	}	Dos patas que se mueven como una.
2,1-3	}	
3,1-2	}	
1,2,3	}	Una pata por vez.
2,1,3	}	

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 de una sola pata, las otras secuencias se enumeran en la tabla siguiente.

FUNCION COMO BIPEDO	FUNCION COMO TRIPEDO	FUNCION COMO CUADRUPEDO
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	2,3,4-1 1,2-4,3	1,3,4,2
1-2,3-4	2,4,3-1 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: Secuencia de pisadas de un cuadrúpedo.

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.

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
6	1,082	1,030
7	9,366	9,295
8	94,586	94,493
9	109,1670	1,091,552
10	14,174,522	14,174,376

Tabla 2.2 Resultados de las secuencias de Bessonov y Umonov

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

2.2.2 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.

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 una 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 delante 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.

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

2.2.3 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 un bípedo se construye de la siguiente forma:

	PATA 2	PATA 1
FASE 1	0	0
FASE 2	0	1
FASE 3	0	0
FASE 4	1	0

$$=$$

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

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;

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

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.

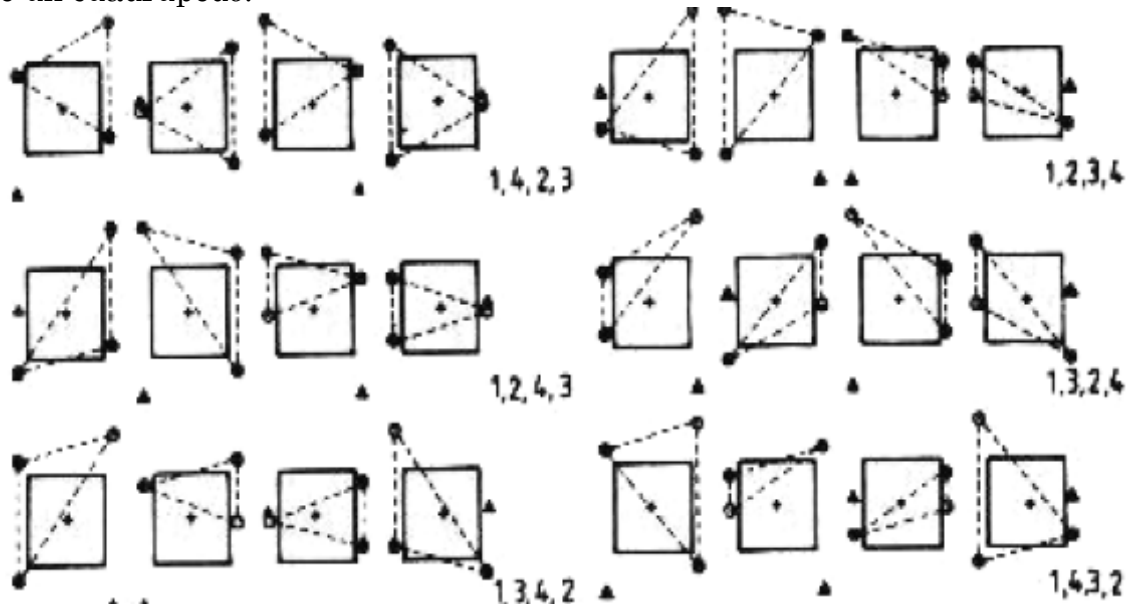


Figura 2.1 Marchas reptantes de un cuadrúpedo.

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 b 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 $(1 - b)T$ 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 $t_j = 0$; $t_4 = 0.25$; $b = 11/12$, 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 $b T$, la máquina avanzará $b TV$ mientras se apoya un pie, es decir, el paso S es $b TV$. Por otra parte, el tranco L , tiene una longitud TV . Por lo tanto, el tranco $L = S/b$.

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 $b = 11/12$, $t_1 = 0$, $t_4 = 5/12$, $t_2 = 1/2$, $t_3 = 11/12$ 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 pata 4.*

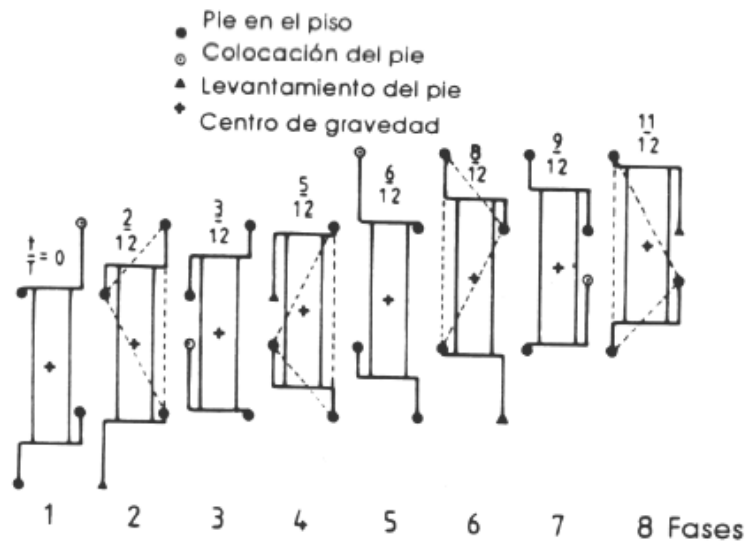


Figura 2.2 Progresión de una máquina cuadrúpeda.

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 b 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 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 gateo cuadrúpeda, se confirma que éste es también una marcha ondulada (1, 4, 2, 3).

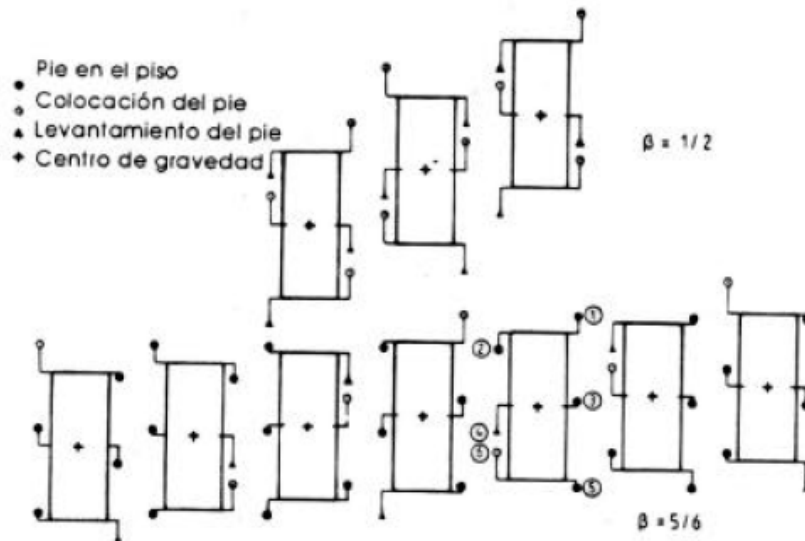


Figura 2.3 Marchas para un robot hexápodo: marcha tripode y ondulada.

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.

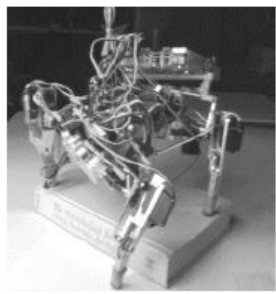
Los pasos pueden ser modelados mediante “time delays” o retardadores de tiempo, y un generador central de señales. El concepto de paso (gait) ha sido observado desde tiempos inmemoriales por el hombre, el cual dibujaba el movimiento de las piernas de los animales en las cavernas en la era prehistórica. Tiempo después se encuentran las posturas humanas y animales de los egipcios. En 1880 Muybridge y Marey 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 autómatas estable, para después estudiar su estabilidad estática.


Para los hexápodos, fue encontrado que, de entre los pasos característicos estáticamente posibles, el mejor fue el usado por los insectos con característica de ondas simétricas. También se encontró que la estabilidad decrece con el factor de soporte de una pierna, definido este último como el tiempo de soporte entre el tiempo total de ciclo de una pierna. En la siguiente tabla se muestra una arquitectura multi-nivel para un robot caminante, es decir, los sistemas a integrar para el funcionamiento del mismo:


Nivel		
1	Pierna	Nivel mecánico. Adaptabilidad intrínseca al terreno.
1.5	Tono	<ul style="list-style-type: none"> • Generar un control continuo de los actuadores. • Control de equilibrio y adaptación a terreno desconocido.
2	Paso	Generador de pasos generalizado.
3	Operación	Lenguaje de operación e intérprete. Está condicionado a permitir un comportamiento autónomo.
4	Inteligencia	<ul style="list-style-type: none"> • Percepción.- modelado del entorno en un ambiente desconocido. • Decisión.- descubrimiento de trayectoria, generación de operación.


Tabla 2.4 Arquitectura Multinivel.

Países altamente industrializados han logrado desarrollar robots caminantes que integran sistemas tales como visión, percepción, y aprendizaje de su entorno, de manera que utilizan toda esta información y toman decisiones a través de sus sistemas de inteligencia artificial, funcionando este tipo de máquinas de manera autónoma. Sin embargo, todo esto ha sido a nivel laboratorio y centros de investigación, sin introducirse todavía en los sectores productivos y domésticos. En la siguiente tabla se muestran algunos proyectos de máquinas caminantes desarrollados en varias partes del mundo, y se listan un conjunto de características propias de cada robot.

MENO II	Información Técnica							
	Nombre de la máquina caminante o proyecto: <i>MENO II</i> Fecha de comienzo y fin del proyecto: <i>1995-1997</i> Costo del proyecto: <i>USD 5000</i> <i>Robotics Research Lab, USC</i>							
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía	
	Largo	0.5 m	Velocidad Máxima	-----	Número de piernas	4	Actuadores	DC servos
	Ancho	0.5 m	Peso	12 kg	Grados de Libertad Activos	12	Fuente de Energía	Batería de 12V
	Alto	0.3 m	Carga	-----	Grados de Libertad Pasivos	4	Consumo de Energía	-----

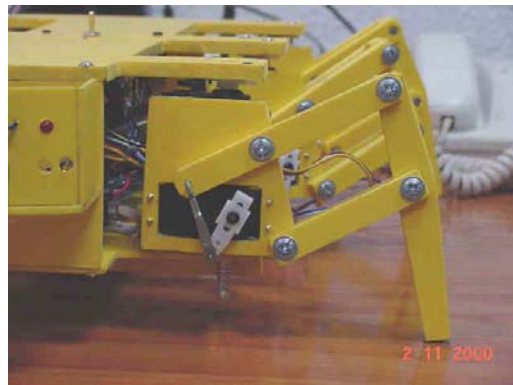
Collie II	Información Técnica							
	Nombre de la máquina caminante o proyecto: <i>Collie II</i> <i>Universidad de Tokyo</i>							
	Dimensiones		Capacidad		Movimiento		Suministro de Energía	
	Largo	0.42 m	Velocidad Máxima	-----	Número de piernas	4	Actuadores	-----
	Ancho	0.24 m	Peso	7 kg	Grados de 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: TITAN VIII Instituto Tecnológico de Tokio							
	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: IOAN Fecha de comienzo y fin del proyecto: 1994 - 1996 Costo del proyecto: 200000 BEF (Francos Belgas) ULB Service des Constructions Mécaniques 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							
	Nombre de la máquina caminante: Hydraumas III Fecha de comienzo y fin del proyecto: verano 1997 verano 1999							
	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.



3.1 INTRODUCCIÓN.

En todo proceso de diseño se requiere seguir una metodología predeterminada para poder llegar al objetivo deseado. Cada uno de los pasos a seguir dentro de dicha metodología se le conoce con el nombre de fases, las cuales se interrelacionan con todas y cada una de las fases subsecuentes o anteriores; lo cual quiere decir que esta metodología no es de tipo secuencial, sino que cada metodología debe seguir los lineamientos marcados por sus predecesoras y con miras a satisfacer las fases futuras.

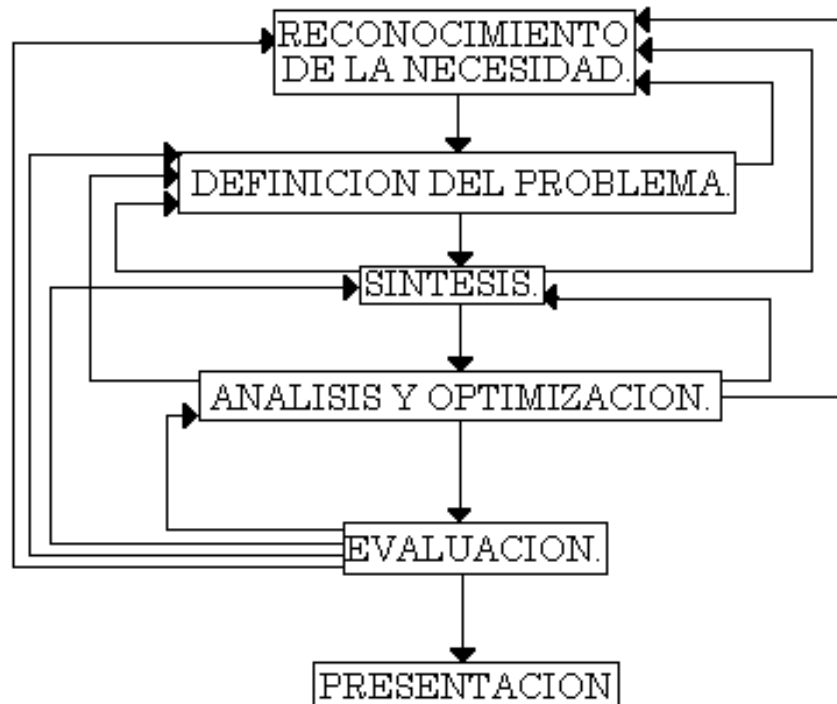


Fig. 3.1 Proceso de diseño.

Como puede verse cada una de las fases dentro del proceso de diseño interactúa con las demás, lo cual establece una lógica de proyecto; es decir, que dentro del avance del proyecto y cumplimiento de cada fase es requerido verificar si realmente se está o no cumpliendo con el objetivo establecido en un principio y de ser afirmativo poder continuar, de caso contrario se tendrá que redefinir la fase actual o en su defecto redefinir la fase anterior.

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 dos capítulos anteriores del presente trabajo de tesis se mencionaron las características principales de los diversos tipos de robots, y muy especialmente se trataron los robots móviles o caminantes. Tomando en cuenta las investigaciones realizadas para dichos capítulos he llegado a la conclusión de proponer un sistema robótico tipo hexápodo de desplazamiento discreto (locomoción mediante extremidades), perteneciente a la tercera generación (sensado interno y externo), incluyendo 2 grados de libertad GL en cada extremidad.

Tomando en cuenta el análisis hecho hasta aquí; los puntos críticos en el desarrollo de este proyecto se concluyen a continuación.

- Llevar a cabo el diseño de un sistema robótico tipo Hexápodo de desplazamiento discreto; siendo esta la configuración propuesta debido a su mayor estabilidad tanto dinámica como estática; y presentar una complejidad intermedia en su algoritmo de control; al mismo tiempo poder dotar al sistema de infraestructura y flexibilidad futura; ya que como será expuesto a mejoras debe poseer un cuerpo capaz de ser expandido cuando sea requerido.
- Dotar al sistema de 2 Grados de Libertad en cada una de sus extremidades, ya que bajo esta propuesta se reduce significativamente el número de actuadores a ocupar y por tanto el costo, aunque indudablemente se reduce la flexibilidad de cada extremidad y por consiguiente del sistema. Al ocupar una mayor cantidad de actuadores por extremidad se aumenta la capacidad de adaptación a todo terreno, pero por razones económicas he decidido llevar a este diseño bajo esta decisión.
- En los materiales para su construcción se recomienda el uso de Nylamid, debido a su bajo peso, poseer una resistencia similar a la del aluminio pero de menor densidad, su uso también facilita la manufactura del sistema debido a su maleabilidad y además es de relativa fácil obtención. Una recomendación en la estructura corporal del sistema es; que si se piensa que el sistema pueda ser ampliado o expandido posteriormente se realice su diseño de tipo *endoesqueleto*.

- Los actuadores elegidos para el presente diseño se proponen de tipo eléctrico (motores de c.d., a pasos o servomotores), nuevamente influyendo en la elección de ellos la limitante económica y disponibilidad del material, pero nada impide que los medios de impulsión sean de tipo neumático o hidráulico. Por otra parte y como lo veremos en el capítulo IV la lógica de control se facilita enormemente al hacer uso de actuadores eléctricos.
- Otro de los lineamientos del proyecto es lo relacionado a la transmisión de potencia y movimiento, en el cual se decidió hacer uso de los conocimientos básicos de máquinas herramienta para la facilitación de los cálculos y simplicidad del sistema de transmisión de movimiento.

Teniendo en cuenta las anteriores delimitaciones y propuestas en los párrafos anteriores se llegó a la conclusión y determinación de presentar la propuesta emitida en este trabajo de tesis como se muestra en la siguiente figura:

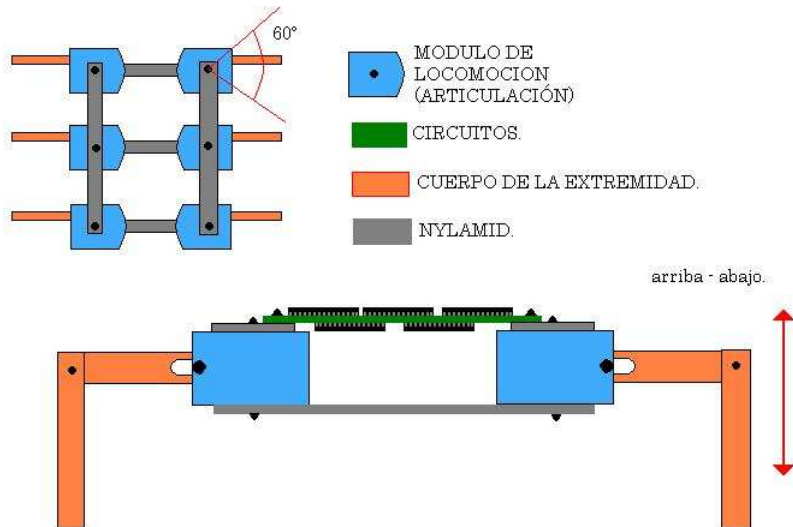


Fig. 3.2 Diseño conceptual. Vista superior y frontal.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LA EXTREMIDAD.

En esta sección se propone a detalle tanto la forma de las extremidades, así como el mecanismo que las hará trabajar, también se ilustra la posición y tipo de montaje del sistema de percepción interno; aunque éste se estudiará en detalle en el capítulo IV.

3.3.1 PROPUESTA DEL MECANISMO.

El mecanismo que propongo es un sistema muy sencillo; haciendo uso de los principios de máquinas simples; la finalidad del mecanismo es lograr el movimiento de cada extremidad. Cabe mencionar, que como lo hemos descrito anteriormente, la mecatrónica es una ciencia multidisciplinaria que requiere de conocimientos específicos de cada una de las disciplinas que la conforman, razón por la cual queda un poco fuera de mi alcance el diseño de un “buen” sistema mecánico; más sin embargo hago mi mejor intento en ello; más de antemano queda abierto el sistema, ya sea para una mejora o reingeniería total futura.

Cada extremidad está formada por el eslabón R1, el eslabón R2 y el módulo de locomoción-articulación V1; cada extremidad es dotada con una capacidad de 2 Grados de Libertad; uno de ellos es el movimiento de ascenso y descenso de cada extremidad, el cual es indispensable para poder despegar el eslabón R2 del suelo. El otro grado de libertad llamado avance-retroceso, es el requerido para poder desplazar el eslabón R1 de atrás hacia delante o viceversa. (Fig. 3.2).

Como puede observarse ambos grados de libertad o direcciones de movimiento son logrados desde un mismo módulo; el cual está constituido por los motores M1 y M2. Donde M1 es el causante de ocasionar el levantamiento del eslabón R2; Y el accionamiento de M2 es la causa que origina el desplazamiento de R1 en avance o retroceso, dependiendo de su sentido de giro.

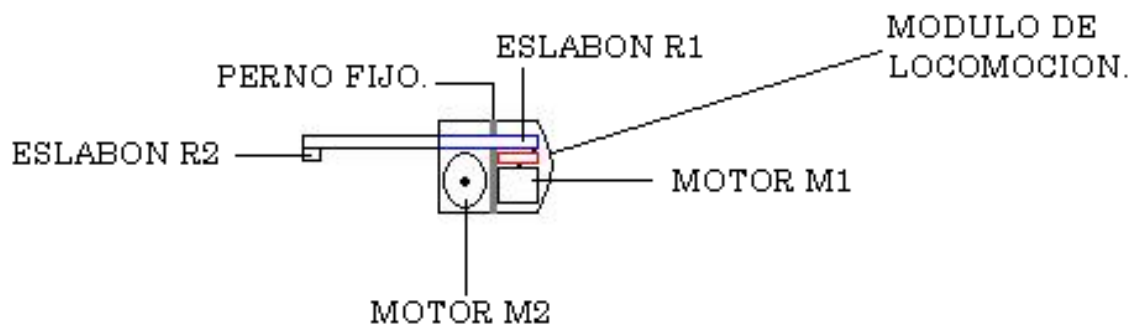


Fig. 3.3 Módulo de locomoción, vista superior.

A causa de la disposición del módulo de locomoción el mecanismo de las extremidades puede dividirse en dos partes para su mejor comprensión y diseño que son:

- Sistema de elevación y descenso.
- Sistema de avance y retroceso.

Sistema de elevación y descenso.

Este sistema nos ayuda a logra el movimiento necesario para elevar las extremidades, antes de hacerlas avanzar o retroceder, y en algunos casos poder evadir algunos obstáculos que se encuentren por debajo del nivel permisible de la elevación del eslabón R2; ya que de no existir este levantamiento y descenso las extremidades tendrían que ser “arrastradas” sobre el piso obstaculizando enormemente el desplazamiento de nuestro robot móvil.

Dicho sistema está conformado por el motor M1, el perno fijo (Ver fig. 3.3), y los eslabones R1 y R2; y que esta basado en el principio de biela y palanca de primera clase de las máquinas simples. Donde el esfuerzo es realizado por el motor M1, el punto de apoyo se encuentra en el perno fijo, y la carga es el eslabón R2 junto con todos sus elementos alrededor.

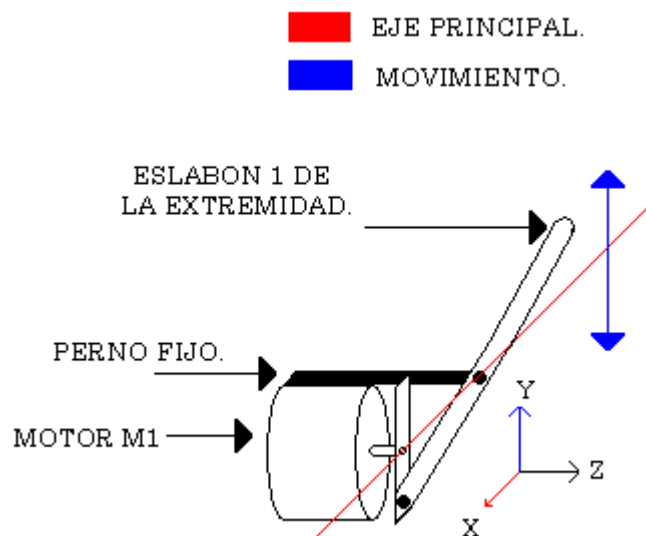


Fig. 3.4 Sistema Ascenso / Descenso.

Al colocar el sistema en un sistema coordenado donde nuestro eje X sea paralelo al suelo observaremos que logramos un movimiento del eslabón R1 sobre el eje Y. Que en nuestro caso es útil para la elevación de la extremidad y por ende se le denomina ascenso y descenso.

En la siguiente figura se muestra la vista horizontal de nuestro sistema; donde el eje del motor M1 en ningún momento toca al eslabón R1; también puede apreciarse que el punto de esfuerzo ejercido tiene una distancia variable con respecto al punto de apoyo o fulcro; lo cual coherentemente nos hace pensar y deducir que el esfuerzo realizado por el

motor M1 sobre el eslabón R1 es variable; lo cual representa una posible ventaja ya esto nos dice que nuestro motor no tendrá que trabajar a plena carga cuando entre en funcionamiento este sistema.

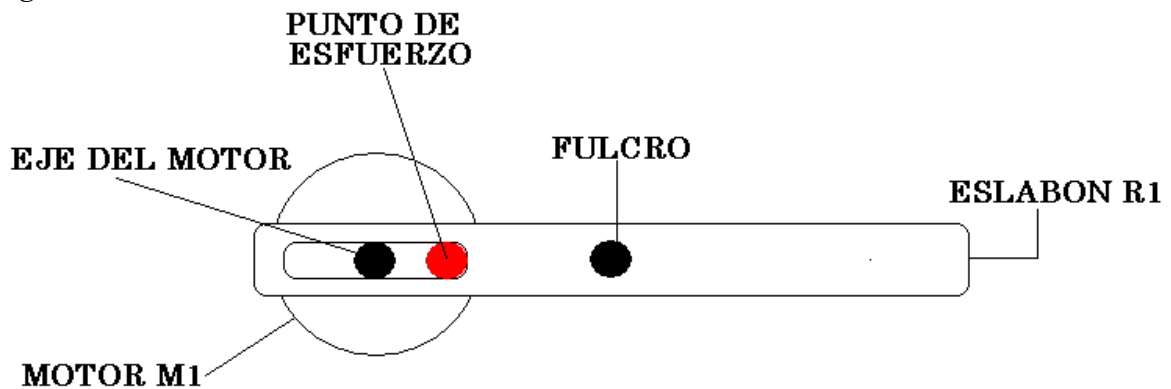


Fig. 3.5 vista horizontal del sistema ascenso descenso.

Sistema de avance y retroceso.

Este sistema es el encargado de hacer que cada extremidad sea capaz de desplazar la extremidad de adelante hacia atrás y viceversa, también conocido como avance y retroceso; este sistema esta conformado por el motor M2 y la totalidad del módulo de locomoción, es decir, la carga de este sistema será el sistema de elevación y descenso en su totalidad.

El funcionamiento de este sistema es el siguiente: al accionar M2 ocasionará un giro en su eje; pero a diferencia de M1 su eje estará fijo a la plataforma o esqueleto de nuestro robot, lo que inherentemente ocasionará que quien realice el giro sea el cuerpo de M2 el cual estará fijo a la estructura protectora del módulo de locomoción, logrando con ello que todo el cuerpo del módulo de locomoción realice un giro en sentido inverso al accionamiento del motor.



Fig. 3.6 desplazamiento de avance y retroceso.

La finalidad de este grado de libertad es la de dotar al robot con la capacidad de “halarse” por medio de las extremidades, gracias a la secuencia de activación de los grados de libertad como se explicará más adelante.

Funcionamiento de la extremidad.

Ahora bien, ya que cada una de las extremidades del robot posee 2 GL y que son logrados por medio de actuadores eléctricos, nos es necesario

analizarlas en su conjunto para poder decidir la forma en que “caminará” nuestro robot. Para tal objeto en la sección de estabilidad estática de este mismo capítulo se proponen los dos diferentes tipos de marcha que podrán ser efectuados por nuestro hexápodo.

3.4 DESCRIPCIÓN DEL CUERPO.

El cuerpo y soporte de mi robot está conformado por 5 barras de Nylamid 2 de 25cm * 2cm y 3 de 15cm * 2cm colocadas de la siguiente manera:

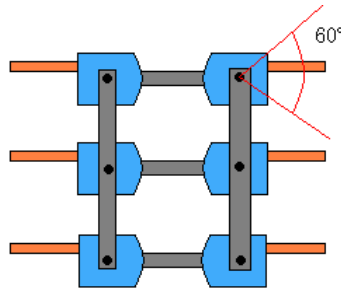


Fig. 3.7 forma del cuerpo del robot.

Donde el espacio obtenido servirá tanto para soporte y colocación de las extremidades, así como para alojamiento de los circuitos de control, batería y carga extra.

Las extremidades podrán tener un espacio para desplazamiento de hasta 60°, lo cual dota de gran flexibilidad y distancia de avance al hexápodo.

3.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA.

El sistema de transmisión de potencia consiste de un mecanismo muy simple y antiguo, pero muy efectivo y utilizado hoy en nuestros días. Este mecanismo fue postulado por el genial físico y matemático griego Arquímedes cuyo principio lleva su nombre.

Dicho principio también se conoce con el nombre de la ley de la palanca y cuya relación se expresa de la siguiente manera:

el producto de la Potencia por su brazo es igual al de la Resistencia por el suyo

$$P \cdot B_p = R \cdot B_r$$

$$F_1 * x_1 = F_2 * x_2$$

Considerando **P** la potencia, **B_p** el brazo de la potencia, **R** la resistencia y **B_r** la longitud del brazo de la resistencia hasta el punto de soporte. En cualquiera de los casos se puede sustituir x_2 por la diferencia entre la longitud de la barra (palanca) y la distancia del brazo de la potencia hasta el punto de soporte (x_1).

En nuestro robot el mecanismo propuesto es una palanca de primer género, en donde el punto de apoyo se encuentra en un punto intermedio entre la fuerza y la resistencia.



Fig. 3.8 Palanca de primer genero.

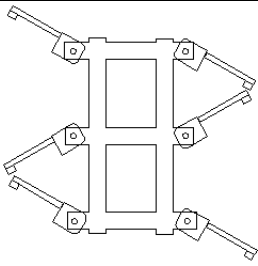
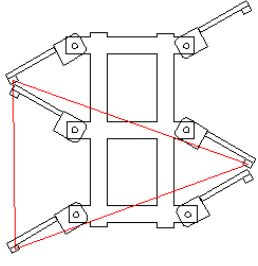
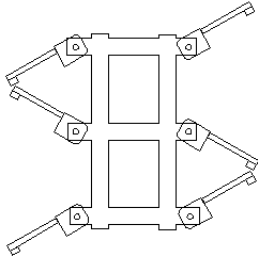
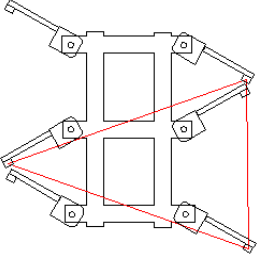
3.6 ESTABILIDAD ESTÁTICA.

Como se mencionó en el capítulo II, 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 esta en movimiento.

Nuestro hexápodo posee 1082 secuencias diferentes, de las cuales 1030 son potencialmente estables. (ver tabla 2.2). Sin embargo el requerimiento de simetría reduce este número a 24 secuencias, de las cuales nos interesan sólo dos, que son las que podremos desarrollar con el hexápodo, estas son la marcha trípede y la marcha ondulada.

Marcha trípede.

En este tipo de marcha tres de las seis extremidades se mueven al mismo tiempo, resultando ser una marcha singular debido al levantamiento simultáneo de tres extremidades, siendo sus secuencias (1-4-5, 2-3-6) y su matriz de marcha la siguiente:

	<p>Fase 1. En esta fase todas las extremidades se encuentran posicionadas sobre el suelo.</p>
	<p>Fase2. En esta fase las extremidades (1-4-5) se elevan hasta su punto máximo, para proseguir con la realización de su paso al frente, terminados estos eventos las extremidades 2-3-6 realizan su paso en retroceso sin ser elevadas.</p>
	<p>Fase 3. En esta fase todas las extremidades vuelven a ser apoyadas sobre el suelo.</p>
	<p>Fase 4. En esta fase las extremidades (2-3-6) son elevadas hasta su punto máximo, para proseguir con su paso al frente, terminados estos eventos las extremidades 1-4-5 realizan su paso en retroceso sin ser elevadas.</p>

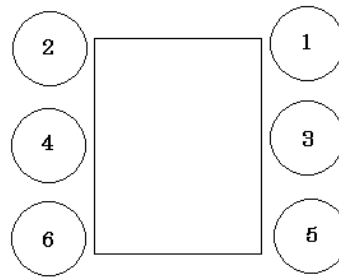


Fig. 3.9 Diagrama de extremidades.

	PATA 1	PATA 2	PATA 3	PATA 4	PATA 5	PATA 6
FASE 1	0	0	0	0	0	0
FASE 2	1	0	0	1	0	1
FASE 3	0	0	0	0	0	0
FASE 4	0	1	1	0	1	0

Como puede apreciarse nuestra matriz de marcha consta de cuatro fases, las cuales deben mantener el centro de masa dentro de un área formada por las tres extremidades que se encuentren en contacto con la superficie, lo cual se describe y explica en las figuras anteriores de patrones de pisadas:

Marcha ondulada.

Consiste en que todas las patas de un mismo lado se muevan en sucesión, desde la trasera y hasta la delantera, en tanto que las patas del lado contrario hacen lo propio. Las ondas que recorren ambos lados pueden ser sucesivas, esto es, que la onda recorre 'un lado del cuerpo y luego pasa al otro, con lo que en todo momento sólo una pata está en el aire, con las demás apoyadas en el suelo; simultáneas, o, más frecuentemente, con medio ciclo de desfase, con lo que siempre hay cuatro patas sobre tierra firme. Un paso lento pero seguro y menos socorrido.

3.7 MODELO DINÁMICO.

En esta etapa del proyecto se procede a determinar la regla matemática que vincula las variables de entrada y salida del sistema. Generalmente dicha caracterización matemática se manifiesta por medio de ecuaciones diferenciales. El modelo matemático del sistema a controlar se obtiene tradicionalmente por una de las dos técnicas siguientes:

Analítica: Este procedimiento se basa en las ecuaciones de la física que rigen el comportamiento del sistema. Esta metodología puede proporcionar un modelo matemático preciso a condición de dominar las leyes de la física que están involucradas en el sistema.

Experimental: Este procedimiento requiere una serie de datos experimentales del sistema. Frecuentemente se trata de examinar el comportamiento del sistema ante entradas específicas. El modelo obtenido a partir de este procedimiento es, en general, más impreciso que el conseguido a partir del método analítico. No obstante su principal ventaja radica en la facilidad y el corto espacio de tiempo requerido para disponer del modelo.

En algunas ocasiones, en esta etapa se procede a una simplificación del modelo del sistema que desea controlarse para así poder obtener un sistema de control relativamente más sencillo, más sin embargo esta simplificación nos puede llevar al fenómeno conocido como *falta de robustez*, lo que se traduce en un funcionamiento inadecuado del sistema de control.

En otras ocasiones, después de la etapa de modelado se continúa con la etapa de identificación paramétrica; donde se obtienen los valores numéricos de los parámetros o variables involucradas en el modelo dinámico.

Desde el punto de vista de los sistemas dinámicos, un robot de n grados de libertad GL, puede ser considerado como un sistema no lineal multivariable, teniendo n entradas (los pares y fuerzas τ aplicados en las articulaciones o puntos de apoyo por medio de accionadores electromecánicos, hidráulicos o neumáticos) y $2n$ variables de estado, normalmente asociadas a las n posiciones \mathbf{q} y n velocidades $\dot{\mathbf{q}}$ de las articulaciones. La figura siguiente muestra el diagrama de bloques correspondiente suponiendo que las variables de estado corresponden también a las salidas.



Fig. 3.10 Diagrama de bloques.

Para mi proyecto de tesis propongo el uso del método tradicional; es decir, por medio del método analítico, a partir de las leyes de la física, debido a la naturaleza mecánica del sistema robótico. Siendo las leyes involucradas las leyes de la mecánica.

Los robots son sistemas mecánicos articulados formados por eslabones conectados entre si a través de uniones o articulaciones. Las articulaciones son básicamente de dos tipos; rotacionales y traslacionales. En el caso del hexápodo se consideraran sus extremidades como cadenas cinemáticas abiertas, tal y como se muestra en la figura abstracta siguiente:

Considerando la extremidad articulada de n eslabones mostrada en la figura anterior. Tradicionalmente, se coloca un marco de referencia cartesiano de tres dimensiones en cualquier lugar de la base del robot; para el caso del hexápodo, justamente debajo de la articulación de la extremidad; siendo denotado indistintamente aquí por las coordenadas $[x \ y \ z]^T$ o $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ o $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T$. Los eslabones se enumeran consecutivamente desde la base

(eslabón 0) hasta el final (eslabón n) y las uniones son el punto de contacto entre los eslabones y se enumeran de tal forma que la unión i conecta los eslabones i e $i-1$.

Cada unión o articulación se controla independientemente a través de un accionador que generalmente se coloca en dicha unión, en nuestro caso en un punto de origen motriz; y el movimiento de las uniones produce el movimiento relativo de los eslabones.

Las posiciones articulares correspondientes a cada articulación del robot que se miden por medio de sensores colocados en los accionadores, se agrupan para propósitos de análisis en vector de posiciones articulares \mathbf{q} . En consecuencia para un robot de n articulaciones, es decir; de n g.d.l., el vector de posiciones articulares tendrá n elementos.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q1 \\ q2 \\ \vdots \\ qn \end{bmatrix}$$

La determinación de la posición y orientación del dispositivo terminal del robot resulta de gran interés debido a que dicha posición y orientación se expresa en términos del marco de referencia del plano coordenado cartesiano (x, y, z) colocado en la base del robot, así como eventualmente en términos de los llamados ángulos de Euler, Dichas coordenadas (y ángulos) son agrupados en el vector \mathbf{x} de posiciones cartesianas.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ \vdots \\ xmm \end{bmatrix}$$

Donde $m \leq n$. En el escenario donde el extremo final del robot puede tomar cualquier posición y orientación en el espacio euclidiano de dimensión 3, se tendrá $m=6$; pero si el movimiento del robot se realiza en un plano (dimensión 2) y sólo interesa la posición del extremo final, entonces $m=2$; lo cual es nuestro caso.

El *modelo cinemático directo* de un robot, describe la relación entre la posición articular \mathbf{q} y la posición y orientación \mathbf{x} del dispositivo terminal del robot. En otras palabras el modelo cinemático directo de un robot es una relación de la forma:

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{q}). \quad \text{Ec. (1)}$$

La obtención del modelo cinemático directo $\mathbf{x}=f(\mathbf{q})$, aunque laboriosa, es metódica, y en el caso de robots de pocos g.d.l., involucra expresiones trigonométricas.

El *modelo dinámico* de un robot consiste en una ecuación diferencial (ordinaria) vectorial en las posiciones, ya sean articulares \mathbf{q} o cartesianas \mathbf{x} , generalmente de segundo orden, pudiéndose expresar como:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, t) &= \mathbf{0} \\ f(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, t) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad \text{Ec. (2 y 3)}$$

Siendo estos *el modelo dinámico articular* y *modelo dinámico cartesiano*, respectivamente, donde t denota el vector de pares y fuerzas aplicadas en las articulaciones por medio de los accionadores. Cabe mencionar que estos modelos dinámicos no son iguales entre sí, y tampoco deben ser confundidos con la relación $f(\mathbf{q})$ del modelo cinemático directo.

Aparte de la importancia incuestionable de los modelos dinámicos de robots en el diseño de controladores, dichos modelos pueden ser utilizados en la simulación del diseño, mediante equipo de cómputo, para deducir el comportamiento del robot antes de que sea construido físicamente.

3.7.1 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE LAGRANGE.

Uno de los procedimientos más empleados para la obtención de los modelos dinámicos de los robots, en forma cerrada, es el basado en las ecuaciones de movimiento de Lagrange¹. El empleo de las ecuaciones de Lagrange para el modelado, requiere de dos conceptos importantes, que son la energía cinética y la energía potencial.

Las ecuaciones dinámicas de un robot pueden obtenerse a partir de las ecuaciones de movimiento de Newton, el inconveniente que presenta este método es que el análisis se complica notablemente cuando aumenta el número de articulaciones del robot.

Considérese un robot de n articulaciones. La energía total ε de un robot de n grados de libertad es la suma de sus energías cinética κ y potencial U :

$$\varepsilon(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \kappa(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + U(\mathbf{q}(t)). \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde $\mathbf{q}(t) = [\mathbf{q}_1(t), \dots, \mathbf{q}_n(t)]^T$.

El *lagrangiano* $\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ de un robot de n grados de libertad es la diferencia entre su energía cinética κ y su energía potencial U .

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \kappa(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) - U(\mathbf{q}(t)). \quad \text{Ec. (5)}$$

Aquí se considera que la energía potencial U se debe a fuerzas conservativas como la fuerza de gravedad y a fuerzas de resortes.

¹ Reciben el nombre de Lagrange debido a que fue el primero en darlas a conocer en 1788.

Las ecuaciones de movimiento de Lagrange para un robot de n g.d.l, vienen dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau$$

Ec. (6)

O de forma equivalente:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i$$

$i = 1, \dots, n$ Ec. (7)

Donde τ_i son las fuerzas y pares ejercidos externamente (por accionadores) en cada articulación así como fuerzas no conservativas. Como fuerzas no conservativas se incluyen las de fricción, las de resistencia al movimiento de un objeto dentro de un fluido, y en general las que dependen del tiempo o de la velocidad.

Nótese que se tendrán tantas ecuaciones escalares dinámicas como g.d.l tenga el robot.

El uso de las ecuaciones de Lagrange para modelado dinámico se reduce a cuatro etapas:

- 1.- Cálculo de la energía cinética: $\kappa(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$
- 2.- Cálculo de la energía potencial: $U(\mathbf{q}(t))$.
- 3.- Cálculo del lagrangiano: $\mathcal{L}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$
- 4.- Desarrollo de las ecuaciones de Lagrange.

3.7.2 MODELADO DINÁMICO DE ROBOTS.

Esta metodología se estudia normalmente en los textos tradicionales de robótica y mecánica teórica; por lo que en el presente trabajo de tesis se presenta de forma resumida; para la obtención de más detalles acerca del mismo se puede referir a los textos citados en la bibliografía del presente trabajo.

Considérese un robot manipulador de n g.d.l., formado por eslabones rígidos, conectados por uniones libres de fricción y elasticidad. La energía cinética $\mathbf{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ asociada a tal dispositivo mecánico articulado puede expresarse siempre como:

$$\mathbf{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

Ec. (8)

Donde $M(q)$ es una matriz simétrica definida positiva $n \times n$ denominada *matriz de inercia*. La energía potencial $\mathbf{U}(\mathbf{q})$ no tiene una forma específica como el caso de la energía cinética, pero se sabe que depende del vector de posiciones articulares \mathbf{q} .

El Lagrangiano $\mathcal{L}(q, \dot{q})$ es en este caso:

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \psi(q) \quad \text{Ec. (9)}$$

Con esta forma para el Lagrangiano, la ecuación de movimiento de Lagrange puede expresarse como:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right] \right] - \frac{\partial}{\partial q} \left[\frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right] + \frac{\partial \psi(q)}{\partial q} = \tau \quad \text{Ec. (10)}$$

Por otro lado se puede verificar que:

$$\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right] = M(q) \dot{q} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right] \right] = M(q) \ddot{q} + \dot{M}(q) \dot{q} \quad \text{Ec. (12)}$$

Considerando las expresiones anteriores, la ecuación de movimiento toma la forma:

$$M(q) \ddot{q} + \dot{M}(q) \dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} \left[\dot{q}^T M(q) \dot{q} \right] + \frac{\partial \psi(q)}{\partial q} = \tau \quad \text{Ec. (13)}$$

O de modo compacto:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

$$C(q, \dot{q}) \dot{q} = \dot{M}(q) \dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} \left[\dot{q}^T M(q) \dot{q} \right] \quad \text{Ec. (15)}$$

$$g(q) = \frac{\partial \psi(q)}{\partial q} \quad \text{Ec. (16)}$$

La ecuación 14 es la ecuación dinámica para robots de n g.d.l. Nótese que 14 es una ecuación diferencial vectorial no lineal en el estado $[\dot{q}^T \dot{q}^T]^T$. $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ es un vector de $n \times 1$ llamado *vector de fuerzas centrífugas y de coriolis*, $g(q)$ es un vector de $n \times 1$ de *fuerzas o pares gravitacionales* y τ es un vector de *fuerzas externas*, siendo generalmente los pares y fuerzas aplicadas por los accionadores en las articulaciones.

La matriz $C(q, \dot{q})$ llamada matriz centrífuga y de coriolis puede no ser única, pero el vector $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ si lo es. Una manera de obtener $C(q, \dot{q})$ es a través de los coeficientes o símbolos de Cristoffel $C_{ijk}(q)$ definidos como:

$$C_{ijk}(q) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial M_{kj}(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial M_{ki}(q)}{\partial q_j} - \frac{\partial M_{ij}(q)}{\partial q_k} \right] \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde $M_{ij}(q)$ denota el ij -ésimo elemento de la matriz de inercia $M(q)$.

Cada elemento de $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ y $g(q)$ es, en general, una función relativamente compleja de las posiciones y velocidades de todas las articulaciones, esto es, de q y \dot{q} . Los elementos de $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ y $g(q)$ dependen de la geometría del robot que modelan.

Nótese que la determinación del vector $g(q)$ para un robot dado es relativamente sencillo ya que viene dado por DDD. En otras palabras, el vector de pares gravitacionales $g(q)$ es simplemente el gradiente de la energía potencial $U(q)$.

3.7.3 MODELO DINAMICO DE ROBOTS CON ACCIONADORES.

En un robot real, el vector de pares τ es suministrado por accionadores que tradicionalmente son de tipo electromecánico, neumático o hidráulico. Dichos accionadores relacionan dinámicamente el par o fuerza suministrado con la entrada de dicho accionador. Esta entrada puede ser un voltaje o corriente para el caso de accionadores electromecánicos, y flujo o presión de aceite para accionadores hidráulicos.

Accionadores con dinámica lineal.

En ocasiones, cierto tipo de accionadores electromecánicos pueden modelarse satisfactoriamente mediante ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden.

Un caso común es aquél donde los accionadores son motores de c.d. El modelo dinámico relacionando el voltaje v aplicado a la armadura del motor con el par τ suministrado por dicho motor se expone en la siguiente ecuación:

$$J_m \ddot{q} + f_m \dot{q} + \frac{K_a K_b}{R_a} \dot{q} + \frac{\tau}{r^2} = \frac{K_a}{r R_a} v \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

J_m Inercia del motor [Kg.m²].

K_a Constante motor_par [Nm/A].

R_a Resistencia de armadura [Ω].

K_b constante de contra reacción electromotriz [V s/rad].

T par neto aplicado después del juego de engranes sobre el eje de la carga[Nm].

θ posición angular del eje de la carga [rad].

r relación de reducción de los engranes (en general $r \gg 1$).

v voltaje de armadura.

La ecuación anterior relaciona el voltaje v aplicado a la armadura del motor con el par τ aplicado a la carga en términos de su posición, velocidad y aceleración angular.

Considerando que cada uno de los accionadores de las n articulaciones es un motor de CC, se obtiene lo siguiente:

$$J\ddot{q} + B\dot{q} + R\tau = Kv \quad \text{Ec. (21)}$$

La ecuación anterior puede verse como un sistema dinámico cuya entrada es v y las salidas son q y \dot{q} .

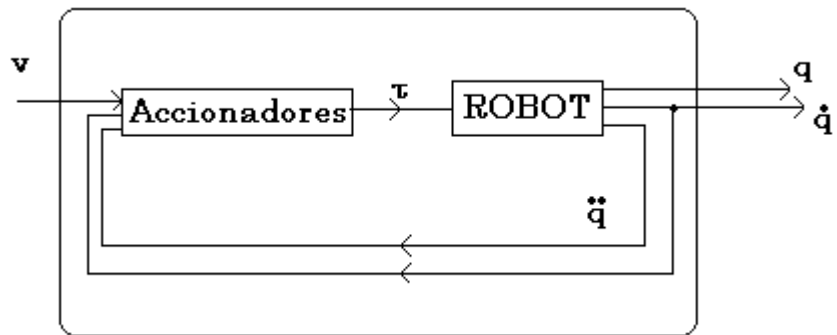


Fig. 3.11 Esquema de sistema relacionando entrada de voltaje y salida par.

4.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo se centra en la intersección existente entre la robótica y la ingeniería eléctrica-electrónica y más específicamente con el área de control automático; formando ésta intersección uno de los principales pilares de la ingeniería mecatrónica.

A pesar de la existencia de robots comerciales, el diseño de controladores para robots sigue siendo un área de intensos estudios por parte de los constructores de robots así como de los centros de investigación. Podría argumentarse que los robots existentes son capaces de realizar correctamente gran variedad de actividades, por lo que parecería innecesario, a primera vista, el desarrollo de investigaciones sobre el tema de control de robots. Sin embargo este último tema no solo es interesante por si mismo, sino que también ofrece grandes retos teóricos, y más importante aún, su estudio es indispensable en aplicaciones específicas que no pueden ser llevadas a cabo mediante los robots comerciales actuales.

Un sistema de control puede considerarse como una caja negra que sirve para controlar la salida de un valor o secuencia de valores determinados.

Existen dos tipos básicos de sistemas de control: el de *lazo abierto* y el de *lazo cerrado*.

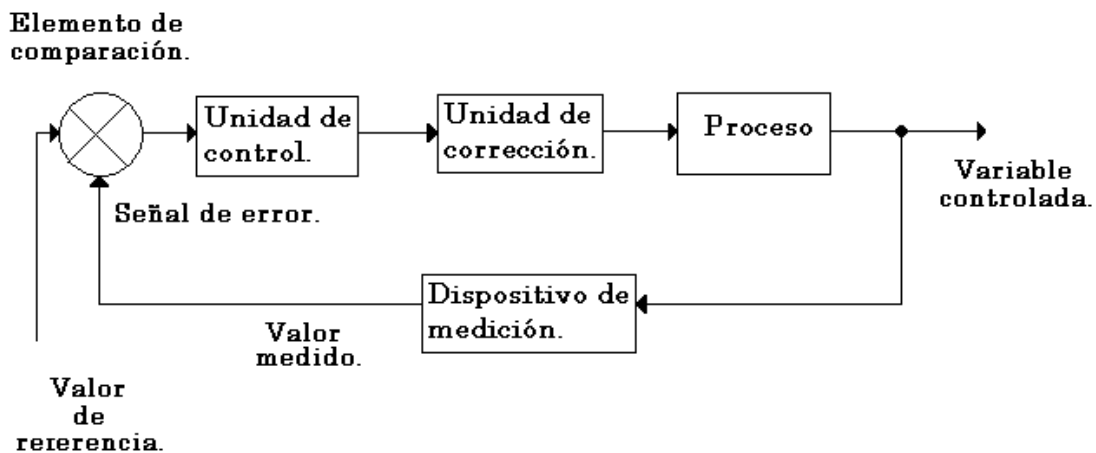


Fig. 4.1 Control de lazo cerrado. (retroalimentación).

Los sistemas en lazo abierto tienen la ventaja de ser relativamente sencillos, por lo que su costo es bajo y en general su confiabilidad es buena. Sin embargo, con frecuencia son imprecisos ya que no hay corrección de errores. Los sistemas en lazo cerrado tienen la ventaja de ser bastante precisos para igualar el valor real y el deseado. Pero son más complejos, costosos y con más probabilidad de descomposturas debido a la mayor cantidad de componentes. En esencia el control en lazo abierto es sólo un control de encendido-apagado, mientras que en los sistemas de control de lazo cerrado el *controlador* se usa para comparar la salida de un sistema con la condición requerida y convertir el error que de esa comparación resulte en una acción de control diseñada para reducir dicho error.

Como puede apreciarse en la figura 4.2 el sistema de control, a su vez esta formado por varios “subsistemas” o elementos:

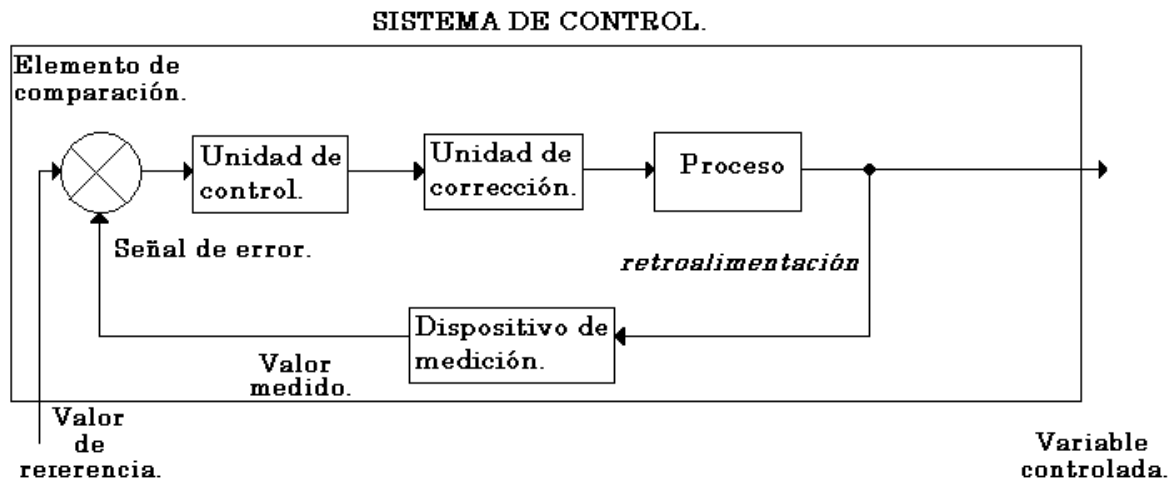


Fig.4.2 *sistema de control.*

- Elemento de comparación.
- Elemento de control.
- Elemento de corrección.
- Elemento de proceso.
- Elemento de medición.

El término control secuencial se usa cuando las acciones están ordenadas estrictamente de acuerdo con una secuencia definida por el tiempo o por los eventos. Un control como el anterior se obtiene mediante un circuito eléctrico que cuenta con grupos de relevadores o de interruptores operados por levas o circuitos combinacionales, que se conectan de manera que se produzca la secuencia deseada. En la actualidad es muy frecuente que este tipo de circuitos se reemplace por sistemas controlados por un microprocesador y con una secuencia controlada por un programa de software.

La secuencia de operación se conoce con el nombre de *programa*. La secuencia de instrucciones de cada programa está predefinida e “integrada” al controlador.

Actualmente, los microprocesadores reemplazan rápidamente a la mayoría de los controladores tradicionales (PI, PD, PID, etc.). Ofrecen la ventaja de que mediante su uso es factible emplear una gran variedad de programas. Muchos sistemas sencillos cuentan con un solo microcontrolador integrado, el cual es un microprocesador con memoria y todo integrado en un solo *chip* específicamente programado para llevar a cabo la tarea en cuestión. Los sistemas basados en microprocesador no solo han sido capaces de llevar a cabo tareas que antes eran “mecánicas”, sino que también pueden realizar tareas que no eran fáciles de automatizar.

El término *control digital directo* se usa cuando el controlador digital, básicamente un microcontrolador, controla el sistema de control en lazo cerrado.

Para el caso de este proyecto se propone el uso de un sistema de control digital directo utilizando un microcontrolador, y haciendo uso de la técnica de diseño conocida como “up/down” o jerárquica, la cual consiste en subdividir el sistema en su totalidad en subsistemas más pequeños y sencillos facilitando tanto su diseño como su implementación. Así el sistema de control del Hexápodo quedaría subdividido en los siguientes subsistemas:

- Sistema de decisión o control.
- Sistema de percepción o sensado.
- Sistema de acción o electrónica de potencia.

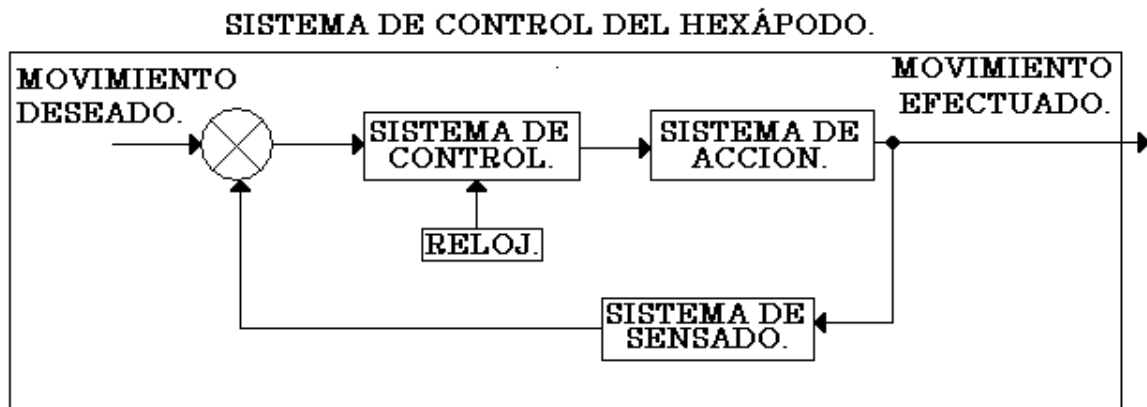


Fig. 4.3 Sistema de control del hexápodo.

Cabe mencionar que los microcontroladores trabajan en código binario y a las instrucciones escritas en código binario se les conoce como código de máquina y debido a su dificultad es necesario utilizar un lenguaje ensamblador que facilite su programación y por lo tanto su compilación (“traducción” a lenguaje máquina), los cuales varían de acuerdo al microcontrolador utilizado.

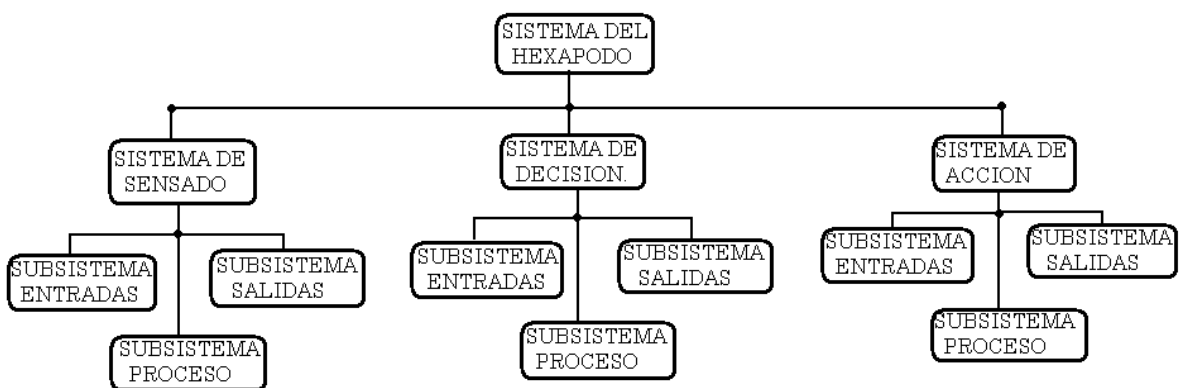


Fig. 4.4 .- Esquema de la estructura de diseño del hexápodo.

Diseño de estructuras jerárquicas.

Las estructuras jerárquicas incluyen varios esquemas de circuitos separados relacionados entre sí por un esquema principal, donde vendrán todos representados como símbolos de esquema y donde se indicarán las conexiones

eléctricas entre unos y otros a través de los correspondientes puertos de entrada/salida (ports); cuya estructura es la siguiente:

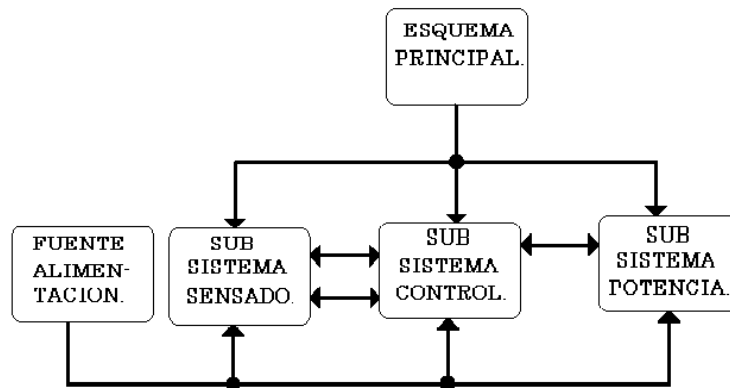


Fig. 4.5 .- Diseño jerárquico.

Donde cada uno de los sub-sistemas o circuitos es un sistema único e independiente de los demás pero que a su vez esta interconectado a uno o varios sistemas más; formando así un sistema jerárquico simple.

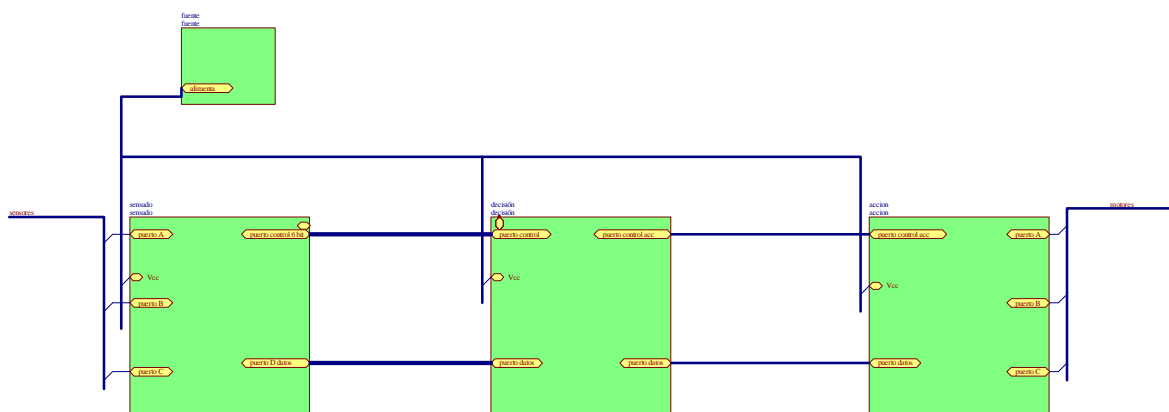


Fig.- 4.6.- Esquema principal del hexápodo.

Al conjunto de todos los sub-sistemas operando se le denomina sistema del hexápodo.

En la figura 4.4 puede apreciarse como es subdividido tanto el sistema del hexápodo; así como cada una de las divisiones subsecuentes; con el fin de simplificar su diseño; de igual forma su mantenimiento. Esta subdivisión también facilita la localización eficiente de fallas, componentes dañados y su sustitución.

4.2 PRINCIPIOS GENERALES DEL DISEÑO PCB.

De acuerdo con la norma UNE20-621-84, el circuito impreso se define como un modo de conexión de los elementos o componentes electrónicos por medio de pistas de cobre, normalmente adheridas a un soporte aislante rígido o flexible.

La placa o tarjeta de circuito impreso (PCB) suele ser una superficie plana de un espesor variable y normalmente de forma rectangular o cuadrada; está constituida por un material base o sustrato de tipo laminado rígido o flexible que sirve de soporte físico aislante para la colocación y soldadura de los componentes y trazado de las pistas conductoras de cobre. Actualmente los materiales más utilizados son: fibra de vidrio, politetrafluoretileno, PTFE-fibra de vidrio, PTFE-fibra de cerámica, termoplástico, resina epoxídica, resina de silicona, resina melamínica y diferentes mezclas entre ellos para mejorar las propiedades finales del sustrato.

Los tipos de PCB que actualmente se fabrican son:

Monocapa o simple cara.
Bicapa o doble cara.
Multicapa.
Multicapa cableados o multiwire.
Flexible multicapa.
Rígido flexible multicapa.
Tridimensional o MCB.

Toda placa de PCB posee dos caras llamadas:

Cara de componentes.- Donde se encuentran colocados los componentes y los conectores de entrada salida de la placa.

Cara de pistas.- Donde se encuentran las pistas conductoras impresas (tracks) y pad`s (superficies de contacto o soldadura).

Diseñar un circuito impreso consiste básicamente en transformar el esquema general del circuito en un plano real, que contemple la colocación y posición de los componentes, el trazado de todas las pistas de conexión eléctrica y sus puntos de contacto e interconexión, así como todas las entradas y salidas del circuito.

Por lo general el proceso de diseño PCB engloba tres grandes pasos:

- 1.- Generación de los encapsulados y conexionado de los componentes.
- 2.- Colocación de los componentes sobre la placa (placement) ya sea de forma manual o automática.
- 3.- Conexionado de los componentes mediante pistas de cobre, las cuales se trazarán en la medida de lo posible de forma automática (autorouting).

De forma global, el proceso combinado de placement y autorouting recibe el nombre de LAYOUT PCB.

El conexionado eléctrico de los elementos dentro de la PCB se realiza a partir de los siguientes elementos:

- Tracks.- Pistas de cobre adheridas al soporte aislante por donde circula la corriente del circuito.
- Pads.- Áreas de cobre para la soldadura de diversas formas; son un patrón para las impresiones de cobre, para la máscara de soldadura y para la aplicación de pasta o crema de soldar.
- Vías.- Agujeros pasantes metalizados, que permiten la conexión de pistas situadas en capas o caras distintas, realizado en la PCB mediante taladro de precisión.

En la tabla siguiente, se muestran las dimensiones mínimas para las diferentes clases de fabricación PCB.

Si el tipo de circuito lo requiere, podrá calcularse la resistencia de las pistas; en el gráfico siguiente se muestra la relación entre la anchura del conductor, su espesor, la temperatura y la resistencia por cada 10mm de longitud, tal como indica la norma UNE 20-621-84/3, relativa a diseño de circuitos impresos.

La máxima intensidad admisible en un conductor impreso (track) se puede determinar en función del incremento de temperatura. El gráfico siguiente muestra la relación entre los incrementos de temperatura y la corriente, para diferentes anchuras de pista, considerando un espesor de 35 micras, que resulta el más habitual.

La masa.- Es la señal más importante, ya que puede ser un problema debido a que todas las señales sobre el PCB fluyen a ella. Y a la hora de decidir el ancho de las pistas GND, hay que tener en cuenta la impedancia de las mismas; grandes corrientes sobre anchos de pista mínimos provocan altas resistencias, y a su vez estas altas resistencias ocasionan caídas de tensión mayores y diferentes en distintos lugares de la PCB.

Por lo tanto, se elegirán anchos de pista máximos, esto además tiene otra ventaja para altas frecuencias: la resistencia AC es baja.

Aún mejor que anchos de pista máximos resultan los planos de masa, que constituyen un área de cobre gigante que hace de tierra. Es factible crear áreas en ambas caras TOP y BOTTOM para la masa, alrededor de las pistas de señal ya trazadas; esto provoca una gran cantidad de conexiones a GND sobre la PCB, lo que a su vez actúa y refuerza el blindaje de la misma frente a interferencias externas; igualmente minimiza el ruido y el acoplamiento entre pistas.

Al igual que la masa, las pistas de los terminales de alimentación deberían tener la menor resistencia posible; hay que considerar igualmente la capacidad de corriente necesaria por la pista concreta. Además de las curvas correspondientes (impedancia y corriente), conviene recordar que la resistencia de una pista de cobre es función de la resistividad y de la geometría, esto es:

$$R = \rho L / S \quad (\rho = 1724 * 10^{-9} \text{ ohmios} * \text{metro}) \text{ en el cobre.}$$

Siendo L la longitud del tramo de pista, y S la sección de la misma. Igualmente la resistividad de Cu se incrementa con la temperatura, según la ecuación:

$$\rho = \rho(T_a) * [1 + \alpha (T - T_a)] \quad (T_a = 20^\circ \text{ C}; \rho(T_a) = 6787 * 10^{-9} \text{ ohm} * \text{metro})$$

4.2.1 COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA Y DIAFONÍA.

La radiación, conducción, emisión, ruido, interferencia o perturbación electromagnética es aquella que emana de los propios circuitos digitales de elevada frecuencia, y de los circuitos de potencia. Estas radiaciones suelen afectar a circuitos o equipos próximos alterando su correcto funcionamiento. Generalmente, las pistas portadoras de señales de alta frecuencia, las pistas de alimentación, las pistas y cables de entrada-salida, los dipolos magnéticos producidos por los bucles de corriente, los cables de interconexión y los back planes, son las mayores fuentes de interferencias electromagnéticas, debido principalmente a la longitud de sus pistas, y a los grandes bucles de corriente que se forman en ellas.

Actualmente las tarjetas de PCB que se fabriquen deberían cumplir la norma específica vigente en la Unión Europea: la directiva comunitaria EMC:CE92. Los modernos equipos de análisis y medida de compatibilidad electromagnética, pueden chequear las zonas conflictivas y el espectro de emisión para cualquier punto de la tarjeta.

En estos casos las recomendaciones a seguir son las siguientes:

- No usar zócalos para los circuitos integrados. En caso de ser necesario, utilizar zócalos de perfil bajo.
- Utilizar planos y rejillas de masa y positivo.
- Emplear en la medida de lo posible tarjetas multicapa.
- Diseñar un trazado lo más corto posible para las pistas de reloj, y siempre rodeadas de pistas de masa.

Por lo que se refiere al diseño para evitar el acoplamiento electromagnético entre pistas cercanas (diafonía), se define ésta como el efecto de acoplamiento y perturbación entre dos señales que se solapan y acoplan debido a la cercanía de las pistas por las que transita cada señal. La diafonía puede ser de tipo capacitivo o de tipo inductivo.

Las recomendaciones para diseñar un PCB evitando las diafonías son:

- Las pistas de señal deben tener una anchura mínima de 0.5mm.
- Utilizar placas de fibra de vidrio con baja constante dieléctrica.
- No trazar líneas de reloj junto a pistas portadoras de líneas de control de microprocesadores, reset, interrupciones, pistas de entrada/salida, etc.

- Procurar reducir la longitud común entre pistas paralelas y aumentar la distancia de separación entre ellas.
- No trazar nunca las pistas conectadas a circuitos lógicos, junto a las pistas conectadas a circuitos analógicos portadores de señales de bajo nivel.

Finalmente para eliminar las reflexiones producidas en las pistas portadoras de señal, y evitar que ésta se convierta en una señal deformada y enmascarada; es conveniente:

- Utilizar impedancias terminales de adaptación en pistas largas portadoras de señales de alta frecuencia.
- Eludir los trazados de pistas en forma de T o 90°.
- Procurar siempre que los cambios de dirección del trazado de la pista sean muy suaves y en semicírculo.
- Evitar que las pistas portadoras de señal de alta frecuencia y pistas de reloj, tengan que discurrir por vías que generan una discontinuidad de impedancia y sea causa de oscilaciones.

4.3 SISTEMA DE DECISIÓN.

Este sistema es el encargado de llevar a cabo el procesamiento de la información enviada por el sistema de percepción y el sistema usuario máquina. Es en este sistema donde se encuentran “programadas” las instrucciones y/o algoritmos requeridos para el control de acciones a realizar durante el funcionamiento del robot y que generalmente es basado en microprocesadores o microcontroladores.

Como se mencionó en el capítulo I el sistema de decisión es el sistema encargado de llevar a cabo el procesamiento de la información obtenida y enviada por el sistema de percepción (si este existe), al mismo tiempo se encarga de generar las señales de control pertinentes o requeridas para llevar a cabo la acción requerida por el sistema en su totalidad.

Implementando nuevamente la técnica “up/down” a este sistema tenemos que a su vez también esta conformado por tres subsistemas más que son subsistema de entradas, procesamiento de los datos de entrada y salida de los resultados del procesamiento, esto puede verse en la figura 4.8.

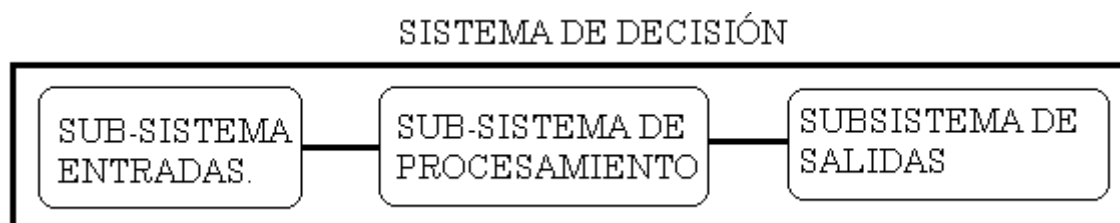


FIG. 4.8.- Diagrama a bloques del sistema de decisión.

Esta subdivisión estará contemplada dentro de la programación del dispositivo seleccionado; el cual es un microcontrolador; y el sistema de decisión

esta conformado únicamente por dicho dispositivo y sus elementos periféricos requeridos para su funcionamiento.

El esquema simplificado de este dispositivo, nos muestra el funcionamiento general del mismo; por un lado tenemos los datos provenientes del sistema de sensado, que se explicará más adelante como es que los envía, estos datos son recibidos por el subsistema entradas provenientes del sistema de decisión, y de ahí son enviados a el subsistema de procesamiento, donde en base a algoritmos previamente programados y establecidos generaran determinados resultados, los cuales serán enviados al subsistema de salidas y es ahí donde podrán ser exteriorizados del sistema de decisión.

Cabe mencionar que este sistema es también el encargado de controlar las acciones a realizar tanto por el sistema de sensado y del sistema de electrónica de potencia; a través de palabras de control, también llamados bytes de control de sensado y de acción respectivamente; dichas palabras de control son generadas desde el programa almacenado en la memoria del micro controlador.

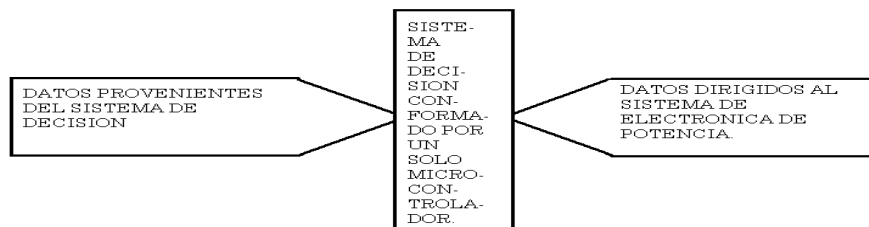


Fig. 4.9 .- Esquema simplificado del sistema de decisión.

Para este proyecto se decidió hacer uso de un microcontrolador de la casa Microchip modelo PIC16F877A, el cual, además de su relativo bajo costo y pertenecer a la gama media de microcontroladores (8 bit`s). Posee las siguientes características:

- 8 K x 14 palabras en la Memoria Flash Descargable y Re-programable En-Sistema (In-System).
- 368 bytes X 8 de Memoria RAM.
- 256 bytes X 8 de Memoria de datos EEPROM.
- 15 Fuentes de Interrupción.
- Dos Temporizadores / Contadores de 8-bits con contador de impulsos.
- Un Temporizador / Contador de 16-bits.
- Tres puertos de 8 bits, (B, C y D).
- Un puerto de 6 bits. (A).
- Un puerto de 3 bits (E).
- Puerto paralelo esclavo. (D).
- Dos módulos PWM de Comparación / Captura de 16-bits.
- Convertidor Analógico / Digital de 10-bits, 8-canales.
- Dos Comparadores Análogos.
- Canal Serial UART Programable.
- Interfaces seriales SPI e I2C Maestro.
- Temporizador Perro Guardián Programable.
- Detector de Baja Tensión.

- 33 Pines Entrada / Salida de propósito general.

Como puede verse a pesar de ser un microcontrolador de gama media (CPU de 8 bits), se considera a este modelo como un coloso dentro de la gama media, debido a su amplio soporte de periféricos. (Ver Apéndice A).

En las siguientes figuras se muestra el diagrama esquemático del sistema de decisión así como su placa de circuito impreso PCB.

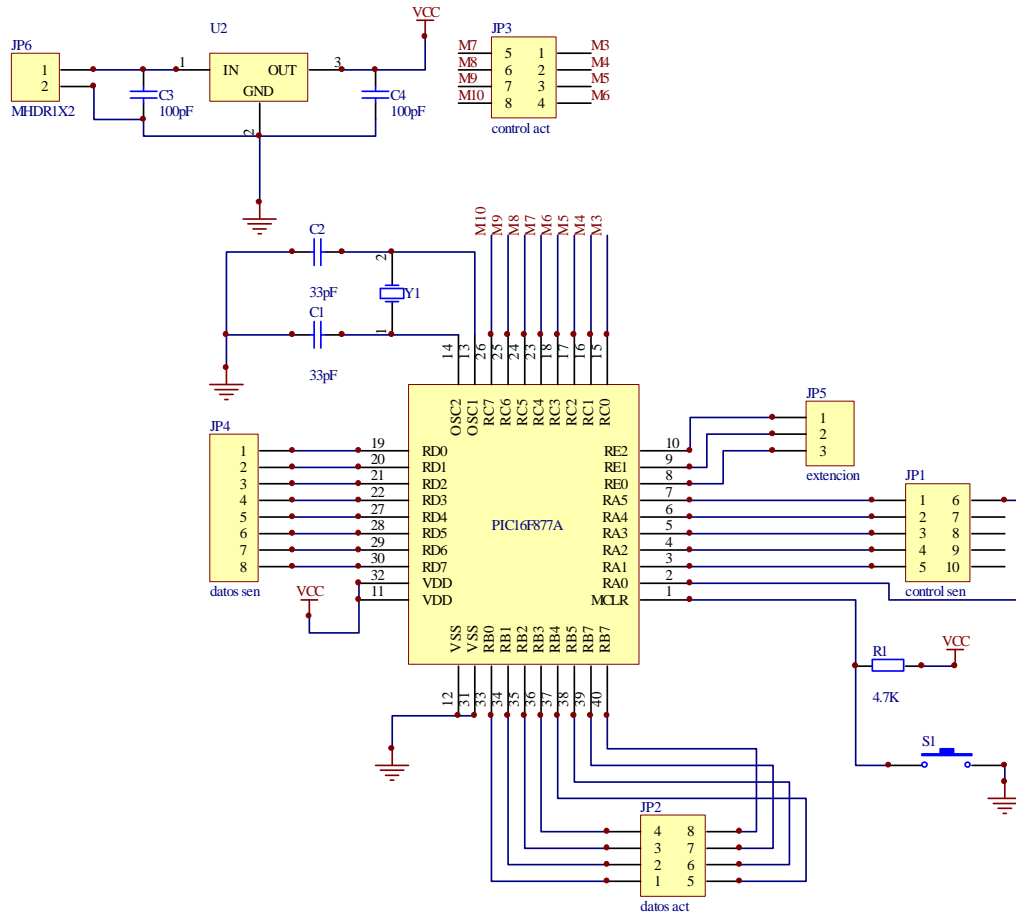


Fig. 4.10.- Diagrama esquemático de la tarjeta de decisión.

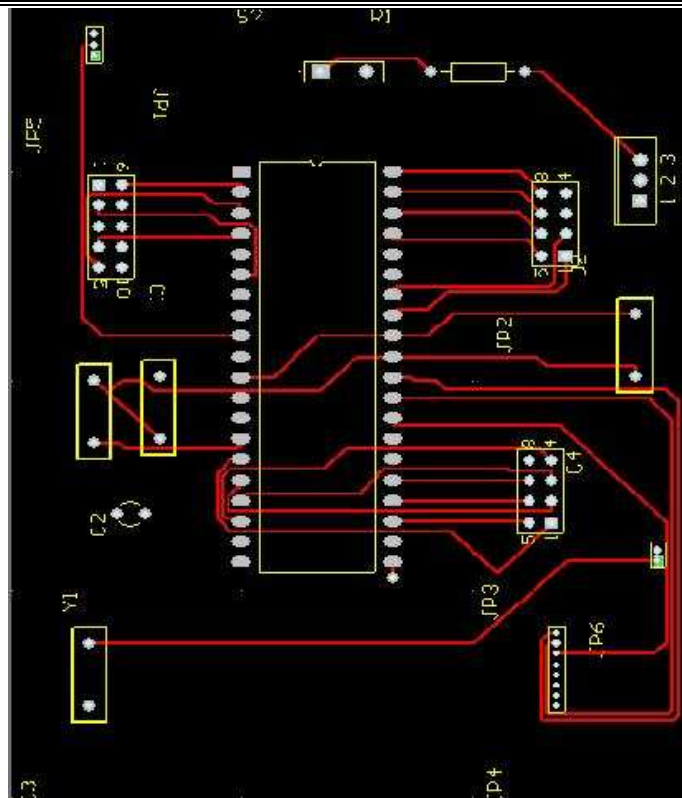


Fig.4.11.- Cara top del circuito.

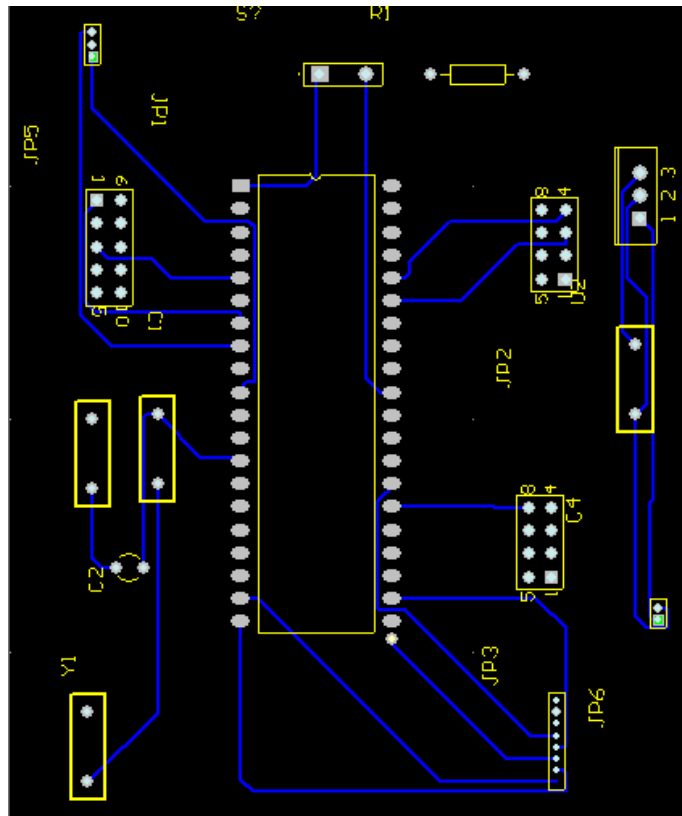


Fig. 4.12.- Cara de abajo del circuito.

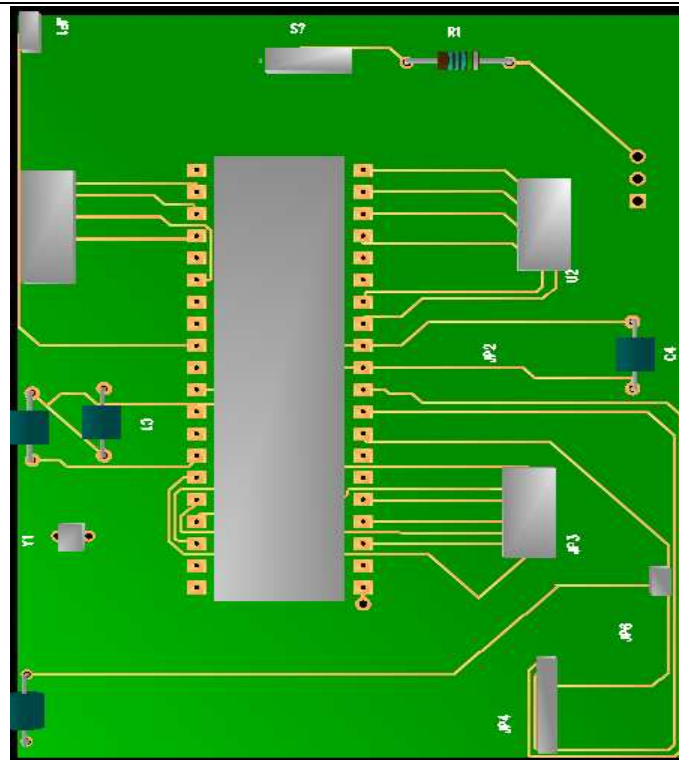


Fig. 4.13.- Vista 3D de la cara top del circuito.

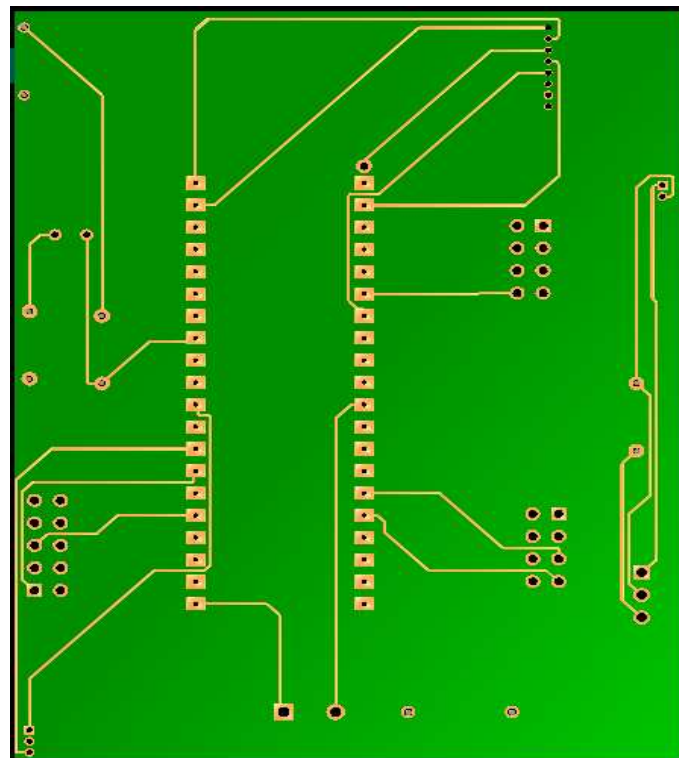


Fig. 4.14.- Vista inferior en 3D del circuito.

Como puede verse en el diagrama esquemático figura 4.10 la tarjeta de decisión consta de un jack de conexión para su alimentación de 5 voltios JP6, así como su regulador de voltaje, un PIC16F877 que es quien controla el funcionamiento total del Hexápodo, un circuito de RESET para el mismo y un

cristal resonador de 8 MHz para su funcionamiento con dos capacitores de 33 pF; así como la conexión a los puertos disponibles por medio de “pinheader” cuya descripción es la siguiente:

Puerta A.- consta de 6 bits, y es donde se obtienen la palabra de control dirigida al CI 8255 en la tarjeta de sensado.

MSB				LSB	
BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
RA5	RA4	RA3	RA2	RA1	RA0
A0	A1	/RD	/WR	/CS	RESET

Siendo este byte la palabra de control enviada hacia la tarjeta de sensado, siendo quien controla las acciones o eventos a realizar por parte de circuito integrado principal de la dicha tarjeta; la función de cada bit se describe a continuación.

A0 y A1: son los bits que seleccionan el puerto a leer o escribir según sea; es decir direccionan el puerto a ocupar ya sea el puerto A, el puerto B o el puerto C.

/RD: es el bit que controla las acciones de lectura del circuito integrado 8255, este se activa en estado lógico bajo, es decir con “0”.

/WR: es el bit que controla las acciones de escritura en los puertos del circuito integrado 8255 y se activa en estado lógico bajo.

/CS: es el bit habilitador de circuito integrado, si este bit no esta activo es como si el circuito integrado no estuviera polarizado, su activación es forzosa para cualquier tipo de operación mediante el 8255.

Puerta B.- consta de 8 bits, y es el puerto destinado al envío de datos hacia el 8255 de la tarjeta de electrónica de potencia.

MSB				LSB			
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
RD7	RD6	RD5	RD4	RD3	RD2	RD1	RD0
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Este byte es utilizado como un bus de datos; es decir como un canal de comunicación a través del cual circularán todos los datos enviados entre el sistema de decisión y el sistema de electrónica de potencia, sin importar a donde serán destinados por el integrado principal de la tarjeta de electrónica de potencia; que también es un 8255.

Puerta C.- consta de 8 bits, y forma la palabra de control dirigida a los actuadores o sistema de electrónica de potencia.

MSB				LSB			
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
RC7	RC6	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0
*	*	A0	A1	/RD	/WR	/CS	RESET

El funcionamiento de este byte es idéntico al byte conexasión al puerto A del PIC16F877A, siendo la diferencia que en vez de ser enviado al circuito integrado 8255 del sistema de sensado, este será enviado al circuito integrado 8255 del sistema de electrónica de potencia.

La notación (*) denota posición libre o pin sin conexión.

Puerta D.- consta de 8 bits, y es donde se envían y reciben los datos provenientes y hacia el CI 8255 en la tarjeta de sensado.

MSB				LSB			
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
RD7	RD6	RD5	RD4	RD3	RD2	RD1	RD0
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Este byte es utilizado como un bus de datos; es decir como un canal de comunicación a través del cual circularán todos los datos enviados entre el sistema de decisión y el sistema de sensado, sin importar a donde serán destinados por el integrado 8255 de la tarjeta de sensado.

Puerta E.- consta de 3 bits, y es un puerto disponible para futuras aplicaciones o expansiones.

MSB		LSB
BIT2	BIT1	BIT0
RE2	RE1	RE0
*	*	*

Las figuras 4.11 y 4.12 son respectivamente los diseños del circuito impreso de la cara superior (lado de los componentes) y cara de abajo (lado de las soldaduras; logrados con el software especializado en tarjetas de circuito impreso PCB PROTEL DXP; del cual se agrega un tutorial en el apéndice E.

Las figuras 4.13 y 4.14 son una muestra en tercera dimensión de cómo serían las tarjetas ya fabricadas, tanto en la cara superior como la cara de abajo del circuito. Estas imágenes fueron obtenidas con el mismo software de especialización.

Para la programación de este microcontrolador son necesarios los siguientes programas:

- MPLAB IDE v 8.10
- IC PROG v 1.05.
- PIC DEL v SP_1.

Los cuales serán explicados un poco más en la sección de programación de este mismo capítulo y para más detalles referirse al apéndice D que contiene pequeños tutoriales de los mismos.

El funcionamiento del sistema de decisión es el siguiente; una vez polarizado el sistema el PIC comenzará a ejecutar el programa grabado en su memoria; enviando a través del puerto RA, que es la palabra de control para el sistema de sensado, la instrucción u orden de lectura del primer puerto del circuito integrado 8255 del sistema de sensado; a su vez el sistema de sensado le enviará a través del puerto RD (bus de datos de sensado) el estado lógico actual del puerto A del integrado 8255 al momento de recibir la instrucción de lectura; este dato el PIC lo recibirá y lo revisará o comparará bit a bit para así determinar, según su programa interno, que acción deberá ejecutar a continuación; una vez determinada la acción a realizar el PIC enviará la instrucción u orden de escritura y dirección de puerto al sistema de electrónica de potencia a través del puerto RC, que es la palabra de control del sistema de electrónica de potencia, para enseguida enviar el dato necesario para la ejecución de la acción determinada a través del puerto RB, que es el bus de datos del sistema de electrónica de potencia. Una vez terminado este ciclo, se vuelve a comenzar el proceso pero en esta segunda ocasión el puerto a leer del sistema de sensado será el puerto B del circuito integrado 8255 del sistema de sensado, volviendo a repetir el ciclo con el puerto C; una vez concluido el recorrido de los tres puertos del sistema de sensado el proceso se repite desde el inicio y así continúa hasta no haber un evento de interrupción del programa, como lo es un obstáculo al frente del hexápodo.

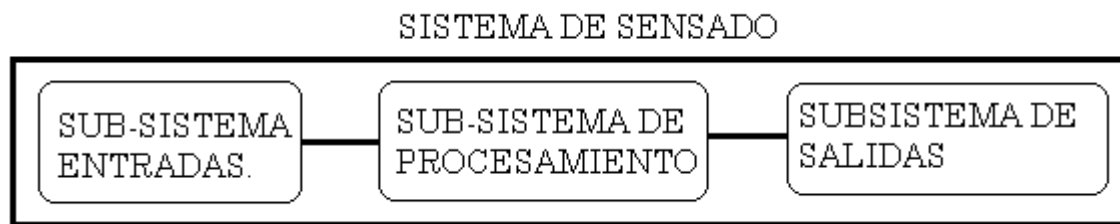
En resumen el sistema de decisión basado en el micro controlador PIC 16F877A utiliza su puerto RA como bus de control de acciones sobre el sistema de sensado mediante comandos, y utiliza su puerto RD como bus de datos de sensado; es decir como canal de información del estado de los sensores. Ocupa su puerto RC como bus de control sobre el sistema de electrónica de potencia y a su vez utiliza su puerto RB para el envío de información al sistema de electrónica de potencia.

Cabe aclarar que la diferencia entre bus de control y bus de datos radica en que en el bus de control se envían comandos o instrucciones que realizan determinadas funciones; mientras que en un bus de datos solo circula información.

4.4 SISTEMA DE SENSADO.

El sistema de sensado o percepción es el encargado de proveer información hacia el sistema de decisión, en otras palabras; es quien interrelaciona el medio físico o medio ambiente en conjunto con el estado o posición actual del cuerpo, con el “cerebro” del robot.

En este caso al igual que el sistema anterior, se hace uso de la técnica de diseño “up/down” el sistema de sensado se subdivide en tres sistemas más pequeños; que son subsistema de entradas, subsistema de procesamiento y subsistema de salidas.



El subsistema de entradas esta conformado por los sensores, y a su vez se divide en dos grupos; *sensores internos* y *sensores externos*.

Sensores internos.

Este grupo de sensores es quien le “informa” al sistema de decisión la posición relativa actual que tienen algunos puntos de referencia, como son las extremidades del hexápodo.

Los sensores propuestos para esta parte del sistema son los dos que se describen a continuación:

- Microswitch o push-button.- Estos dispositivos son de fácil obtención en cualquier electrónica, su funcionamiento es muy simple funcionan como laminillas de contacto que se encuentran normalmente abiertas; y su posicionamiento en el Hexápodo es en la parte inferior del eslabón R2 de manera que nos indique cuando la extremidad esta tocando el suelo o cuando la extremidad no tiene apoyo en el suelo. Su diagrama esquemático se muestra en la figura siguiente para la comprensión de su funcionamiento y alambrado.

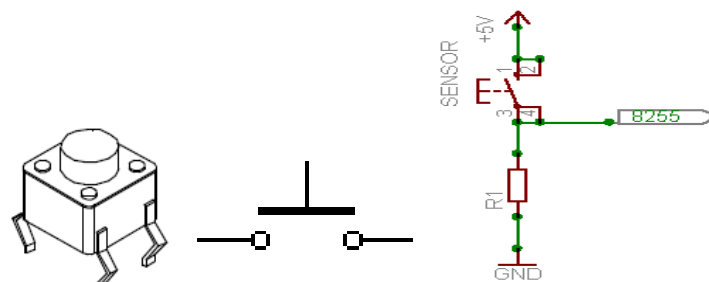


Fig.- 4.15.- Forma, símbolo y diagrama esquemático de los microswitch.

- Interruptores de rodillo.- Su funcionamiento y alambrado es exactamente igual al de los microswtch, pero su activación requiere

de mucho menos esfuerzo gracias a la palanca que ocupa, y en nuestro proyecto los ocuparemos para determinar si las extremidades se encuentran en posición avanzada o de retroceso.

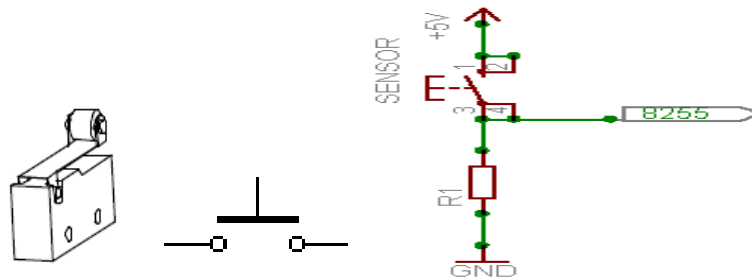


Fig. 4.16.- Forma, símbolo y diagrama esquemático de los interruptores de rodillo.

Con estos grupos de sensores se pretende conocer dos diferentes situaciones.

1.- Por medio de los push-button, fig. 4.15, conocer o saber en que momento y que extremidades se encuentran apoyadas firmemente sobre el suelo, para de esta manera identificar en que fase de la marcha nos encontramos y así poder decidir cual será la siguiente fase para desarrollar una marcha continua.

2.- Cómo los push-button nos indican que extremidades están posadas sobre el suelo, pero no nos indican que extremidades están hacia el frente del cuerpo y cuales hacia atrás, me es necesario conocer dichas posiciones como se mencionó en el capítulo III, por tal motivo se ocupan los sensores de rodillo fig. 4.16 colocados uno a cada lado de la extremidad. Para así identificar cuales de las extremidades se encuentran orientadas al frente del cuerpo y cuales atrás.

Funcionamiento de los sensores.- Cómo puede verse en las figuras 4.15 y 4.16 el funcionamiento es el mismo para ambos tipos de sensores, los dos son simplemente interruptores o apagadores; dicho de otra forma, cuando ambos dispositivos se encuentran presionados cierran el circuito permitiendo el paso de corriente; caso contrario a cuando se encuentran sin presión, equivalen a circuito abierto impidiendo el paso de corriente.

En el esquemático los sensores están representados por un switch, el cual al encontrarse abierto conecta al terminal o pin de los puertos de expansión del 82C55 a tierra por medio de la resistencia ocasionando con esto la lectura de un cero lógico (L), para el caso de encontrarse cerrado permitirá el paso de corriente ocasionando una caída de voltaje en la resistencia casi igual a la alimentación (Vcc), traduciéndose en una lectura de un uno lógico (H) para el 82C55.

Por tanto cada extremidad tendrá una palabra de estado de 3 bit's organizados de la siguiente forma:

MSB		LSB
Orientación delantera.	Orientación trasera.	Apoyo sobre el suelo.

1=si 0=no	1=si 0=no	1= si 0= no
--------------	--------------	----------------

La colocación de estos sensores se hará de la siguiente forma teniendo en cuenta la numeración propuesta en el capítulo III del presente trabajo.

EXTREMIDAD	BIT 2	BIT 1	BIT 0
1	Adelante	Atrás	Apoyo
2	Adelante	Atrás	Apoyo
3	Adelante	Atrás	Apoyo
4	Adelante	Atrás	Apoyo
5	Adelante	Atrás	Apoyo
6	Adelante	Atrás	Apoyo

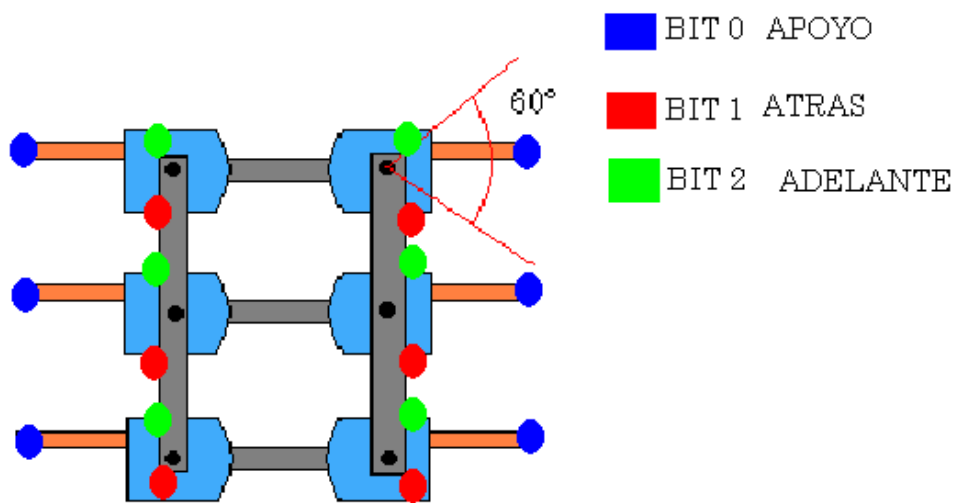


Fig.4.17.- Ubicación de los sensores en el cuerpo.

En la figura 4.17 se muestra la ubicación de los sensores sobre el cuerpo del robot, los cuales son en total dieciocho puntos de sensado y serán colocados en orden de acuerdo a las extremidades en la palabra de sensado; es decir la extremidad 1 ocupará los tres bits menos significativos de la palabra, la extremidad 2 los siguientes tres y así sucesivamente hasta llegar a la extremidad 6.

Sensores externos.

Este grupo de sensores es el encargado de “informar” al sistema de decisión si en su camino se localiza algún objeto que impida su avance en línea recta; es decir, le notifica si es necesario o no hacer un cambio de trayectoria y además en que dirección.

Los sensores propuestos para esta parte del sistema son los siguientes que se explican:

- Emisor infrarrojo.- Su adquisición es de baja dificultad y muy bajo costo, sus presentaciones son muy variadas, pueden ser en forma de led's, o estar encapsulados en micas con filtros de luz. La única dificultad que presentan es la relación directamente proporcional entre distancia de emisión y complejidad de alambrado, lo cual eleva un poco el costo. El dispositivo propuesto para la aplicación que requerimos es la de led emisor de infrarrojos de 5mm.

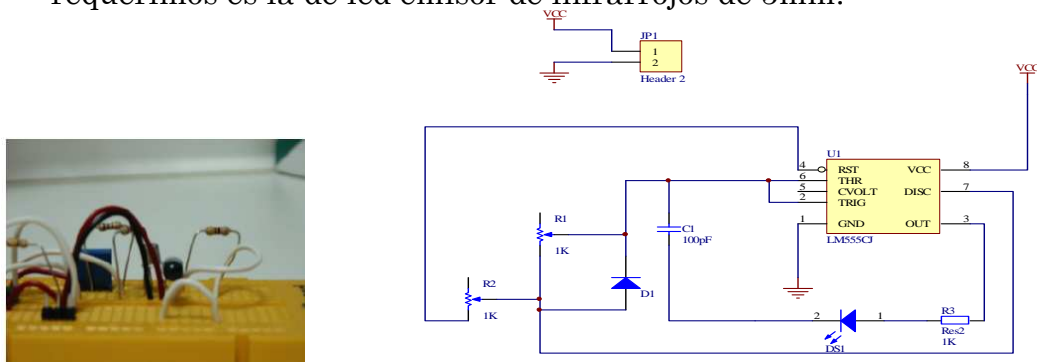


Fig. 4.18 y 4.19.- Alambrado en protoboard y esquemático del circuito modulador para infrarrojos.

- Receptor infrarrojo.- Es igual al dispositivo anterior en facilidad de adquisición, costo y complejidad de alambrado; pero su función es la contraria, realiza la detección de la incidencia de haz infrarrojo. El dispositivo propuesto es de la casa Sharp modelo IS1U60.



Fig. 4.20.- Fotografía del sensor infrarrojo IS1U60.

Funcionamiento.- La finalidad de estos circuitos es la de dotar al hexápodo de visión para que pueda ser capaz de librar y/o sortear en su camino obstáculos que puedan impedir su paso.

Su funcionamiento electrónico es muy sencillo; se basa en el principio de refracción de la luz; es decir, el circuito emisor de infrarrojos IR, como su nombre lo indica emite o envía un haz infrarrojo hacia el frente del hexápodo el cual al ser impactado en algún objeto será reflejado o rebotado en dicho objeto, este haz de retorno es el captado por el receptor infrarrojo RIR, causando un sensado del tipo si/no; es decir no podrá detectar que es lo que se encuentra frente al cuerpo del robot, sino sólo sabrá que hay algo enfrente del cuerpo del robot sin poder distinguir forma.

Tal y como se muestra en la figura 4.21, con el IS1U60 visto de frente, las patas de izquierda a derecha corresponden con Vout, GND y Vcc.



Fig. 4.21.- pinout del receptor infrarrojo

Cómo puede verse, este dispositivo unifica en el mismo encapsulado el receptor de luz infrarroja, una lente y toda la lógica necesaria para distinguir señales moduladas a una determinada frecuencia, 38Khz. Cabe mencionar que el pin de Vout será leído de forma digital y no de forma analógica, quedando sus valores de la siguiente forma; valor alto para cuando no hay objeto frente al cuerpo del robot y valor bajo para cuando si existe un objeto frente al cuerpo del robot.

Por ultimo cabe mencionar que el hecho de montar un emisor con modulación y un receptor con capacidad de recibir dicha modulación; es con el fin de evitar alguna lectura errónea en dicho sensado causada por el espectro de luz emitido en nuestra atmósfera.

Dentro de este mismo sistema (sensado), en el subsistema de procesamiento y subsistema de salidas, se propone la conexión de un CI 82C55A, el cual sirva como interfase entre dicho sistema y el sistema de decisión.

Entre sus aplicaciones actuales podemos comprobar como el 8255 se encuentra con facilidad en tarjetas de expansión de puertos para el bus ISA del PC, ya que simplifica enormemente la elaboración de la placa de circuito impreso aportando suficiente potencia de control. Es también ideal para expansión de puertos E/S en monoplacas o gestión de periféricos como conversores analógico/digital y otros.

El 8255 se encapsula en formato DIP de 40 terminales como es habitual en los controladores del *chipset* 8086. Existen cinco grupos de señales, además de los dos terminales de alimentación.

El integrado 82C55A es un dispositivo de propósito general de entrada / salida I/O programable y que puede ser utilizado en conjunto con diferentes microcontroladores; y que posee las siguientes características:

- Alimentación de 5V.
- 2 puertos de 8 bits programables como entrada/salida. (A y B).
- 2 puertos de 4 bits programables como entrada/salida (C parte alta y C parte baja).
- 1 bus de datos bidireccional.
- 6 líneas de control. (RD, WR, A1, A0, CS, RESET).
- 3 modos de funcionamiento programables en software.

La configuración o pinout del CI 82C55A se muestra en la figura siguiente:

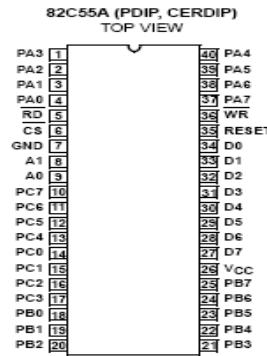


Fig. 4.22.- Configuración del CI 82C55A.

Una característica que merece mención por separado es que la compatibilidad del 82C55A con TTL hace necesaria la eliminación de resistencias pull-up en las salidas del CI; para mayores detalles referirse al apéndice B.

La figura 4.23 muestra el circuito esquemático del sistema de sensado ya incluyendo todos los componentes propuestos en su totalidad.

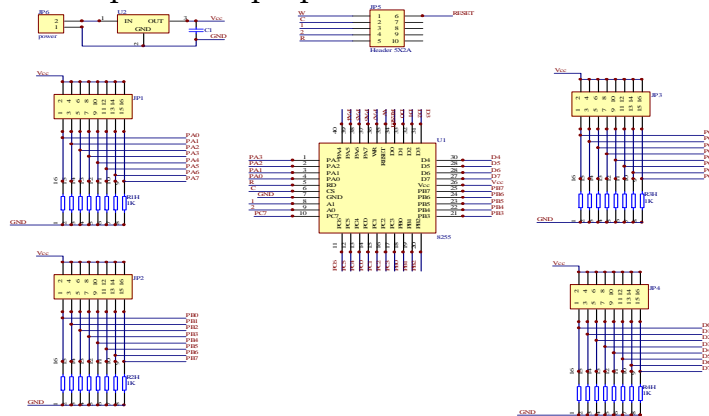


Fig. 4.23.- Diagrama esquemático del sistema de sensado.

La placa de circuito impreso PCB y su diagrama esquemático del sistema de sensado se presenta a continuación en las figuras 4.13 y 4.14.

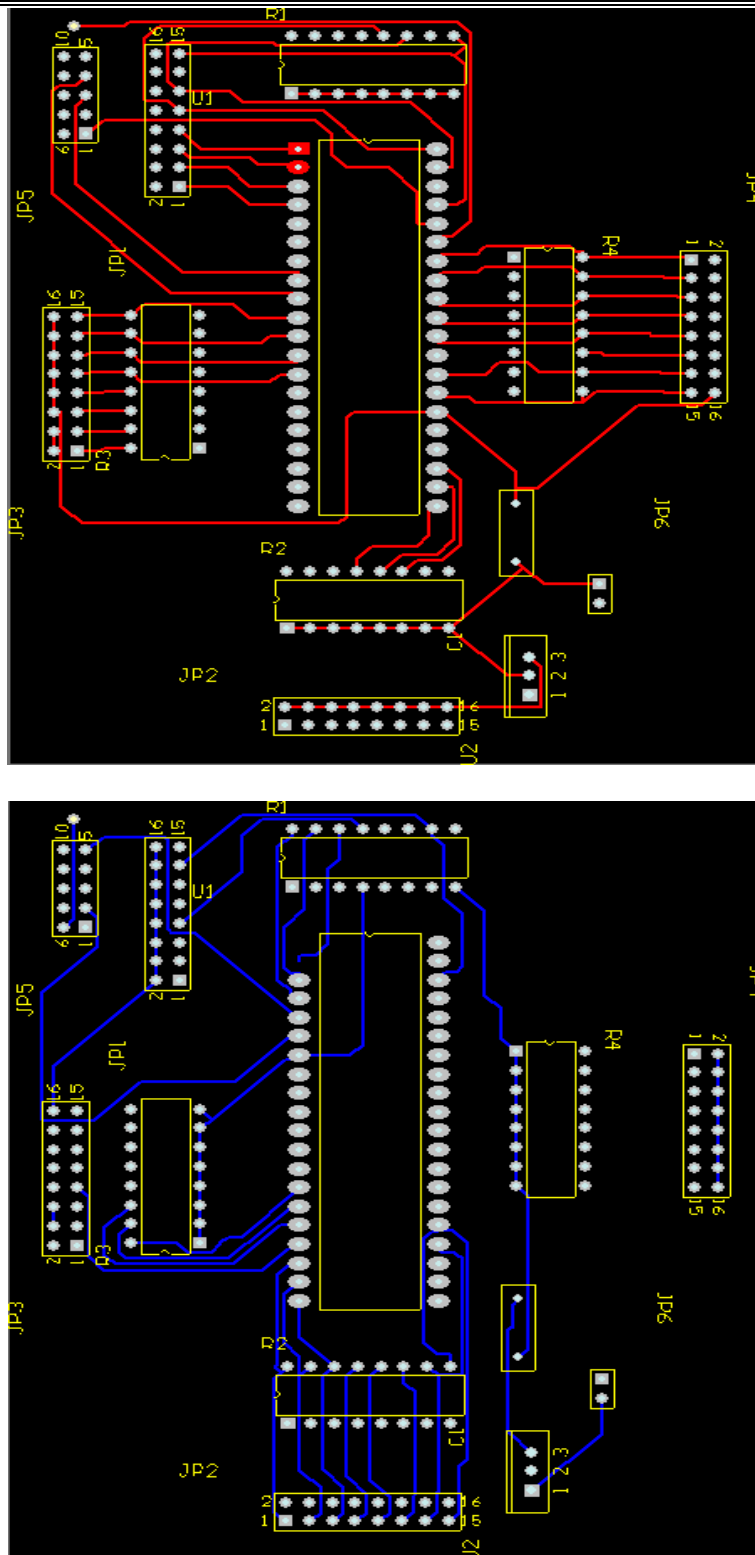


Fig. 4.24 y 4.25.- Muestra de la tarjeta de sensado (rojo cara inferior y azul cara superior).

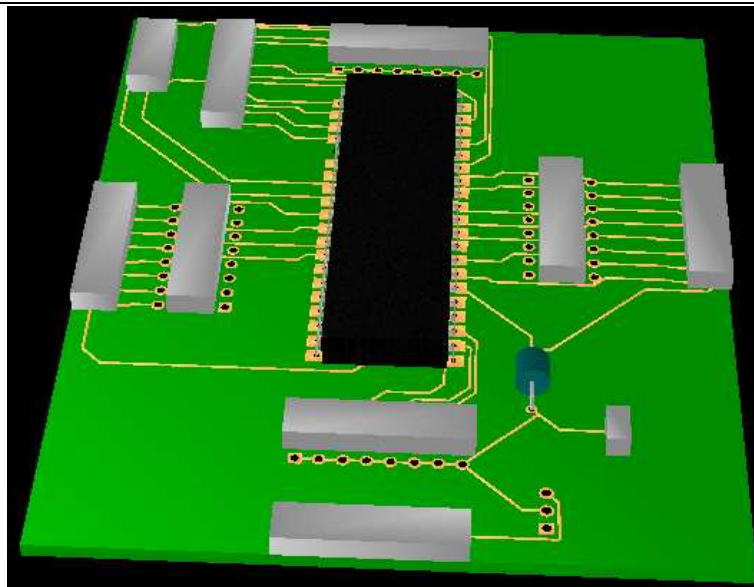


Fig. 4.26.- Muestra en tercera dimensión de la tarjeta de sensado

Funcionamiento.- El 82C55 es conocido coloquialmente como un expanzor de puerto de 8 bit`s en 3 puertos de 8 bit`s; es decir, mediante un único bus de 8 bit`s es capaz de direccionar hasta tres buses de 8 bit`s; ver apéndice B; estos puertos de expansión se conocen como puerto A, puerto B y puerto C cada uno de 8 bit`s, y es en ellos donde se propone recibir los datos de estado provenientes de los sensores tanto internos como externos; mediante las líneas de control que posee (forman el subsistema de procesamiento), es posible direccionar uno de los tres puertos hacia su bus de datos (subsistema de salidas), en donde podrá ser leído por el sistema de decisión.

Debido a su capacidad de direccionamiento (24 bit`s, ver apéndice B), nos da la posibilidad de conectar hasta 24 sensores en el cuerpo del robot, en grupos de 8 bit`s, para poder enviados mediante su bus de datos.

Como se vió en la sección del subsistema de entradas para el sistema de sensado el grupo de sensores internos ocupa 18 bit`s, lo cual nos deja con la posibilidad de agregar hasta 6 receptores infrarrojos, esto dependerá de las necesidades o aplicaciones del robot; lo recomendable es usar la mayor cantidad posible de ellos para así tener una mayor referencia del campo frente a nuestro robot.

Su forma de trabajo es de la siguiente forma; mediante una palabra de control que es enviada por el micro controlador PIC16F877A el circuito integrado 8255 se programara en la forma o modo de lectura, paso siguiente seleccionará el puerto A, en ese momento el valor presente en el dicho puerto será trasladado al bus de datos del 8255, medio a través del cual se enviaran los datos hacia el micro-controlador PIC16F877A para su procesamiento; nuevamente el 8255 recibirá la orden o instrucción de direccionar el puerto B y completará el proceso nuevamente hasta pasar por el puerto C y así continuar repitiendo el ciclo hasta que por medio del micro-controlador se cambie la orden o instrucción.

Básicamente este sistema es un sistema de re-direccionamiento de datos en lazo abierto, ya que ejecutará las instrucciones si y solo si el micro-controlador envíe la palabra de control requerida, de no ser así, este sistema seguirá realizando la función que se le halla indicado con anterioridad.

La distribución de bit de los puertos expandidos (puertos A, B y C del 8255) es la siguiente:

	MSB							LSB
	7	6	5	4	3	2	1	0
A	E ₁₁	E ₁₂	E ₄₁	E ₄₂	E ₅₁	E ₅₂	F _{R1}	F _{R2}
B	E ₂₁	E ₂₂	E ₃₁	E ₃₂	E ₆₁	E ₆₂	F _{L1}	F _{L2}
C	E ₁₃	E ₂₃	E ₃₃	E ₄₃	E ₅₃	E ₆₃	F _{R3}	F _{L3}

Con fines de evitar confusiones a cada byte se le da el nombre de palabra de sensado quedando la matriz de distribución de bit's de la siguiente forma:

	MSB							LSB
	7	6	5	4	3	2	1	0
S1	E ₁₁	E ₁₂	E ₄₁	E ₄₂	E ₅₁	E ₅₂	F _{R1}	F _{R2}
S2	E ₂₁	E ₂₂	E ₃₁	E ₃₂	E ₆₁	E ₆₂	F _{L1}	F _{L2}
S3	E ₁₃	E ₂₃	E ₃₃	E ₄₃	E ₅₃	E ₆₃	F _{R3}	F _{L3}

La nomenclatura ocupada se hace referencia a las extremidades que monitorean, por ejemplo, E₁₁ hace referencia por la E a una extremidad, el primer subíndice identifica a la extremidad uno, el segundo subíndice hace referencia a la posición del sensor, en este caso al sensor ubicado al final del desplazamiento al frente de la extremidad uno; si fuese E₂₃ se referiría a la extremidad dos sensor tres y así sucesivamente.

De esta forma como el 8255 solo puede leer por puertos completos, ya sabremos que bit's esta monitoreando al leer cada uno de los puertos; es decir al mandar a leer el byte S1 ya sabremos que en ese byte solo encontraremos información sobre las extremidades 1, 4 y 5 así como de los sensores frontales derechos 1 y 2.

4.5 ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

En este circuito es donde se logra, en base a la palabra de control enviada por el microcontrolador también llamada vector de movimiento, los desplazamientos necesarios para lograr la marcha estable del Hexápodo.

Este sistema se vuelve totalmente necesario debido a la demanda de corriente provocada por nuestros actuadores; que como se ha mencionado a lo largo del proyecto son motores de CD; de ser conectados directamente a nuestro microcontrolador, este último sufriría un daño irreparable haciendo totalmente necesaria su sustitución y esto sucedería cada que alguno de nuestros motores comenzará a funcionar, elevando significativamente el costo del proyecto.

Comúnmente en estos sistemas de potencia se encuentra un CI conocido como drive de motores; los cuales se basan en el principio del puente H.

El funcionamiento del puente H es el que se muestra en la figura siguiente y funciona como se describe en párrafo siguiente:

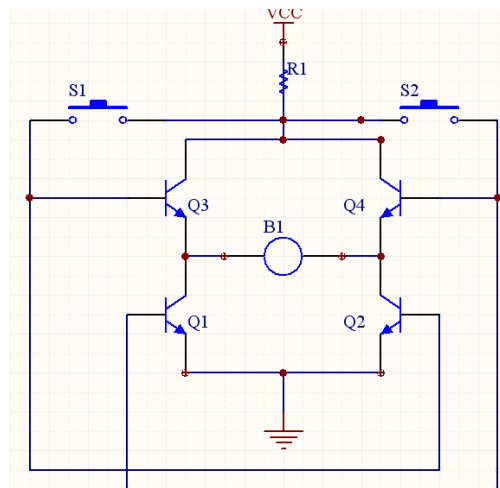


Fig. 4.27.- Diagrama en puente H.

Como es conocido para cambiar el sentido de giro de un motor de CD basta con intercambiar la polaridad en sus bornes lo cual provoca que el motor gire en sentido contrario; esto es lo que busca en circuito de puente H ocupando 4 transistores. Suponiendo S1 cerrado y S2 abierto, en la figura se puede apreciar que Q1 y Q4 se van a saturación mientras que Q2 y Q3 quedan en corte, con lo cual el borne izquierdo del motor queda a Vcc y el borne derecho del motor queda a tierra ocasionando el giro del mismo en un sentido; ahora, suponiendo S2 cerrado y S1 abierto Q2 y Q3 se van a saturación mientras que Q1 y Q4 quedan en corte, haciendo que el borne izquierdo del motor quede a tierra y el borne derecho quede a Vcc ocasionando el giro del motor en sentido contrario al caso anterior, la tabla de verdad de este circuito se muestra a continuación.

S1	S2	Q1	Q2	Q3	Q4	FUNCION
0	0	CORT	CORT	CORT	CORT	NO AVANCE
0	1	CORT	SAT	CORT	SAT	GIRO EN 1er. SENTIDO
1	0	SAT	CORT	SAT	CORT	GIRO SENTIDO
1	1	SAT	SAT	SAT	SAT	CONTRARIO
						CORTO CIRCUITO.

Tabla 4.1.- tabla de verdad del circuito puente H.

Para el caso de nuestro proyecto, por ser demasiados motores como se vio en el capítulo anterior (12 motores), de los cuales 6 deben funcionar en ambos sentidos y 6 en uno solo, se ha decidido hacer uso de 6 CI L293D de la casa SGS-Thomson microelectronic, cuyo manual se presenta en el apéndice C; los cuales tienen la capacidad de manejar 2 motores en su sentido de giro al mismo tiempo, y así podremos satisfacer las necesidades de alimentación y control en los motores de actuación.

De los 6 L293D que se ocuparán se propone la siguiente distribución; 3 destinados al sistema de avance-retroceso y 3 al sistema de ascenso-descenso, en estos últimos no será necesario controlar su sentido de giro debido al mecanismo propuesto en el capítulo anterior.

Las características de estos CI son las expresadas a continuación:



Powerdip (12+2+2)

Fig. 4.28.- Encapsulado del L293D.

- Capacidad de salida de 600mA por canal.
- Salida de 1.2A de pico de corriente no repetitivo por canal.
- Fácil Habilitación.
- Protección contra sobre-temperatura.
- Entrada lógica de voltaje “0” hasta 1.5V
- Alta inmunidad al ruido.
- Diodos protectores internos.

El L293D es un integrado monolítico de alto voltaje, manejador de cuatro canales de alta corriente, diseñado para aceptar el estándar de niveles lógicos TTL y manejar cargas inductivas, así como conmutar transistores de potencia. Esta encapsulado en un empaque DIP 16

El diagrama esquemático de este sistema se muestra en la siguiente figura.

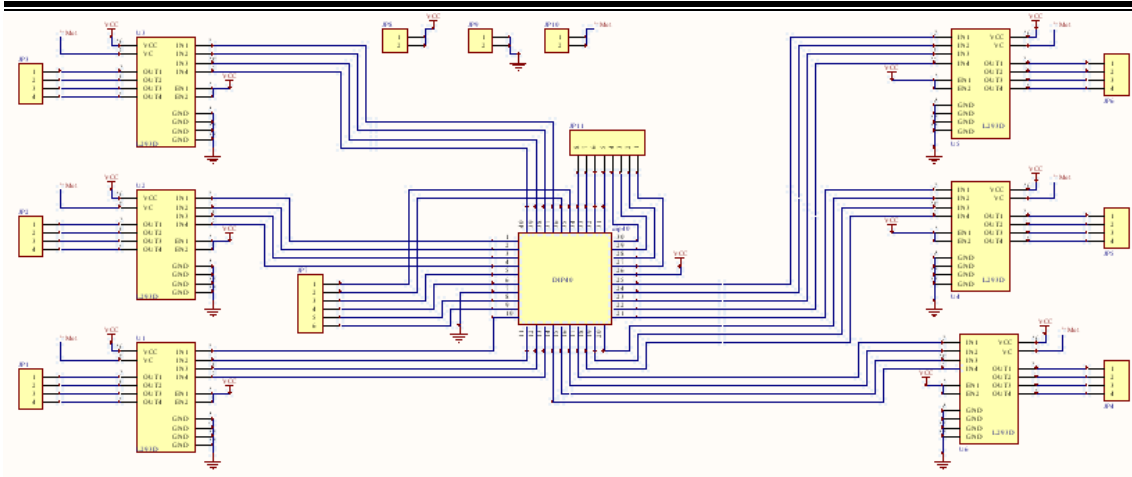


Fig. 4.29.- Diagrama Esquemático del sistema de electrónica de potencia.

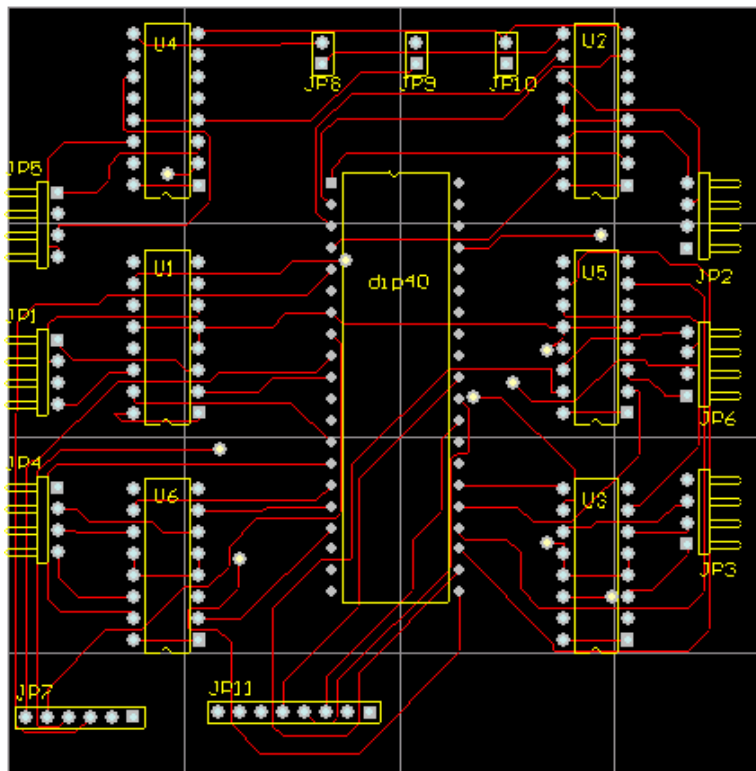


Fig. 4.30.- Ruteado de la cara TOP del circuito de electrónica de potencia.

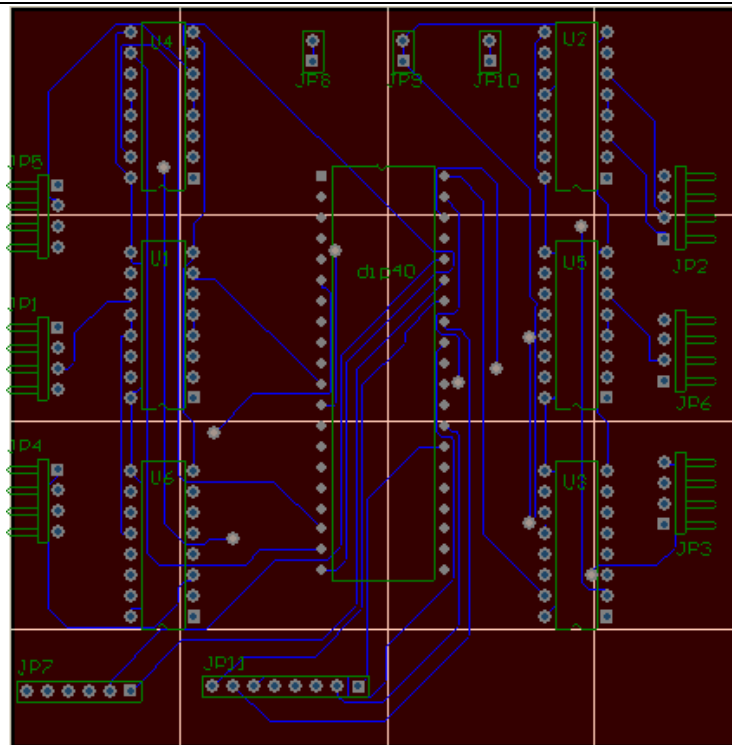


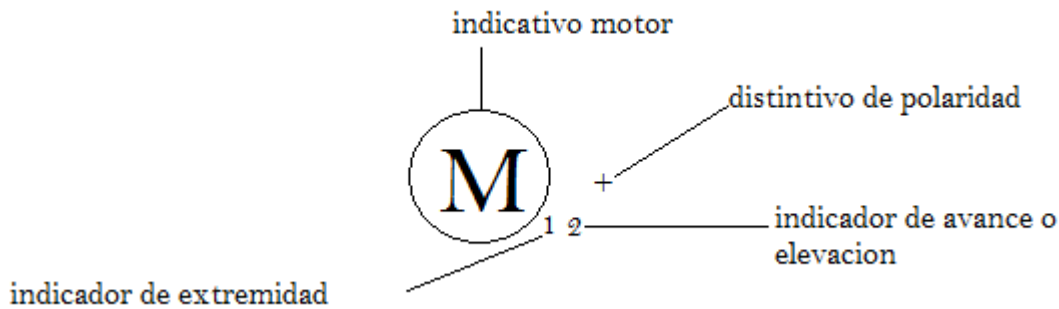
Fig. 4.31.- Ruteado de la cara *BOTTOM* del circuito de electrónica de potencia.

El funcionamiento de este sistema es muy similar al del sistema de sensado, está basado en un controlador de periféricos PIA 8255 que hace la función de multiplexado o manejador de datos, este recibe en su puerto de instrucciones las ordenes provenientes de la tarjeta de decisión que le indican a cual de sus tres puertos de salida debe enviarlos, ya sea puerto A, puerto B o puerto C; una vez colocados los datos en estos puertos pasan a los manejadores de motores que son necesarios debidos a la alta demanda de corriente que ocupan los motores, corriente que terminaría por quemar los terminales del 8255 ya que aunque tiene compatibilidad con TTL su máxima entrega de corriente por pin es de 15mA, y los motores requieren de 500 mA para su funcionamiento. La matriz de conexionado de los manejadores de motores y de los motores se especifica a continuación.

MATRIZ DE CONTROL DE MOTORES.

	7	6	5	4	3	2	1	0
A1	M ₁₁₊	M ₁₁₋	M ₄₁₊	M ₄₁₋	M ₅₁₊	M ₅₂₋	M ₂₂₊	M ₂₂₋
A2	M ₂₁₊	M ₂₁₋	M ₃₁₊	M ₃₁₋	M ₆₁₊	M ₆₁₋	M ₃₂₊	M ₃₂₋
A3	M ₁₂₊	M ₁₂₋	M ₄₂₊	M ₄₂₋	M ₅₂₊	M ₅₂₋	M ₆₂₊	M ₆₂₋

De la matriz anterior la nomenclatura ocupada es la siguiente:



Donde el indicador de polaridad es una marca para indicar el sentido de giro del motor el signo (+) indica giro en sentido de las manecillas del reloj y el signo (-) indica giro en sentido inverso, el indicador de avance establece si dicho motor sirve para avanzar la extremidad o para elevarla siendo el número (1) el indicativo para avances y el número (2) para elevación, y por último el indicador de extremidad que nos dice en que extremidad está colocado el motor.

Así se puede observar que la matriz de manejo de motores esta acomodada en grupos de acción para su fácil y rápida lectura y ejecución, su estructuración esta considerada para el primer byte formado por el puerto A el grupo de motores destinados al levantamiento de las extremidades 1, 4 y 5 y un el motor destinado al levantamiento de la extremidad 2; el puerto B esta destinado al control de avance de las extremidades 2, 3 y 6 y el motor destinado al levantamiento de la extremidad 3; el puerto C esta destinado al control de levantamiento de las extremidades 1, 4, 5 y 6.

De esta forma el dispositivo 8255 principal elemento de la tarjeta de electrónica de potencia queda ocupado en su totalidad al igual que los manejadores de motores L293D.

4.6 FUENTE DE PODER.

Como todo sistema electrónico el Hexápodo requiere de una fuente de alimentación, y como uno de los requerimientos del proyecto es propuesta de un sistema robótico autónomo. Para ello, la alimentación propuesta de ser proporcionada desde baterías dentro de él.

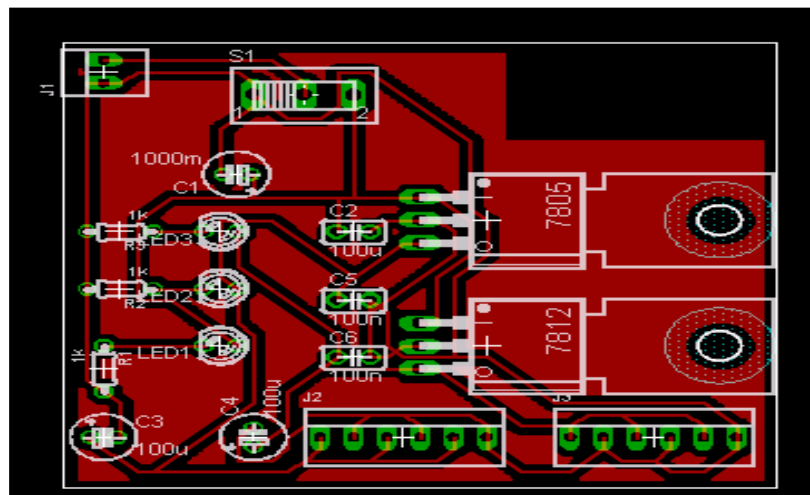
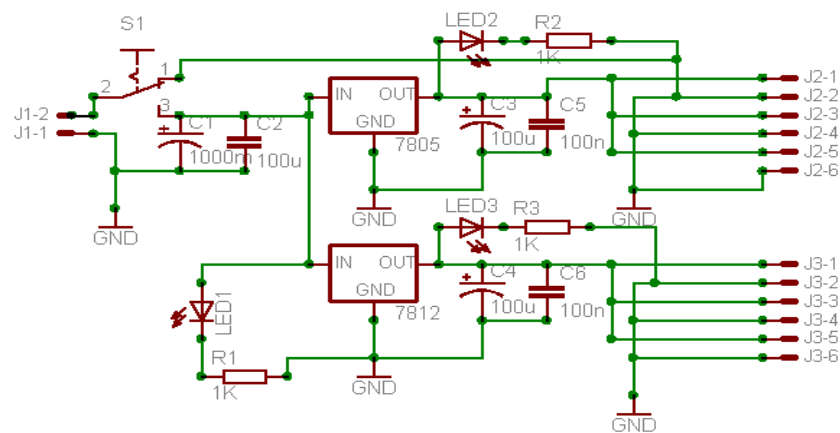
Para poder dimensionar correctamente las baterías, es necesario hacer un estudio previo del consumo del Hexápodo. Este está formado por múltiples componentes electrónicos que no estarán funcionando en todo momento, por lo que saber el consumo real del mismo resulta imposible; por tal motivo se tendrá que hacer una consideración a la alza; es decir, considerando que todos los dispositivos consumen al mismo tiempo.

ELEMENTO	CONSUMO	
MOTORES DE CD.	0,3W a 12V X 12	0,3A
ELECTRONICA	APROX. 0,8A	0,8A
TOTAL		1,1A

Se obtiene un consumo máximo de 1.1 Amperios; cabe señalar que este sería el consumo si todos nuestros motores de CD se encontraran funcionando, lo cual no sucederá así; por ende el consumo baja de manera muy considerable casi un 40% lo cual se traduce en una mayor autonomía.

El sistema de alimentación elegido es una batería recargable de níquel-cadmio de 12 V a 2,000 mAh.

La etapa de alimentación consiste, además de las baterías en un arreglo de electrónica que permite obtener las diferentes tensiones de alimentación requeridas por el sistema, así también como las etapas de filtración suficientes para impedir la mayor inclusión de ruido al sistema.



En las figuras 4.19 y 4.20 se pueden observar el diagrama esquemático y la tarjeta de circuito impreso, respectivamente.

El funcionamiento es el siguiente; el conector J1 es donde se conecta la batería, los capacitares C1 y C2 son nuestra primer etapa de filtrado eliminando las posibles perturbaciones ocasionadas por la fuente de voltaje; los CI 7805 y 7812 son reguladores de voltaje fijos a 5 y 12 voltios respectivamente, en ellos se logra obtener las tensiones requeridas por todos los componentes restantes de nuestro sistema como son 5V para la electrónica en general y 12V

para nuestros actuadores; inmediatamente a su salida podemos ver la siguiente etapa de filtrado, una para cada tensión requerida, esto por alguna perturbación de ruido ocasionada por los mismos reguladores por su naturaleza de circuitos integrados, después de cada etapa de filtrado se obtienen tres tomas de cada tensión con sus respectivas tierras cada una; el LED1 es el indicador del sistema en funcionamiento, los LED's 2 y 3 indican el funcionamiento de las tensiones de 5 y 12 voltios respectivamente, todo el sistema cuenta con un interruptor S1 para la desconexión de la batería a el sistema.

4.7 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 continúa. 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 16F877A.

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.

4.8 PROGRAMACIÓN.

Para lograr la programación en forma correcta de nuestro PIC es recomendable tener primeramente bien definido la secuencia de pasos o procesos a seguir según los objetivos que se quieran alcanzar; eso nos obliga primeramente a decidir nuestros objetivos.

El primer objetivo que proponemos alcanzar es dotar al hexápodo de una singular forma de marchar conocida como marcha trípode; aunque con anterioridad se expuso la cantidad de marchas posibles que se pueden adoptar con un hexápodo, recomendamos esta por su simplicidad relativa y alta estabilidad; pero a pesar de ello también comentaremos los requerimientos para una marcha secuencial de extremidades contiguas.

La marcha trípode consta de mover las seis extremidades divididas en dos grupos de tres extremidades cada uno; la disposición de las extremidades integrantes de cada grupo debe de formar un triangulo de estabilidad o soporte; para de esta manera brindar en todo momento un centro de gravedad a nuestro robot; referirse al capítulo III.

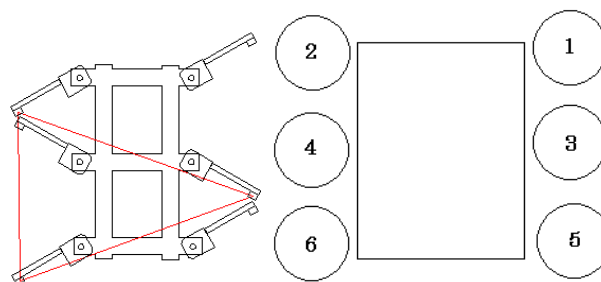


Diagrama de extremidades y triangulo de estabilidad.

Con esta disposición de extremidades es posible considerar al hexápodo como un bípedo; lo cuál simplifica en mucho nuestra matriz de fases de marcha, la cuál quedaría de la siguiente forma.

	Extremidad1	Extremidad2	Extremidad3	Extremidad4	Extremidad5	Extremidad6
Fase1	1	1	1	1	1	1
Fase2	0	1	1	0	0	1
Fase3	1	1	1	1	1	1
Fase4	1	0	0	1	1	0

Matriz de fases considerada como bípedo.

Véase como la matriz nos representa levantamientos de extremidades simultáneos, lo que para programar nos simplifica enormemente. De aquí se deduce la siguiente matriz de marcha simplificada.

	Grupo 1 (1-4-5)	Grupo 2 (2-3-6)
Fase 1	0	1
Fase 2	1	0

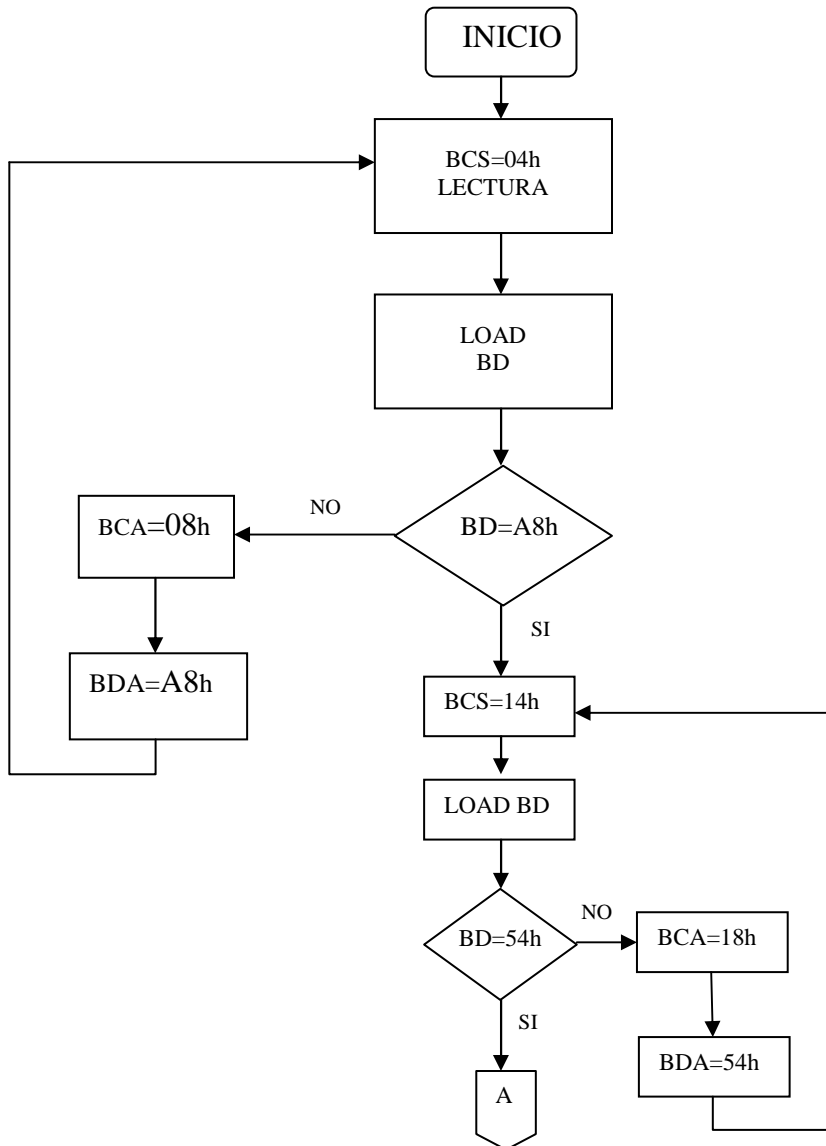
Matriz simplificada.

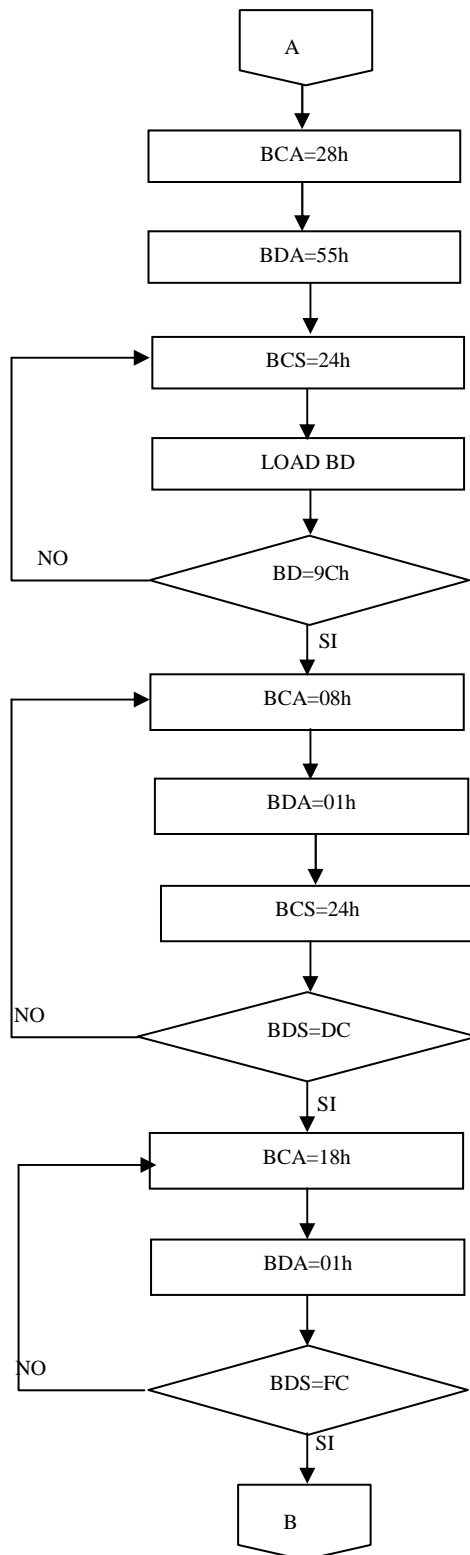
Una vez establecido el tipo de marcha que haremos y la forma en la que lo haremos, el siguiente paso es elaborar nuestro diagrama de flujo.

NOTA: A estas alturas ya se debe haber identificado un problema para nuestro tipo de marcha seleccionado; el cuál es que para que nuestra marcha pueda funcionar de forma adecuada debe tener en posición correcta las extremidades en un principio y así poder iniciar la marcha.

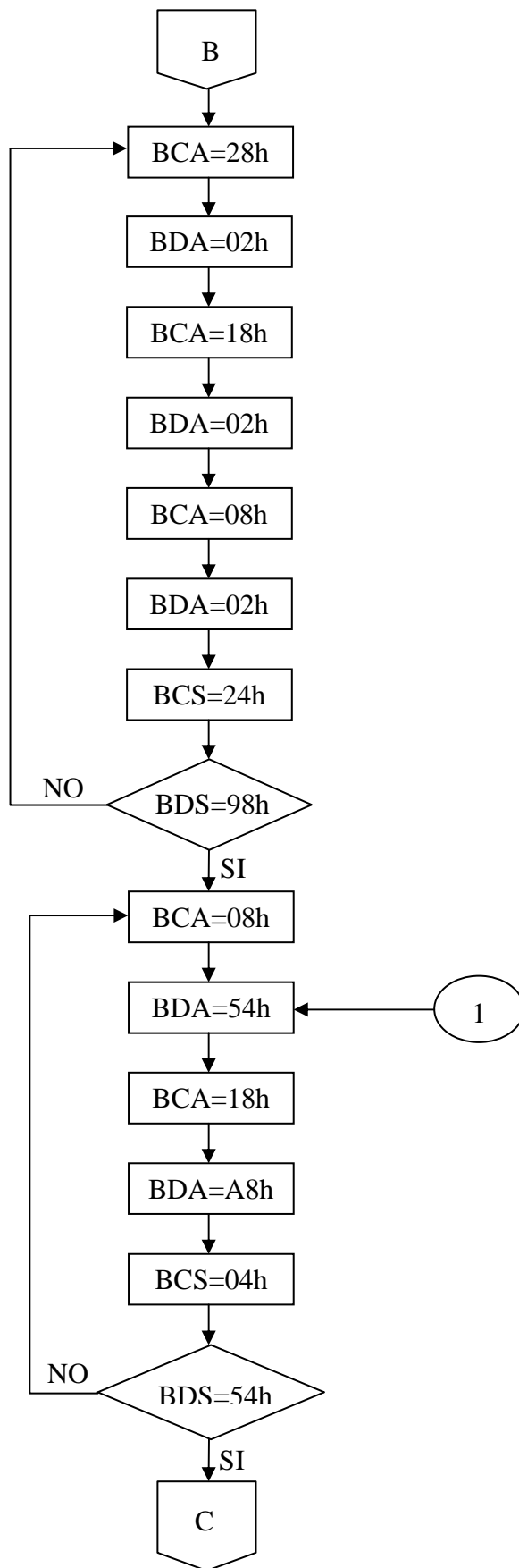
Ya estructurado nuestro plan entonces el siguiente paso es elaborar el diagrama de flujo que representa la secuencia de acciones a seguir por nuestro robot.

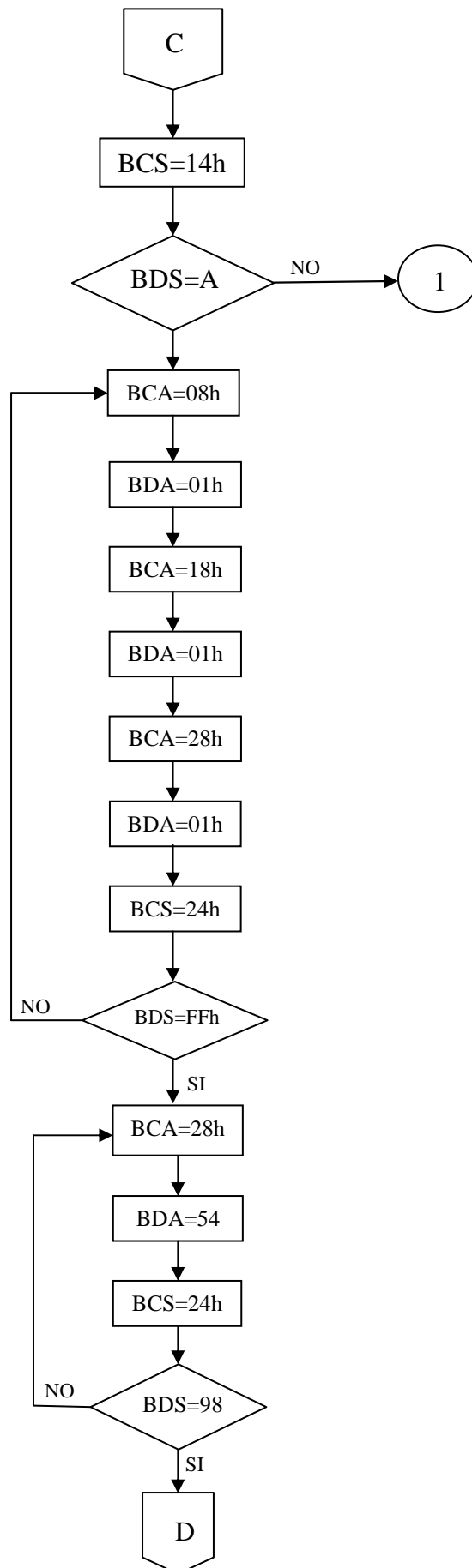
DIAGRAMA DE FLUJO DE PREPARACIÓN DE MARCHA DEL HEXÁPODO.

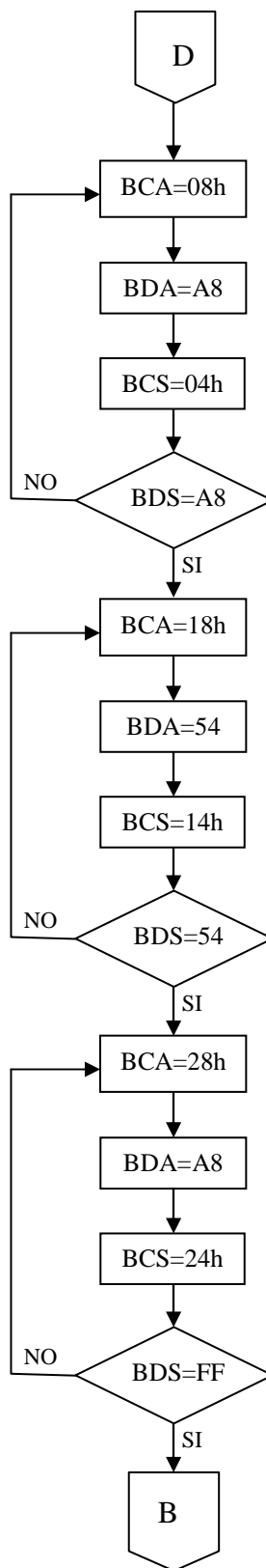




SECUENCIA DE CAMINADO TRIPODE







Una vez realizado nuestro diagrama de flujo el siguiente paso se vuelve más sencillo, este paso es la traducción a lenguaje ensamblador; que no es otra cosa más que traducir el diagrama de flujo en sentencias que puedan ser interpretadas por el programa compilador y a su vez este pueda ser traducido a lenguaje maquina y así poder ser grabado a la memoria interna del micro controlador.

Para poder hacer esta traducción es necesario tener a la mano el manual del procesador a utilizar ya que en el se encuentra el set de instrucciones que ocupa; también es necesario conocer las operaciones que puede realizar el mismo para así relacionar el proceso de secuencia.

En nuestro caso el set de instrucciones a utilizar consta de treinta y cinco instrucciones disponibles para el funcionamiento optimo del mismo, de las cuales diez y ocho son orientadas a byte's, cuatro orientadas al trabajo con bit's y trece a trabajo con literales o valores directos.

En proceso de traducción es muy importante conocer los registros de función especial y de uso general con que cuenta el PIC; en el manual del mismo se encuentra un listado de los registros existentes y de función especial, y aunque en esta propuesta no haremos uso de todos los registros si mencionaremos algunos de los más necesarios para el buen funcionamiento del hexápodo.

Para el conocimiento de los registros primeramente comenzaremos por mencionar que el mapa de memoria del PIC 16F877A consta de cuatro bancos de memoria que se nombran banco 0, banco 1, banco 2 y banco 3.

Comenzando por el banco 0 los registros que ocuparemos del son los puertos de salida, PORTA, PORTB, PORTC, PORTD y PORTE, aquí también se encuentra el registro STATUS el más importante para el estado del PIC; cuana también con 96 registros de propósito general.

En el banco uno se encuentran los registros de configuración de los puertos que son los TRISA, TRISB, TRISC, TRISD y TRISE ; aquí también se encuentran los registros STATUS y 80 registros de propósito general.

En los bancos dos y tres se localiza nuevamente el registro STATUS y 192 registros de propósito general entre ambos bancos de memoria.

Una vez comentado esto es suficiente para adentrarnos en la programación del PIC, teniendo en cuenta que de tener alguna duda debemos tener siempre a la mano el manual tanto del PIC como de cada uno de los dispositivos a ocupar en el proyecto, dichos manuales se agregan en el apéndice al final del trabajo.

LISTADO DE PRGRAMACION PARA EL HEXÁPODO.

```

;*****PROGRAMA DE MARCHA DEL HEXAPODO*****
;NOMBRE DEL PROYECTO: HEXAPODO EXPLORADOR
;AUTOR: VICTOR ALAIN PEREZ SALAZAR
;PIC16F877A
;VELOCIDAD DE RELOJ 4 MHz
;=====
LIST P=PIC16F877A
;=====
;*****DECLARACION DE REGISTROS*****
STATUS EQU 0x03
PORTA EQU 0x05
PORTB EQU 0x06
PORTC EQU 0x07
PORTD EQU 0x08
PORTE EQU 0x09
TRISA EQU 0x85
TRISB EQU 0x86
TRISC EQU 0x87
TRISD EQU 0x88
TRISE EQU 0x89
CONTSEN EQU 0x20
CONTACT EQU 0x21
DATSEN EQU 0x22
DATACT EQU 0x23
;*****DECLARACION DE BIT'S*****
RP0 EQU 5
Z EQU 2
DC EQU 1
C EQU 0
;*****INICIO*****
;VECTOR DE RESET
ORG 0x00
GOTO INICIO
;=====
;VECTOR DE INTERRUPCION
ORG 0x04
GOTO DESVIACION
;=====
;PROGRAMA PRINCIPAL
INICIO BSF RP0; STATUS ;CAMBIA AL BANCO 1
MOVLW 0x00
MOVWF TRISA;CONFIGURA EL PUERTO A COMO SALIDA
MOVWF TRISB;CONFIGURA EL PUERTO B COMO SALIDA
MOVWF TRISC;CONFIGURA EL PUERTO C COMO SALIDA
MOVLW 0xFF
MOVWF TRISD; CONFIGURA EL PUERTO D COMO ENTRADA
BCF RP0, STATUS ; CAMBIA AL BANCO CERO
;=====
;PREPARACION DE LA MARCHA
PREPA145 MOVLW 0x04
MOVWF PORTA; DIRECCIONA LA TARJETA DE SENSADO
MOVF PORTD,0; ADQUIERE EL DATO PRESENTE EN PUERTO D
BCF STATUS,2;INDICADOR DE CERO NO ESTE ACTIVADO
BCF STATUS,1;
BCF STATUS,0 ;
MOVWF DATSEN;
SUBLW 0xA8;
BTFSC STATUS,2;
GOTO PREPA236;
MOVLW 0x08; CARGA EN W EL DATO 08
MOVWF PORTC;CONFIGURA LA TARJETA DE ACCION
MOVLW 0x48; CARGA EL DATO 48 EN W
MOVWF PORTB;
GOTO PREPA145;

```

```

PREPA236  MOVLW 0x14 ; CARGA EL DATO 14 EN W
           MOVWF PORTA;
           MOVF PORTD,0;
           BCF STATUS,2;
           BCF STATUS,1;
           BCF STATUS,0 ;
           MOVWF DATSEN;
           SUBLW 0x54;
           BTFSC STATUS,2;
           GOTO LOW145;
           MOVLW 0x18 ; CARGA EN W EL DATO 18
           MOVWF PORTB;
           GOTO PREPA236;
LOW145    MOVLW 0x28 ; CARGA EL DATO 28 EN W
           MOVWF PORTC;
           MOVLW 0x55 ;CARGA EL DATO 55 EN W
           MOVWF PORTB ;
DOS       MOVLW 0x24 ;CARGA EN W EL VALOR DE 24
           MOVWF PORTA
           MOVF PORTD,0 ; LEE EL PUERTO D
           BCF STATUS,2 ; DESPEJA EL INDICADOR ZERO
           MOVWF DATSEN ;
           SUBLW 0x9C ;
           BTFSC STATUS,2 ;
           GOTO LOW236
           GOTO DOS
LOW236    MOVLW 0x08 ; CARGA EL VALO DE 08 EN W
           MOVWF PORTC ; DIRECCIONANDO LA TARJETA DE ACTUACION
           MOVLW 0x01 ; CARGA EL DATO DIRECTO 01 EN W
           MOVWF PORTB ; MANDA EL DATO A TRAVES DEL BUS
           MOVLW 0x24;CARGA EL DATO DIRECTO 24
           MOVWF PORTA ; DIRECCIONA LA TARJETA DE SENSADO
           MOVF PORTD,0
           BCF STATUS,2
           MOVWF DATSEN
           SUBLW 0xDC
           BTFSC STATUS,2
           GOTO TRES
           GOTO LOW236
TRES      MOVLW 0x18
           MOVWF PORTC
           MOVLW 0x01
           MOVWF PORTB
           MOVF PORTD,0
           BCF STATUS,2
           SUBLW 0xFC
           BTFSC STATUS,2
           GOTO MARCHA
           GOTO TRES
;=====
MARCHA TIPO TRIPODE
MARCHA    MOVLW 0x28
           MOVWF PORTC
           MOVLW 0x02
           MOVWF PORTB
           MOVLW 0x18
           MOVWF PORTC
           MOVLW 0x02
           MOVWF PORTB
           MOVLW 0x08
           MOVWF PORTC
           MOVLW 0x02
           MOVWF PORTB
           MOVLW 0x24
           MOVWF PORTA
           MOVF PORTD,0
           BCF STATUS,2

```

```

MOVWF DATSEN
SUBLW 0x98
BTFSC STATUS,2
GOTO CON1
GOTO MARCHA
CONT1    MOVLW 0x08
MOVWF PORTC
MOVLW 0x54
MOVWF PORTB
CONTA    MOVLW 0x18
MOVWF PORTC
MOVLW 0xA8
MOVWF PORTB
MOVLW 0x04
MOVWF PORTA
MOVF PORTD,0
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0x54
BTFSC STATUS,2
GOTO CONT2
GOTO CONT1
CONT2    MOVLW 0x14
MOVWF PORTA
MOVF PORTD,0
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0x08
BTFSC STATUS,2
GOTO CONT3
GOTO CONTA
CONT3    MOVLW 0x08
MOVWF PORTC
MOVLW 0x01
MOVWF PORTB
MOVLW 0x18
MOVWF PORTC
MOVLW 0x01
MOVWF PORTB
MOVLW 0x28
MOVWF PORTC
MOVLW 0x01
MOVWF PORTB
MOVLW 0x24
MOVWF PORTA
MOVF PORTD,0
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0xFF
BTFSC STATUS,2
GOTO CONT4
GOTO CONT3
CONT4    MOVLW 0x28
MOVWF PORTC
MOVLW 0x54
MOVWF PORTB
MOVLW 0x24
MOVWF PORTA
MOVF PORTD,0
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0x98
GOTO CONT5
GOTO CONT4
CONT5    MOVLW 0x08
MOVWF PORTC
MOVLW 0xA8

```



```

MOVWF PORTB
MOVLW 0x04
MOVWF PORTA
MOVF PORTD
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0xA8
BTFSC STATUS,2
GOTO CONT6
GOTO CONT5
CONT6 MOVLW 0x18
MOVWF PORTC
MOVLW 0x54
MOVWF PORTB
MOVLW 0x14
MOVWF PORTA
MOVF PORTD,0
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0x54
BTFSC STATUS,2
GOTO CONT7
GOTO CONT6
CONT7 MOVLW 0x28
MOVWF PORTC
MOVLW 0xA8
MOVWF PORTB
MOVLW 0x24
MOVWF PORTA
MOVF PORTD,0
BCF STATUS,2
MOVWF DATSEN
SUBLW 0xFF
BTFSC STATUS,2
GOTO MARCHA
GOTO CONT7
END
=====
SUBROUTINA DESVIACION
DESVIACION MOVLW 0x04
MOVWF PORTA;
MOVF PORTD,0;
BCF STATUS,2;
BCF STATUS,1;
BCF STATUS,0 ;
MOVWF DATSEN;
SUBLW 0xA8;
BTFSC STATUS,2;
GOTO REV1;
MOVLW 0x08; CARGA EN W EL DATO 08
MOVWF PORTC;
MOVLW 0x48; CARGA EL DATO 48 EN W
MOVWF PORTB;
GOTO DESVIACION;
REV1 MOVLW 0x14 ; CARGA EL DATO 14 EN W
MOVWF PORTA;
MOVF PORTD,0;
BCF STATUS,2;
BCF STATUS,1;
BCF STATUS,0 ;
MOVWF DATSEN;
SUBLW 0x54;
BTFSC STATUS,2;
GOTO REV2;
MOVLW 0x18 ; CARGA EN W EL DATO 18
MOVWF PORTB;
GOTO REV1;

```

```

REV5      MOVLW 0x28 ; CARGA EL DATO 28 EN W
          MOVWF PORTC;
          MOVLW 0x55 ;CARGA EL DATO 55 EN W
          MOVWF PORTB ;
REV3      MOVLW 0x24 ;CARGA EN W EL VALOR DE 24
          MOVWF PORTA ;
          MOVF PORTD,0 ;
          BCF STATUS,2 ; DESPEJA EL INDICADOR ZERO
          MOVWF DATSEN ;
          SUBLW 0x9C ;
          BTFSC STATUS,2
          GOTO REV2
          GOTO REV3
REV2      MOVLW 0x08 ; CARGA EL VALO DE 08 EN W
          MOVWF PORTC
          MOVLW 0x01 ; CARGA EL DATO DIRECTO 01 EN W
          MOVWF PORTB ; MANDA EL DATO A TRAVES DEL BUS
          MOVLW 0x24;CARGA EL DATO DIRECTO 24
          MOVWF PORTA ; DIRECCIONA LA TARJETA DE SENSADO
          MOVF PORTD,0
          BCF STATUS,2
          MOVWF DATSEN
          SUBLW 0xDC
          BTFSC STATUS,2
          GOTO REV4
          GOTO REV2
REV4      MOVLW 0x18
          MOVWF PORTC
          MOVLW 0x01
          MOVWF PORTB
          MOVF PORTD,0
          BCF STATUS,2
          SUBLW 0xFC
          BTFSC STATUS,2
          RETFIE
          GOTO DESVIACION
    
```

CONCLUSIONES

Durante la realización de esta propuesta de tesis que lleva por tema “PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA ROBÓTICO TIPO HEXÁPODO DESDE UN PUNTO DE VISTA MECATRÓNICO” he podido darme cuenta de la complejidad de los sistemas, cuestión que contrasta con la facilidad de su elaboración, dicha dificultad radica en la dedicación de tiempo de trabajo al proyecto; es decir, la electromecánica es tan sencilla o difícil de cómo uno la quiera hacer.

El sistema mecánico a decir verdad queda muy poco desarrollado; ya que la idea central del proyecto era la de realizar un replicante, pero en cuestiones mecánicas ha quedado muy austero, lo cual permite una gran gama de posibilidades de re-estructuración. A lo largo del diseño mecánico siempre se pensó en un sistema exoesqueleto; pero al final creo que lo más conveniente sería un sistema endoesqueleto ya que este tipo de estructura facilita más su crecimiento; así como su mantenimiento.

Una opción que dejo para la siguiente persona que retome este proyecto es la de dotar al hexápodo de una articulación corporal que simule la articulación del dorso de los insectos; lo que lo provee de una mayor adaptación a terrenos sinuosos.

A pesar del diseño mecánico poco robusto, el hexápodo queda considerado como un robot de exploración de gran aplicación, con una muy aceptable capacidad de desplazamiento y evasión de obstáculos en terrenos hostiles donde la vida humana se vea peligrada y se requiera la adquisición de datos ambientales y geográficos, aplicables a la estrategia militar o civil.

La aplicación de la técnica “up / down” al proyecto en los sistemas electrónicos colabora con la sencillez de diseño sin dejar de lado la proyección a futuro; esto conlleva a que en un futuro sea más simple y rápido su re – diseño, permitiendo atacar solamente el sub-sistema deseado sin necesidad de hacer más cambios al resto de la tarjetería; esto en la práctica se llama robustez del proyecto, el cual se soporta en una base sólida y de principios básicos y prácticos.

El sistema de sensado representa un punto vital en el diseño del hexápodo ya que gracias a el podemos controlarlo con un grado de inteligencia artificial que le permite tomar las decisiones necesarias para el control de su cuerpo; no obstante me centro más en sistema de sensado interno y muy poco en el sistema de sensado externo y recordemos que es este sistema el nos permitirá interactuar más con el medio físico – químico que lo rodea.

CONCLUSIONES

Y para seguir con la costumbre de dejar un reto para el futuro mi propuesta para quien quiera continuar con este proyecto y llevarlo hasta el límite; sería sorprendente dotar al hexápodo de un sistema de visión y reconocimiento de imágenes.

El sistema de decisión desde un principio declare que el microprocesador que proponía para este proyecto es de la gama media; es decir, un micro controlador de 8 bit's, en la actualidad existen micro controladores de 32 bit's lo que lo provee de una mayor robustez en el control de periféricos y equipo alrededor del robot.

El sistema de electrónica de potencia es una parte muy interesante ya que la demanda de corriente en los motores causantes del movimiento es demasiado elevada para ser abastecida directamente por el micro controlador, aquí el reto sería encontrar un método de locomoción que demande una muy pequeña cantidad de corriente; ya al final de la elaboración de este trabajo empecé a escuchar acerca de alambres eléctrico – musculares, lo cual sería muy interesante lograr hacer en el hexápodo.

En general, declaro sentirme satisfecho con la realización de esta propuesta – trabajo de tesis, ya que logre la realización del control del movimiento, así como de dotar de “visión” al hexápodo, alcanzando con ello un sueño que es la integración y aplicación de una gran parte de mis conocimientos adquiridos a lo largo de mis estudios de ingeniero mecánico eléctrico; así mismo colaborar con área tan importante como lo es la investigación y ayudar a futuros estudiantes en la realización de proyectos aun más complejos que se logren a partir de los principios y bases fundamentales que dejo plasmadas en este trabajo que me gustaría llamar de pie veterano.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- ROBOTICA, CONTROL, DETECCIÓN VISIÓN E INTELIGENCIA
K. S. Fu
R. C. González
C. S. G. Lee
Mc Grawhill.
- 2.- A FONDO: ROBOTICA Y SISTEMAS AUTOMÁTICOS.
Neil M. Schmitt
Robert F. Forwell
Anaya Multimedia.
- 3.- CINEMATICA DE LAS MAQUINAS
Guillet
5° ed. en español por Austin H. Church
Compañía editorial Continental, S.A México.
- 4.- ROBOTICA MANIPULADORES Y ROBOTS MOVILES
Anibal Ollero Baturone
Alfa Omega Marcombo, 2001
- 5.- HISTORIA DE LA CIBERNÉTICA E INTRODUCCIÓN.
- 6.- CONTROL DE MOVIMIENTO DE ROBOTS MANIPULADORES.
Rafael Nelly, Víctor Santibáñez
Pearson, Prentice Hall.
- 7.- DISEÑO E INGENIERIA ELECTRONICA ASISTIDA CON PROTEL DXP.
Manuel Torres, Miguel A. Torres.
Alfaomega, RAMA.
- 8.- MECANICA VECTORIAL PARA INGENIEROS DINAMICA.
Beer, Johnston.
Mc. Graw-Hill.
- 9.- INTRODUCCION AL ALGEBRA LINEAL .
Howard Anton
Limusa.
- 10.- <http://matap.dmae.upm.es/cienciaficcio/CRITICA/6/Cficcio.htm>
- 11.- <http://www.ehui.com/print.php?a=21474>
- 12.- http://www.iai.csic.es/dca/silo_e.htm
- 13.- www.a-campo.com.ar
- 14.- <http://www.robotics.freesevers.com/index1.htm>
- 15.- Revista "SABER ELECTRONICA" No. De colección 129, Editorial Quark.