



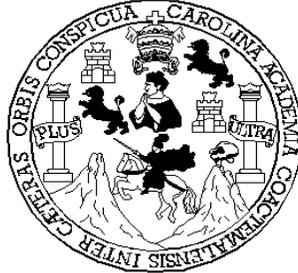
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Diseño y construcción de un brazo robótico

César Rolando Batz Saquimux
Asesorado por: Ing. Oscar Herbert Mendía Alarcón

Guatemala, julio de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y construcción de un brazo robótico

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CÉSAR ROLANDO BATZ SAQUIMUX

ASESORADO POR ING. OSCAR HERBERT MENDÍA ALARCÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS

GUATEMALA, JULIO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADORA	Ing. José Ricardo Morales Prado
EXAMINADORA	Inga. Elizabeth Domínguez Alvarado
EXAMINADOR	Inga. Victoria Virginia Tala Ayerdi
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

Diseño y construcción de un brazo robótico

Tema que me fuera asignado por la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas con fecha febrero de 2003

CÉSAR ROLANDO BATZ SAQUIMUX

AGRADECIMIENTO

1. A la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. A la Facultad de Ingeniería.
3. A la Escuela de Ciencias y Sistemas.
4. Al ingeniero Oscar Herbert Mendía Alarcón, por los conocimientos proporcionados durante la asesoría de este trabajo de tesis.

ACTO QUE DEDICO

A MI MADRE

Por apoyarme siempre y ser mi principal ejemplo de trabajo, honradez y esfuerzo.

A MI FAMILIA

Padre, hermanos, tíos, abuelos, por su ayuda, comprensión y enseñanzas

A MIS AMIGOS

Por brindarme su valiosa amistad

A TODOS

Los que son parte de este éxito, siempre estaré en deuda con ustedes.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VIII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XIV
1. ROBÓTICA	
1.1. Introducción	1
1.1.1. Robótica	1
1.1.2. Reseña histórica	3
1.1.3. Automatización y robótica	5
1.1.4. Perspectivas actuales y futuras	7
1.2. Clasificación del robot	10
1.2.1. Poliarticulados	10
1.2.2. Móviles	11
1.2.3. Androides	11
1.2.4. Zoomórficos	11
1.2.5. Híbridos	12
1.3. Anatomía del robot	12
1.4. Diseño propuesto	13
1.4.1. Descripción	14
1.4.2. Cinemática del brazo del robot	15
1.4.3. Dinámica del brazo del robot	18

1.4.4.	Inteligencia del robot	18
1.4.5.	Efectores	20
1.4.6.	Sensores	20
1.4.7.	Articulaciones	21
1.4.8.	Tipos de movimientos	22
1.4.9.	Limitaciones	24
2. EFECTORES		
2.1.	Descripción	27
2.1.1.	Efectores y actuadores	27
2.1.1.1.	Tipos de efectores	28
2.1.1.2.	Tipos de actuadores	29
2.1.2.	Sistemas de impulsión	30
2.2.	Mecanismos motores que serán utilizados	31
2.2.1.	Requerimientos, diseño y funcionamiento	33
2.3.	Mecanismos manipuladores que serán utilizados	37
2.3.1.	Requerimientos, diseño y funcionamiento	38
3. SENSORES		
3.1.	Descripción	39
3.1.1.	Tipos de sensores	40
3.1.1.1.	Sensores o transductores analógicos	40
3.1.1.2.	Sensores o transductores digitales	40
3.2.	Sensores que serán utilizados	41
3.2.1.	Requerimientos, diseño y funcionamiento	41
3.2.2.	Procesos de control y realimentación	42

4.	PROGRAMACIÓN DEL ROBOT	
4.1.	Descripción	45
4.1.1.	Ingeniería del entorno	46
4.1.2.	Cambio de la forma física del robot	46
4.1.3.	<i>Software</i> de control más sofisticado para dirigir el comportamiento del robot	47
4.2.	Modelación del mundo	47
4.3.	Diseño	48
4.3.1.	Especificación del movimiento	49
4.3.2.	Especificación de las tareas	53
4.3.3.	Espacio de estados	53
4.3.4.	Planificación de las tareas	56
4.4.	Funcionamiento	58
4.4.1.	Lenguaje de programación	60
4.4.2.	Entradas	61
4.4.3.	Salidas	61
4.4.4.	Manejo de excepciones	62
4.4.5.	Seguridad	63
4.4.6.	Velocidad de respuesta y estabilidad del robot	63
4.4.7.	Imprecisiones	65
5.	CONSTRUCCIÓN DEL BRAZO MECÁNICO	
5.1.	<i>Software</i> del robot	69
5.2.	Circuitos del robot	78
5.3.	Mecánica del robot	92
5.4.	Notas importantes	98
	CONCLUSIONES	101

RECOMENDACIONES	104
REFERENCIAS	106
BIBLIOGRAFÍA	107
ANEXO	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Configuraciones anatómicas comunes de los robots	13
2	Estructura propuesta del brazo robótico	14
3	Estructura propuesta de los componentes del robot	15
4	Sistemas de coordenadas de tres dimensiones	17
5	Diseño del sistema de control	19
6	Brazo robótico con articulaciones lineales	22
7	Ejemplos de tipos de articulaciones	24
8	Grados de libertad que posee el robot	28
9	Estructura interna de un motor paso a paso	32
10	Ejemplos de tipos de motores paso a paso	34
11	Diseño de la estructura de un sistema simple de poleas	35
12	Diseño de un tren de engranajes paralelos	36
13	Diseño de la estructura de la pinza mecánica simple que utiliza el robot	37
14	Diseño del efector que utiliza el robot	36
15	Diseño de caja negra del sistema de control del robot	49
16	Ejemplo de múltiples configuraciones para poder llegar a un objetivo	52
17	Ejemplo de un árbol de búsquedas	55

18	Esquema del programa de computadora que implementa el sistema de control	59
19	Ejemplo de imprecisiones derivadas de la resolución espacial de un robot	66
20	Diagrama del algoritmo del sistema de control	71
21	Ejemplo de ángulo de articulación y dirección del movimiento	72
22	Nomenclatura de las partes del brazo robótico	73
23	Ángulos de rotación para una articulación	75
24	Pantalla para el ingreso de coordenadas	76
25	Ejemplo de vista del plano XY en el programa	77
26	Diagrama de bloques del circuito del robot	80
27	Diagrama de una parte del circuito, muestra la conexión entre el puerto paralelo, el <i>buffer</i> 74LS244 y el multiplexor	83
28	Diagrama de una parte del circuito, muestra las compuertas AND, y los componentes que transforman las señales recibidas de la computadora a un voltaje superior	85
29	Diagrama de un parte del circuito, muestra las compuertas AND y los opto aisladores	86
30	Diagrama de un parte del circuito, muestra los transistores, diodos, resistencias, y cómo se conectan a un motor	87
31	Vista superior de la placa donde se encuentra instalado el <i>buffer</i> y el multiplexor	88
32	Vista inferior de la placa donde se encuentra instalado el <i>buffer</i> y el multiplexor	89
33	Vista superior de la placa donde se encuentran instaladas las compuertas AND, los opto aisladores y los transistores	90

34	Vista inferior de la placa donde se encuentran instaladas las compuertas AND, los opto aisladores y los transistores	90
35	Ejemplo de fuente de energía utilizada	91
36	Ejemplo de motores paso a paso utilizados	92
37	Ejemplo de engranajes y fajas utilizadas en las partes mecánicas del robot	93
38	Estructura del codo del brazo robótico	94
39	Ejemplo de la estructura de los engranajes que mueven los dedos de la pinza	95
40	Sistema de engranajes y poleas para activar la pinza	96
41	Sistema de engranajes paralelos implementados en una de las articulaciones del robot	97
42	Estructura final del brazo robótico	98

TABLAS

I	Modos de control	50
II	Canales del puerto paralelo que serán utilizados	81
III	Señales que le indican al circuito qué motor debe activarse	82

GLOSARIO

Algoritmo	Juego de reglas secuenciales preestablecidas para la resolución de un problema expresado en un lenguaje de programación de alto nivel. Procedimiento de cálculo con símbolos, según reglas determinadas y con un número finito de pasos.
Amperaje	Intensidad de una corriente eléctrica medida en amperios.
Autómata	Es una máquina o sistema mecánico que tiene la propiedad de realizar operaciones automáticamente.
Base de datos	Conjunto de datos interrelacionados y estructurados, almacenados de forma que la información pueda ser utilizada.
Bípedo	Persona, animal o robot de dos pies.
Capacidad sensorial	En robótica, es la capacidad que puede tener un robot de percibir algún tipo de señal (mecánica, acústica, luminosa, calorífica, eléctrica o electrónica) del medio que lo rodea.

Ciencia-ficción	Género narrativo cuyos argumentos se desarrollan sobre la base de anticipar literariamente unos presuntos logros científicos, técnicos, biológicos, etc., más o menos avanzados respecto a la fecha en que se escribe o se publica el relato.
Cinemático	Algo que tiene la propiedad de poderse mover en el espacio y el tiempo.
Fotoeléctricamente	Electricidad producida por la acción de la luz u otras radiaciones electromagnéticas sobre ciertas sustancias.
Lenguaje de programación	Es un sistema de signos y símbolos que permiten construir o desarrollar programas o <i>software</i> con los que la computadora puede operar.
Multidisciplinaria	Que abarca varias disciplinas, o varios conjuntos de reglamentos que rigen cuerpos, instituciones o profesiones.
Multípodo	Animal o robot de varios pies.
Radiación electromagnética	Emisión de ondas electromagnéticas.
Reconfigurar	En robótica se refiere a la acción de configurar al robot de una forma distinta a la actual.

Reprogramable	En robótica se refiere a los robots que se pueden programar de distintas formas, para que ejecuten ciertas acciones.
Resistencia	En electrónica, es la constante de proporcionalidad que existe entre la diferencia de potencial de dos puntos de un circuito conductor, y la intensidad que circula.
Resolución	Es el efecto de resolver, determinar o fijar.
Sistema locomotor	Sistema que utilizan los cuerpos para trasladarse de un punto a otro.
<i>Software</i>	Conjunto de programas que se pueden ejecutar en una computadora.
Teleoperación	Manejo de objetos a larga distancia, por medio de un control remoto. También es conocida como telequérica.
Trayectoria	Recorrido de un cuerpo que se mueve en un espacio de dos o tres dimensiones.

RESUMEN

Este trabajo de investigación está destinado al estudio de la robótica, específicamente del diseño y construcción de un brazo robótico, se basa en información recopilada en diferentes publicaciones de Internet, libros y datos obtenidos mediante la experimentación.

La información se ha estructurado en cinco capítulos, los cuales comprenden los conceptos generales y datos técnicos, que durante la investigación fueron identificados como los más importantes.

El primer capítulo es una introducción a la robótica, se expone una breve reseña histórica, se definen conceptos importantes de esta ciencia, se analiza a nivel macro clasificaciones de robots que existen en la actualidad, y diferentes componentes necesarios para construir un robot.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación se identificaron tres aspectos, como los más importantes en la construcción de un robot: efectores, sensores y programación del robot. Debido a esto se dedicó un capítulo para el estudio de cada uno de estos elementos.

El segundo capítulo es acerca de los efectores, se exponen los principales que utilizan los robots, ventajas que brinda la utilización de algún tipo específico; en su parte final se describe el sistema de efectores que utilizará el brazo robótico que se construirá.

El tercer capítulo, se estudian los sensores, se describen algunos de los más importantes utilizados en robótica, lamentablemente por razones de tiempo y costos no se lograron implementar sensores en el brazo robótico. En el capítulo cuarto se analizan los factores a tomar en cuenta para la programación de un robot, los aspectos que se deben incluir para desarrollar un sistema de control para robots, tales como el entorno, planificación de los movimientos, forma de interactuar de los mecanismos del robot con el sistema de control, imprecisiones, la realimentación.

El capítulo final es una exposición de la información recopilada durante la construcción del brazo robótico, se resalta de manera especial los aspectos técnicos y problemas que se enfrentaron al momento de la construcción, y la forma como se resolvieron. El análisis y la construcción del brazo robótico se hace bajo un enfoque de sistemas, en un robot existen varias componentes que interaccionan, intercambian movimiento, información, y deben acoplarse correctamente para su implantación.

OBJETIVOS

General

Elaborar el diseño de la estructura y el sistema de control de un brazo robótico, y a partir de éste construir el manipulador y el *software* que lo maneja.

Específicos

1. Determinar los aspectos a tomar en consideración para diseñar y construir un brazo robótico.
2. Diseñar la estructura del robot, de tal forma que los mecanismos motores se puedan acoplar adecuadamente.
3. Diseñar un sistema de control, que interactúe con los sensores y manipule los mecanismos motores del robot.
4. Diseñar y desarrollar el *software* que controle al robot, y que permita que éste pueda ser programado para ejecutar ciertas tareas.
5. Ensamblar los distintos componentes para que el robot pueda funcionar adecuadamente, basándose en el diseño elaborado.

INTRODUCCIÓN

Los orígenes de la robótica datan de muchos años atrás, se pueden encontrar en casi todos los mitos de las diversas culturas, referencias a la posibilidad de crear un ente con inteligencia. Desde la época de los griegos, se intentó crear dispositivos que tuvieran algún tipo de movimiento, que no fueran controlados ni supervisados por personas. En los inicios de la robótica, se planteaba la construcción de robots para liberar a las personas de los trabajos pesados, convertir los robots en aplicaciones útiles. Posteriormente surge el robot industrial, un manipulador que es parte de una célula de trabajo, convirtiéndose en un componente esencial de la automatización en la industria.

Con la evolución de la ciencia y el constante mejoramiento de la tecnología, la robótica se ha convertido en una ciencia multidisciplinaria. Con los avances en la informática, mecánica, electrónica, inteligencia artificial y otras ciencias, surgen los robots actuales, calificados de inteligentes, con mejoradas extensiones sensoriales con respecto a sus antecesores. Los avances de la ciencia le permiten a la robótica tener buenas perspectivas, pero a la vez incrementan la complejidad de la misma.

Cuando se estudia el diseño, construcción y funcionamiento de un robot, se determina que intervienen distintos factores, más que en otro tipo de proyectos tecnológicos, me atrevo a decir, debido a que un robot interactúa con el ambiente que lo rodea.

En este estudio se analiza el diseño y construcción de un brazo robótico, se utiliza teoría de sistemas para descubrir y resolver las diferentes interrelaciones entre el medio y el robot. La teoría de sistemas nos permite analizar la forma de alimentar o generar información de los componentes de un problema, los cambios que provocan la transición de un estado a otro, todos estos elementos importantes para poder construir e implantar aplicaciones útiles.

Actualmente, la robótica es una ciencia que está tomando gran auge y en el futuro seguramente formará parte de la sociedad como actualmente lo hace la informática. El nivel de tecnología y programación que puedan llegar a tener los robots determinará lo que estos podrán hacer para facilitar las actividades diarias, para realizar tareas que pongan en peligro la integridad del ser humano, en la diversión y el entretenimiento. En el aspecto productivo, los robots mejoran los niveles de producción, no sólo en tiempo sino en calidad.

1. ROBÓTICA

1.1. Introducción

La robótica tiene sus orígenes en las obras de ciencia-ficción, en las cuales se utilizaba el término robot, que proviene del checo, para referirse a máquinas con forma humanoide. En la actualidad, los robots son manipuladores mecánicos muy automatizados controlados por computadoras. A pesar de las limitaciones de éstos, el concepto popular de un robot es que tiene apariencia humana y que actúa como un ser humano.

La robótica es una ciencia aplicada multidisciplinaria, comprende campos como el diseño de máquinas, teoría del control, microelectrónica, programación de computadoras, inteligencia artificial, neurología, anatomía y teoría de la producción. Los avances en diferentes ramas de la ciencia, contribuyen a mejorar las aplicaciones de la robótica.

1.1.1. Robótica

Una obra checoslovaca publicada en 1917 por Karel Capek, denominada *Rossum's Universal Robots*, dio lugar al término robot. El término checo "robota" significa servidumbre o trabajo forzado, y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot.

Isaac Asimov ha contribuido con varias narraciones relativas a robots, en éstas, la imagen de un robot es la de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada, que actúa de acuerdo con tres principios, los cuales fueron denominados por Asimov como las tres leyes de la robótica, y son:

1. Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante la inacción, permitir que un ser humano sufra daños.
2. Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estén en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

Un robot se puede definir como “un manipulador reprogramable y multifuncional, puede trabajar de forma continua y con flexibilidad”¹. Esta definición es muy apropiada, ya que a los robots se les pueden programar y controlar sus movimientos, lo que les posibilita su adaptación a distintos medios de trabajo para realizar diversas tareas.

El campo en que más se utilizan los robots es la industria, la diferencia de un robot industrial y otros tipos de robots, radica en el tipo de tareas para los cuales se destinan. El robot industrial es un dispositivo multifuncional, al contrario de la máquina automática clásica que realiza de forma repetitiva un tipo determinado de operaciones. Se diseña en función de diversos movimientos que debe poder ejecutar, tomando en cuenta sus grados de libertad, campo de trabajo, su comportamiento estático y dinámico.

El robot industrial posee la capacidad de reconfigurar su ciclo de trabajo, además la versatilidad y variedad de sus elementos terminales (pinzas, garras, herramientas, etc.), que le permite adaptarse fácilmente a la evolución o cambio de los procesos de producción.

La robótica se puede definir como "el estudio de la construcción, ensamblaje, generación, programación y uso de los robots y autómatas en general"². Esta se ha caracterizado por el desarrollo de sistemas cada vez más flexibles, versátiles y polivalentes, mediante la utilización de nuevas estructuras mecánicas, nuevos métodos de control y percepción.

1.1.2. Reseña histórica

Antiguamente, se creaban artefactos capaces de realizar tareas diarias y comunes para los humanos, para facilitar la realización de las labores cotidianas. Se observó que había tareas repetitivas que se podían igualar con un complejo sistema, y es así como se comienzan a crear máquinas capaces de ejecutar las mismas labores que el hombre realiza, como ejemplo de estas máquinas podemos citar las siguientes:

- ✓ La imprenta, para obtener varias copias iguales de un mismo escrito.
- ✓ La catapulta, como arma de combate.
- ✓ El molino, ya sea para obtener agua de las entrañas de la tierra, o como molidor de granos.

No todos los artefactos que se construyeron tenían una utilidad, algunas máquinas solamente servían para entretener a sus dueños, y no hacían nada más que realizar movimientos repetitivos o emitir sonidos. Los robots que construyen en la actualidad, generalmente se destinan para tener cierta utilidad o desarrollar tareas específicas que beneficien a la humanidad.

En tiempos más recientes, el control numérico y la telequímica son dos tecnologías importantes en el desarrollo de la robótica.

El control numérico se desarrolló para máquinas-herramientas a mediados del siglo XX de nuestra era, implica el control de una máquina por medio de números. Esta basado en el trabajo original de John Parsons, que concibió el empleo de tarjetas perforadas, que contienen datos de posiciones, para controlar los ejes de una herramienta mecánica.

La telequímica abarca la utilización de un manipulador remoto controlado por un ser humano. El manipulador remoto es un dispositivo mecánico que traduce los movimientos del operador humano en movimientos correspondientes en una posición remota, esto permite que el operador humano pueda permanecer en un lugar seguro y guiar al dispositivo mecánico para que manipule sustancias o ejecute acciones peligrosas.

Esta combinación del control numérico y de la telequímica constituye la base para el robot moderno, que es un manipulador mecánico cuyos movimientos son controlados mediante técnicas de programación muy similares a las empleadas en el control numérico.

Los trabajos sobre lenguajes de robots y gran parte del trabajo desarrollado sobre robótica, están basados en gran medida en el desarrollo de la informática. Aunque las computadoras estaban disponibles desde el nacimiento de la industria robótica, la economía no estuvo dispuesta a emplear una pequeña computadora como el controlador del robot hasta finales de la década de 1970. En la actualidad, casi todos los robots utilizan controles informáticos.

1.1.3. Automatización y robótica

La automatización y la robótica son dos tecnologías estrechamente relacionadas. Las necesidades actuales de aumentar la productividad y generar productos acabados de calidad alta y uniforme, provocan que la industria busque una automatización basada en sistemas complejos. En un contexto industrial se puede definir la automatización como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos, electrónicos y computadoras en la operación y control de la producción. Un ejemplo de automatización lo constituyen las máquinas de montaje mecanizado. En consecuencia, la robótica es una forma de automatización industrial. Existen tres clases de automatización industrial:

- ✓ Automatización fija
- ✓ Automatización programable
- ✓ Automatización flexible

La automatización fija se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto, y se desea obtener siempre el mismo producto, por tanto es adecuada para construir equipos especializados, para procesar el producto con alto rendimiento y con elevadas tasas de producción; por ejemplo, en la producción de microprocesadores.

La automatización programable se emplea cuando el volumen de producción es relativamente bajo y hay una diversidad de productos a obtener. En este caso, el equipo de producción está diseñado para ser adaptable a variaciones en la configuración del producto. Esta característica de adaptabilidad se realiza haciendo funcionar el equipo bajo el control de un programa de instrucciones para el producto dado.

La automatización flexible es una categoría entre automatización fija y automatización programable. Se ha observado que este tipo de automatización es más adecuado para el rango de producción medio. Una de las características que distingue la automatización programable de la flexible, es que con la primera los productos se obtienen en lote, cuando se completa uno de éstos, el equipo es reprogramado para procesar el siguiente lote, mientras que con la automatización flexible, diferentes tipos de productos pueden obtenerse al mismo tiempo en el mismo sistema de fabricación.

Un ejemplo de automatización flexible puede ser una línea de producción que realiza soldadura, ya que está constituida por varios robots, capaces de realizar varias soldaduras por puntos separadas en dos o tres estilos de objetos o carrocerías diferentes, una computadora contiene los programas que controlan a los robots y se cargan en cada robot para la carrocería de automóvil particular que ha de soldarse en cada estación de trabajo.

La robótica abre una nueva y decisiva etapa en el actual proceso creciente de mecanización y automatización de los procesos de producción. Este proceso consiste esencialmente en la sustitución de máquinas o sistemas automáticos que realizan operaciones concretas, por dispositivos mecánicos de uso general, dotados de varios grados de libertad en sus movimientos y capaces de adaptarse a la automatización de un número variado de procesos y operaciones.

De los tres tipos de automatización mencionados, la automatización programable es la que más coincide con la robótica.

1.1.4. Perspectivas actuales y futuras

Actualmente en la industria es donde más se utiliza la robótica, apoyada con la creciente automatización de los procesos de producción, principalmente en la fabricación de automóviles, motores, computadoras, etc. En menor cantidad se empieza a utilizar los robots en investigaciones, exploraciones espaciales, medicina, y otras áreas, para que desempeñen tareas complejas o peligrosas, o entretenimiento.

Las previsiones iniciales de como evolucionaría la robótica indicaban que esta desarrollaría rápidamente sistemas capaces de ejecutar tareas complejas, como caminar, hablar, escuchar. Con esas previsiones se esperaba que los robots de la actualidad estuvieran dotados de una inteligencia mucho más elevada de la que actualmente poseen. Con respecto a su estructura y forma física, se tenían expectativas de lograr en corto tiempo el desarrollo de robots con formas similares a la de los humanos o de ciertos animales, capaces de desarrollar movimientos complejos.

Estas previsiones iniciales no se han cumplido, ya que se han encontrado problemas que han frenado el desarrollo de las mismas, lo cual ha provocado que se reconozca que el crecimiento de la robótica va a ser mucho más lento de lo previsto. El problema principal es cómo se debe controlar exactamente un sistema tan complejo como el de un robot, tomando en cuenta factores como el mundo que lo rodea, el cual puede ser tan cambiante. Se debe configurar el robot para que sea capaz de tomar sus propias decisiones sin que dañe lo que lo rodea, y tampoco a él mismo, pero que permitan que cumpla con sus objetivos o tareas que tenga asignadas.

La Federación Internacional de Robótica (IFR) actualmente clasifica los robots en dos familias: la robótica industrial y la robótica de servicios. La IFR ha adoptado también una clasificación provisional de los robots de servicio, por áreas de aplicación:

- ✓ Servicio a humanos (protección, entretenimiento, etc.)
- ✓ Servicio a equipos (mantenimiento, reparación, limpieza, etc.)
- ✓ Otras funciones autónomas (vigilancia, transporte, adquisición de datos, etc.)

Hacer previsiones acerca de cómo evolucionarán los robots en el futuro es arriesgado, pero se pueden mencionar algunas tendencias. Se intenta mejorar las estructuras tradicionales de los robots, que permitan la mejor adaptabilidad a las condiciones de trabajo, principalmente en los mecanismos de locomoción. Se pretenden desarrollar mejores técnicas de control tales como el control difuso y el control neuronal, apoyados en el desarrollo de la microcomputación que permite la disponibilidad de microprocesadores más rápidos, que permitirán mejorar el comportamiento dinámico de los robots.

En cuanto a los sensores, los sistemas de visión seguirán siendo los más utilizados y desarrollados, por lo menos a corto y mediano plazo, aunque los sensores de proximidad y distancia también constituyen un elemento esencial para algunos robots, especialmente los robots manipuladores. En el futuro se podrán mejorar las técnicas de integración sensorial que tienen como objetivo combinar la información procedente de diversos sensores para construir un modelo del entorno teniendo un objetivo determinado.

La introducción del aprendizaje en la robótica es un tema importante motivado por la necesidad de que el robot pueda adquirir los conocimientos necesarios para efectuar una tarea. Surge la necesidad de desarrollar un estándar de un lenguaje de programación de robots que por medio de *software* pudiese convertirse en el lenguaje de los robots.

Las aplicaciones de robótica del futuro deben ser capaces de desarrollar tareas complejas, las cuales necesitarán niveles superiores de inteligencia y de capacidad de toma de decisión por parte del robot. La complejidad de las tareas requerirá que los robots sean capaces de poder movilizarse de una forma robusta, la capacidad sensorial será de gran importancia, esto concluye en que la anatomía de los robots se haga más especializada y diferenciada de acuerdo con las aplicaciones. La fiabilidad del robot mejorará para que éste pueda ser destinado a efectuar tareas en lugares inaccesibles, a los cuales es difícil llegar para repararlos.

Una solución a lo complejo de las tareas que debe ejecutar un robot es la teleoperación o telequímica, esta permite que el operador pueda controlar a distancia al robot, para que este ejecute las tareas sin que tenga que hacerlo al detalle.

En el futuro, es muy probable que la robótica invada la sociedad como la informática lo ha hecho en la actualidad.

1.2. Clasificación del robot

Las clasificaciones o subdivisiones más importantes que se pueden realizar de los robots atienden a la arquitectura con que se construyen y la configuración física o anatomía de los mismos. En la siguiente sección se explican las diferentes arquitecturas que se utilizan para la construcción de robots.

La arquitectura del robot es la forma que tienen los mecanismos y como éstos están configurados. Entre los tipos de arquitectura de robots tenemos: poliarticulados, móviles, androides, zoomórficos e híbridos.

1.2.1. Poliarticulados

En este grupo están los robots de diversa forma y configuración cuya característica común es la de ser básicamente sedentarios y estar estructurados para mover sus elementos terminales en un determinado espacio de trabajo. Sus elementos terminales tienen un número limitado de grados de libertad y se pueden movilizar en uno o más ejes de un sistema de coordenadas, es decir, pueden realizar movimientos en dos dimensiones y/o tridimensionales.

En este grupo se encuentran los manipuladores, los robots cartesianos y algunos robots industriales, y se emplean cuando es preciso abarcar una zona de trabajo relativamente amplia o alargada, o para trabajar con objetos con un plano de simetría vertical.

1.2.2. Móviles

Son robots con gran capacidad de desplazamiento, basados en carros o plataformas, y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Siguen su camino por telemando o guiándose por la información recibida de su entorno a través de sus sensores. Pueden ser guiados mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente, pueden incluso llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.

1.2.3. Androides

Son robots que intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemático del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados y sin mucha utilidad práctica, y destinados, fundamentalmente, al estudio y experimentación. Uno de los aspectos más complejos de estos robots, y sobre el que se centra la mayoría de los trabajos, es el de la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámicamente y coordinadamente en tiempo real el proceso y mantener simultáneamente el equilibrio del robot.

1.2.4. Zoomórficos

Constituyen una clase que se caracteriza principalmente por sus sistemas de locomoción que imitan a los diversos seres vivos. A pesar de la disparidad morfológica de sus posibles sistemas de locomoción es conveniente agrupar a los robots zoomórficos en dos categorías principales: caminadores y no caminadores.

El grupo de los robots zoomórficos no caminadores está muy poco evolucionado. En cambio, los robots zoomórficos caminadores múltipedos son muy numerosos y están siendo experimentados en diversos laboratorios con vistas al desarrollo posterior de verdaderos vehículos todo terreno, piloteados o autónomos, capaces de evolucionar en superficies muy accidentadas. Las aplicaciones de estos robots serán interesantes en el campo de la exploración espacial y en el estudio de los volcanes y mares.

1.2.5. Híbridos

Estos robots corresponden a aquellos de difícil clasificación cuya estructura se sitúa en combinación con alguna de las anteriores ya expuestas, bien sea por conjunción o por yuxtaposición.

1.3. Anatomía del robot

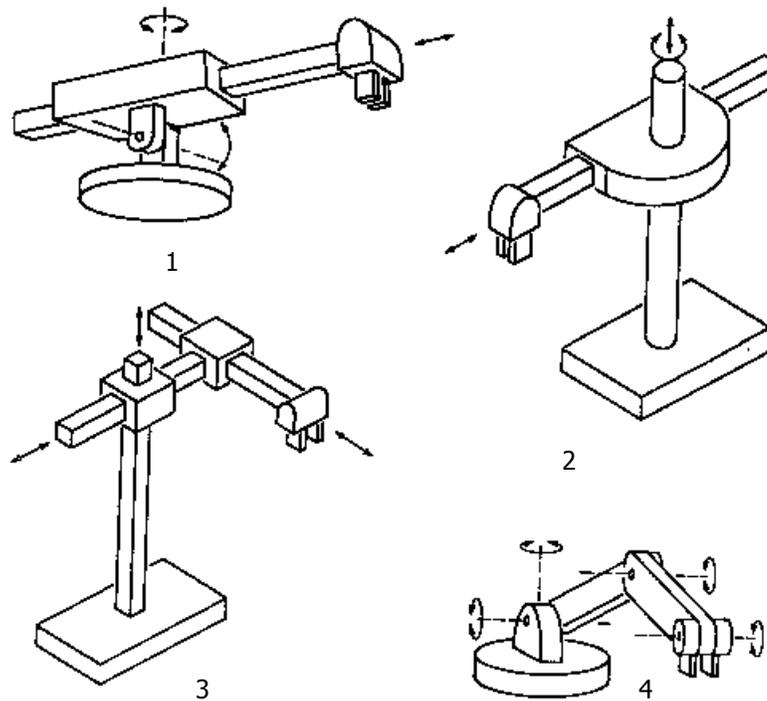
La anatomía del robot se refiere a la construcción física del robot (cuerpo, brazo, muñeca). En el caso del brazo robótico, los movimientos relativos entre los diversos componentes del cuerpo, brazo y muñeca son proporcionados por una serie de articulaciones. El efector final del robot no se considera como parte de la anatomía del robot.

Existen cuatro configuraciones comunes de robots:

1. Configuración polar
2. Configuración cilíndrica
3. Configuración de coordenadas cartesianas
4. Configuración de brazo articulado

Cada una de éstas se diferencia por el tipo de movimientos que pueden realizar.

Figura 1. Configuraciones anatómicas comunes de robots

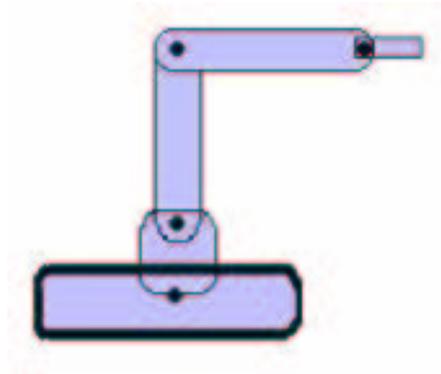


FUENTE: Groover, Mikell P., et. al. ROBÓTICA INDUSTRIAL. Tecnología, programación y aplicaciones. Pág. 23

1.4. Diseño propuesto

En las siguientes secciones se describe el diseño del brazo robótico, el cual incluye las características y anatomía del mismo. En los capítulos posteriores, se exponen con más detalle aspectos técnicos y de implementación que se utilizarán para la construcción de la aplicación.

Figura 2. Estructura propuesta del brazo robótico



1.4.1. Descripción

El brazo robótico tendrá una forma similar a la del brazo humano, como se muestra en la figura anterior, será capaz de realizar determinados movimientos, dentro de un espacio de trabajo definido. El robot tendrá una herramienta con forma de pinza al final de la muñeca, con la cual podrá sujetar algunos objetos, que se encuentren dentro del espacio de trabajo.

El robot estará constituido por un brazo mecánico, controlado por una computadora con el *software* necesario para especificarle movimientos y tareas que podrá ejecutar. Básicamente, la tarea que desempeñará el brazo robótico será la de trasladar un determinado objeto de un punto a otro.

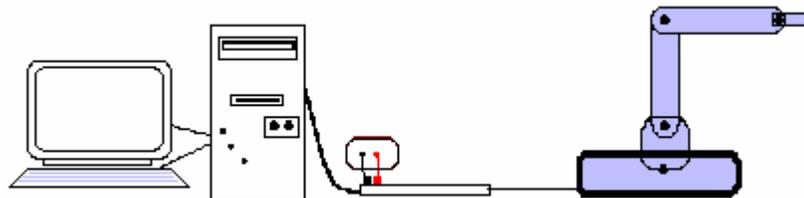
Los movimientos que el robot ejecutará serán programados por el *software* que lo controla. Una persona o usuario será quien indicará las tareas que desea que el manipulador ejecute. Este *software* recibe como entradas: la coordenada en la cual se localiza el objeto a movilizar, y la coordenada a la cual se movilizará el objeto.

El programa ejecutará una serie de rutinas para calcular los movimientos que debe realizar el robot, posteriormente serán enviadas las instrucciones por medio del puerto paralelo de la computadora en la que se ejecuta el programa, al sistema electrónico del robot. Estas instrucciones indican la serie de movimientos que debe ejecutar el robot para completar la tarea asignada.

El sistema electrónico estará compuesto por varios dispositivos capaces de convertir el voltaje emitido por la computadora en voltajes superiores o inferiores según la situación dada, para que puedan activarse los mecanismos del robot.

El brazo robótico que se construirá pertenece al tipo de robots de arquitectura poliarticulada. En la siguiente figura se muestra los distintos componentes que tendrá el robot: computadora, circuitos y la estructura mecánica.

Figura 3. Estructura propuesta de los componentes del robot



1.4.2. Cinemática del brazo del robot

La cinemática es una parte de la física que estudia el movimiento en el espacio y tiempo.

La cinemática del brazo del robot se interesa por la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo, en particular de las relaciones entre la posición de las variables de articulación, y la posición y orientación del efector final del brazo del robot.

En la cinemática del robot existen dos preguntas importantes:

- ✓ Dado un vector de ángulos de las articulaciones y los parámetros geométricos del elemento (dimensiones de las articulaciones) ¿cuál es la orientación y la posición del efector final del manipulador con respecto a un sistema de coordenadas de referencia? Es decir, dados los ángulos de las articulaciones $q(t)=(q_1(t),q_2(t),q_3(t))T$, donde T es el número de ejes del brazo del robot, se debe averiguar la coordenada (x,y,z) en la que se encuentra el efector final.

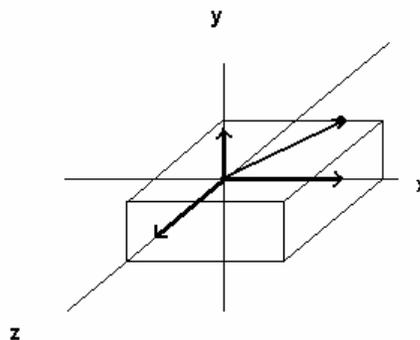
- ✓ Dada una posición y orientación deseada del efector final del manipulador y los parámetros geométricos de los elementos con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, ¿puede el manipulador alcanzar la posición y orientación de la mano que se desea?, y si puede, ¿cuántas configuraciones diferentes del manipulador satisfacen la misma condición? Es decir, dada la coordenada (x,y,z) en la cual se desea colocar al efector final de un brazo robótico de T ejes, se deben obtener los ángulos de articulación correspondientes $q(t)= (q_1(t),q_2(t),q_3(t))T$ del robot de manera que se pueda posicionar como se desea el efector final.

Estos son los dos problemas fundamentales en la cinemática del robot.

La primera pregunta se suele conocer como el problema cinemático directo, utiliza álgebra vectorial y matricial para desarrollar un método generalizado y sistemático para describir y representar la localización de los elementos de un brazo con respecto a un sistema de referencia fijo; el segundo se conoce como el problema cinemático inverso, en un robot las variables independientes son las variables de articulación, y una tarea se suele dar en términos del sistema de coordenadas de referencia, se le indica al robot las posiciones o coordenadas en las que debe trabajar para poder realizar sus tareas, esta forma de controlar los movimientos del robot se utiliza con más frecuencia.

Este problema se puede resolver mediante algunas técnicas, los métodos más utilizados son el algebraico matricial, iterativo y geométrico. El brazo robótico trabajará en un sistema de tres coordenadas, similar al que se muestra en la siguiente figura.

Figura 4. Sistema de coordenadas de tres dimensiones



Con el fin de controlar la posición y orientación del efector final de un robot para alcanzar su objeto, es más importante la solución cinemática inversa.

1.4.3. Dinámica del brazo del robot

La dinámica del robot trata la formulación matemática de las ecuaciones del movimiento del brazo. Las ecuaciones dinámicas de movimiento de un manipulador son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen la conducta dinámica del mismo. El modelo dinámico real de un brazo se puede obtener de leyes físicas conocidas como las leyes de Newton y la mecánica Lagrangiana. Para modelar un sistema como el de un brazo robótico, se deben desarrollar ecuaciones dinámicas de movimiento para las distintas articulaciones del mismo, en términos de los parámetros geométricos e inerciales especificados para los distintos elementos.

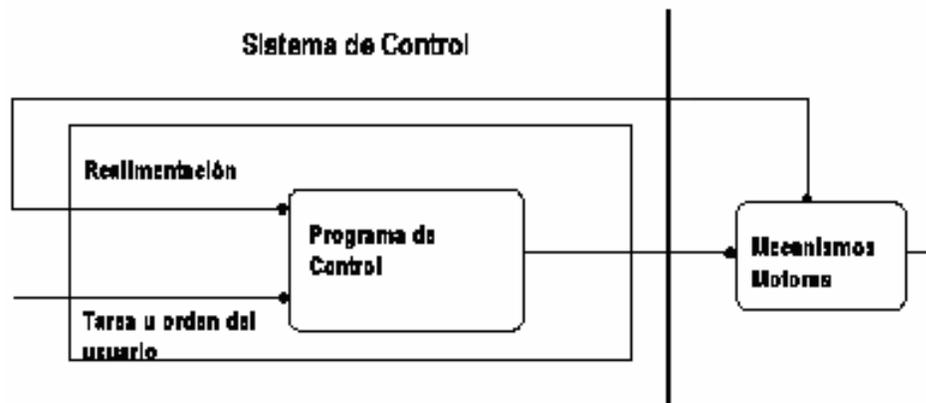
1.4.4. Inteligencia del robot

El problema de planificar los movimientos de una tarea pre-especificada a un robot, y controlarlo cuando ejecuta las órdenes especificadas, se resuelve equipándolo con sensores y/o mecanismos de control, con un conjunto de acciones primitivas que puede realizar en algún "mundo" o sistema fácil de comprender tanto para el robot como para el programador. Para esto se especifica y anticipa un conjunto de estados en los cuales se puede encontrar el robot, y cada acción del mismo puede provocar el cambio de un estado a otro, o cambiar la configuración del mundo que lo rodea a otra.

Es importante tomar en cuenta lo anterior, ya que las acciones que ejecuta el robot pueden provocar cambios en el mundo que lo rodea. La inteligencia permite que el robot tenga la capacidad para poder decidir el curso de acción a seguir para que pueda alcanzar el objetivo o tarea que se le planteó.

Para esto, se propone un sistema de control (ver figura 5), constituido por el *software* o programa de computadora, que se utilizará para planificar los movimientos del robot. Este programa con base a la tarea que el usuario asigne al robot, realizará los cálculos necesarios para determinar las instrucciones que enviará a los mecanismos efectores del robot, para que se ejecuten las acciones respectivas para cumplir con la tarea asignada. El programa estará dotado de cierto grado de inteligencia, con la capacidad de elegir las acciones que debe ejecutar el robot para cumplir la tarea que le sea asignada.

Figura 5. Diseño del sistema de control



1.4.5. Efectores

Los efectores son las herramientas o mecanismos que le permiten al robot interactuar con su entorno, y realizar alguna acción particular. La interconexión del robot con su efector final es un aspecto importante en la ingeniería del mismo, ya que debe realizar al menos ciertas funciones, tales como proporcionar un soporte físico al efector durante el ciclo de trabajo, la energía para que el efector pueda funcionar, las señales para poder controlar el efector también se proporcionan a través de la interconexión, y algunas veces también las señales de realimentación se transmiten por medio de esta interconexión.

1.4.6. Sensores

Los sensores son instrumentos capaces de percibir algún tipo de señal y transformarla, para que pueda ser utilizado por algún sistema de control. La utilización de mecanismos sensores externos permite a un robot interactuar con su entorno de manera flexible. En robótica se utilizan distintos tipos de sensores, desde los más simples como los interruptores de fin de carrera, hasta más sofisticados como los sistemas de visión de máquina. Los sensores son componentes integrales de la realimentación del sistema de control de posiciones del robot.

Los distintos tipos de sensores que se pueden utilizar en un robot se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ✓ Sensores táctiles, son los que responden a fuerzas de contacto con otros objetos.

- ✓ Sensores de proximidad y alcance, que indican cuando algún objeto se encuentra próximo a otro, pero antes de que estos entren en contacto. Si el sensor es capaz de determinar la distancia entre los objetos, se clasifica como sensor de alcance.

- ✓ Sensores de diversos tipos, se incluyen los sensores que miden presión, temperatura y otras variables.

- ✓ Sensores de visión de máquina, se utilizan para inspección, reconocimiento de piezas, etc., con el objetivo de que el robot pueda observar o ver el espacio de trabajo e interpretar lo que ve.

La función de los sensores del robot se puede dividir en dos categorías principales: estado interno y estado externo. Los sensores de estado interno se utilizan para controlar el robot, y los de estado externo se utilizan en los robots para guiarlos, así como para la identificación y manipulación de objetos.

1.4.7. Articulaciones

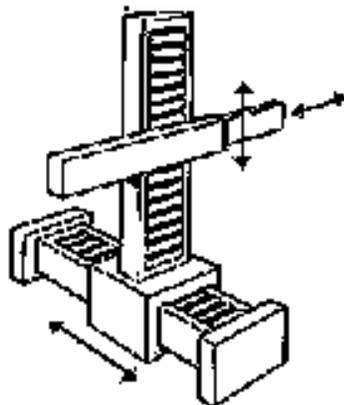
Las articulaciones permiten que se puedan realizar los movimientos del robot. Para conectar las diversas articulaciones que puede tener un robot, se utilizan elementos rígidos llamados uniones. En un brazo robótico, las articulaciones están diseñadas para permitir que el efector final pueda llegar a una posición deseada dentro de los límites de tamaño del robot y de los movimientos de las articulaciones.

Básicamente, existen dos tipos de articulaciones, las lineales y las giratorias, en los siguientes incisos se describe más detalladamente la diferencia que existe entre estos dos tipos.

1.4.8. Tipos de movimientos

Los robots están diseñados para realizar alguna tarea específica, la cual podrá realizar por medio de sus movimientos, los cuales pueden dividirse en dos categorías: movimientos de brazo y cuerpo, y movimientos de la muñeca. A cada uno de los movimientos independientes capaz de realizar una articulación, se denomina grado de libertad, por ejemplo, abajo-arriba, izquierda-derecha. Un grado de libertad puede indicar un movimiento longitudinal o de rotación. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de un brazo robótico con articulaciones lineales, con tres grados de libertad (izquierda-derecha, arriba-abajo, atrás-adelante).

Figura 6. Brazo robótico con articulaciones lineales



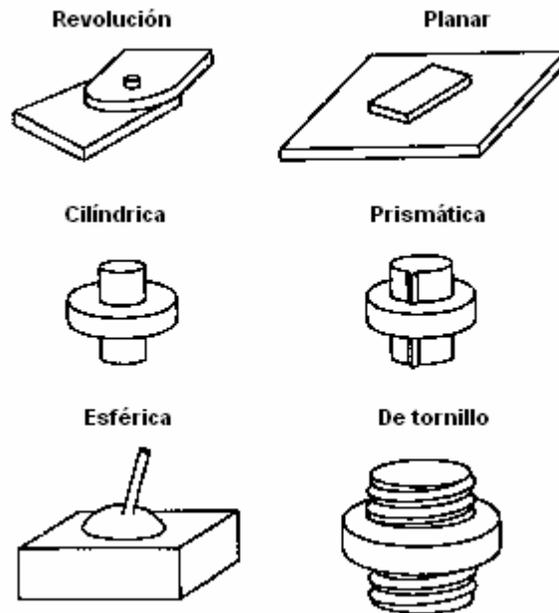
FUENTE: http://virtual.cvut.cz/odl/partners/fuh/course_main/node16.html

Las articulaciones utilizadas en el diseño de robots suelen implicar un movimiento relativo de las uniones contiguas, movimiento que es lineal o rotacional.

Las articulaciones lineales implican un movimiento deslizante o de traslación de las uniones de conexión. Algunas veces se hace referencia a la articulación lineal como articulación prismática.

En las articulaciones giratorias se pueden distinguir tres tipos. Al primer tipo se le denomina rotacional, en este tipo de articulación el eje de rotación es perpendicular a los ejes de las dos uniones. El segundo tipo de articulación giratoria implica un movimiento de torsión entre las uniones de entrada y salida. El eje de rotación de la articulación de torsión es paralelo a los ejes de ambas uniones. El tercer tipo de articulación giratoria es una articulación de revolución en la que la unión de entrada es paralela al eje de rotación y la salida es perpendicular a dicho eje. En la siguiente figura se muestran ejemplos de tipos de articulaciones.

Figura 7. Ejemplos de tipos de articulaciones



Fuente: Fu, K. S., et. al. **ROBÓTICA: Control, detección, visión e inteligencia.**

Pág. 36

1.4.9. Limitaciones

Las limitaciones de un robot son producidas por las características propias de los materiales y dispositivos con los cuales se construye, su anatomía, y el tiempo disponible para su construcción.

Estos factores pueden provocar limitaciones en la estructura física del robot, por ejemplo, en la construcción de un brazo robótico, definen el tamaño y alcance del brazo, la precisión de los movimientos, la fuerza y potencia que el mecanismo puede aplicar, el peso máximo que puede soportar. El sistema impulsor que utiliza el robot define en gran medida las acciones que este podrá ejecutar, ya que puede aumentar o disminuir ciertas capacidades del mismo.

Una limitación significativa es la capacidad del robot para poder interactuar con el entorno, ésta se ve disminuida por la falta o la poca complejidad de los sensores que utilice, ya que el sistema de control no puede percibir información de calidad y en un alto volumen, acerca de cómo se encuentra el medio que lo circunda y cómo están afectando las acciones que el robot está realizando.

2. EFECTORES Y ACTUADORES

2.1. Descripción

El efector es el dispositivo que se une a la muñeca del brazo del robot, éste lo activa y controla para realizar una tarea específica; los actuadores son los dispositivos que producen la fuerza para que el efector se pueda movilizar. Algunas veces se hace referencia a los efectores denominándolos mano del robot.

Los efectores se deben seleccionar técnicamente para la tarea particular que van a realizar, con el objetivo de verificar que sean capaces de ejecutarla. Es importante señalar que los efectores afectan el entorno del robot, por lo que la misión del controlador es que éstos produzcan el efecto deseado en el entorno según la tarea que le sea asignada al robot.

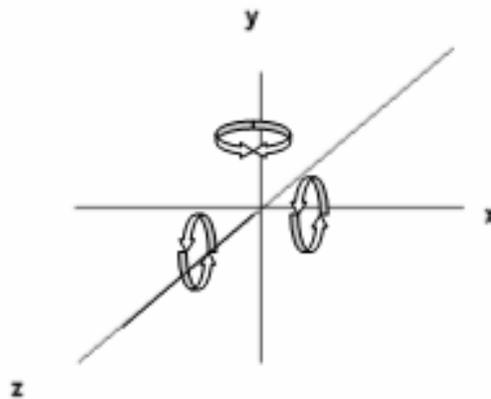
2.1.1. Efectores y actuadores

Los efectores son los periféricos del robot, un efector puede ser la mano o herramienta que está unida a la muñeca, representa el herramental especial que permite al robot de uso general efectuar una aplicación particular. Los actuadores son los dispositivos que proporcionan la fuerza motriz para las articulaciones del robot, éstos son en realidad los mecanismos que producen el efecto. Existen tres principales fuentes de energía para que los actuadores puedan producir fuerza para mover o manipular, las cuales son electricidad, aire comprimido y fluido de presión.

La mayoría de actuadores sencillos poseen solamente un grado de libertad (izquierda-derecha, arriba-abajo, etc.). Un eje generalmente controla solamente un grado de libertad, y un cuerpo libre en general tiene 6 grados de libertad, distribuidos de la siguiente forma:

- ✓ Tres de traslación: x, y, z.
- ✓ Tres de orientación: orientación, rotación, guiñada.

Figura 8. Grados de libertad que posee el robot



2.1.1.1. Tipos de efectores

Los efectores pueden dividirse en dos categorías: pinzas y herramientas. Se le denomina pieza de trabajo al objeto que el robot maniobra, y ciclo de trabajo en general al trabajo que realiza el robot.

Las pinzas son mecanismos efectores que se utilizan normalmente para sujetar la pieza de trabajo, regularmente estos objetos son piezas que tienen que ser movidas por el robot, durante el ciclo de trabajo.

Las herramientas son mecanismos efectores diseñados para realizar trabajos específicos, por ejemplo, las diseñadas para los robots que se utilizan en soldadura de arcos. Por definición, los efectores de tipo herramienta se unen a la muñeca del robot, y en este caso se utilizan para que el robot ejecute alguna operación sobre la pieza de trabajo.

2.1.1.2. Tipos de actuadores

Los actuadores pueden clasificarse en tres tipos: neumáticos, hidráulicos y eléctricos, esta clasificación atiende a la fuente de energía que utiliza el dispositivo.

Los actuadores hidráulicos y neumáticos obtienen energía mediante el movimiento de fluidos. En los actuadores hidráulicos, el fluido suele ser aceite, en los neumáticos es aire comprimido. Los sistemas hidráulicos producen mucha más fuerza que los neumáticos. En los actuadores eléctricos la electricidad es la fuente de energía.

Debido a que los motores eléctricos mejoran cada vez más sus capacidades (fuerza, potencia, velocidad, precisión), han llegado a ser los actuadores más utilizados en el diseño de los robots. Existe una gran variedad de motores eléctricos utilizados en los robots, los más comunes son los servomotores de corriente continua, los motores de fase y los servomotores de corriente alterna.

2.1.2. Sistemas de impulsión

El sistema de impulsión es el que le proporciona al robot la capacidad para poder movilizar sus articulaciones. En un robot la velocidad, la resistencia y dinámica dependen de la capacidad del sistema de impulsión, lo que determina en gran medida las aplicaciones que puede realizar.

Actualmente existen tres tipos de sistemas de impulsión: el neumático, el hidráulico y el eléctrico. En la construcción de robots se utilizan primordialmente los sistemas hidráulicos y los eléctricos. En los robots más grandes se suelen utilizar los sistemas hidráulicos, ya que proporcionan una mayor velocidad y resistencia mecánica. Los sistemas de impulsión eléctricos suelen proporcionar mayor exactitud en los movimientos, con esto el robot aumenta su capacidad para desarrollar trabajos con mayor precisión, pero la fuerza que genera un sistema de impulsión eléctrico no es muy grande. Los sistemas eléctricos no suelen proporcionar tanta velocidad o potencia como los sistemas de impulsión hidráulica, pero son relativamente menos costosos.

Los sistemas neumáticos se utilizan con más frecuencia en robots pequeños, que tienen pocos grados de libertad. Estos sistemas de impulsión pueden adaptarse fácilmente a la actuación de dispositivos tales como los pistones, también se emplean para accionar actuadores giratorios en articulaciones rotacionales.

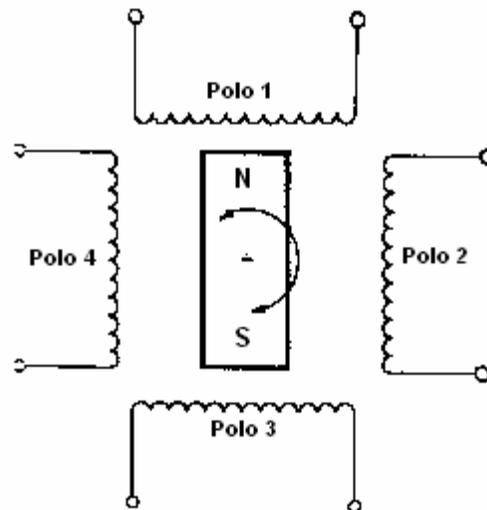
2.2. Mecanismos motores que serán utilizados

El brazo robótico utilizará un sistema de impulsión eléctrico, compuesto por cuatro motores paso a paso, uno de estos motores se utiliza en el manipulador. Se utiliza este tipo de sistema de impulsión para dotar al robot con la capacidad de ejecutar movimientos precisos, y aprovechar la compatibilidad que ofrece un sistema como este para poder ser controlado fácilmente por medio de una computadora.

Un motor paso a paso es un dispositivo que proporciona una salida en forma de incrementos discretos de movimiento angular. Se puede controlar la posición del eje del motor de una forma sencilla, además pueden girar en dirección de las agujas del reloj y en sentido contrario a las mismas. Estos motores actúan por una serie de impulsos eléctricos discretos, para cada impulso eléctrico hay una rotación de paso único del eje del motor.

Un motor paso a paso internamente está compuesto por cuatro bobinas de punto medio, estas bobinas se ubican en lo que se denomina *estartor* (ver figura 9). Además del *estartor*, este tipo de motor está compuesto por una parte móvil estriada denominada rotor. El *estartor* está constituido por cuatro polos electromagnéticos y el rotor es un imán permanente de dos polos. Cuando se aplica tensión a cualquiera de las cuatro bobinas existentes ésta genera un campo magnético. Ante esta situación, una estría del rotor se alinea con este campo, rotando así un determinado número de grados. A este desplazamiento se le denomina paso.

Figura 9. Estructura interna de un motor paso a paso



FUENTE: Groover, Mikell P., et. al. ROBÓTICA INDUSTRIAL. Tecnología, programación y aplicaciones. Pág. 84

Si en esta situación se desalimenta la antes mencionada bobina y se alimenta la siguiente, el rotor girará otro paso en la dirección dada. En función de las veces que se repita esta secuencia se logra que el rotor gire una determinada cantidad de vueltas en un sentido u otro. Si se conmuta rápidamente la corriente del *estator* por medios electrónicos, será posible hacer que el movimiento del rotor parezca como continuo.

La resolución o número de pasos por revolución de un motor paso a paso viene determinada por el número de polos en el *estator* y el rotor. La frecuencia de pulsos que reciba el motor determina su velocidad, y el número de pulsos recibidos determinan cuantos pasos avanza el motor. Una desventaja de este sistema de impulsión es la baja potencia.

2.2.1. Requerimientos, diseño y funcionamiento

Para cada articulación del brazo robótico se necesita un motor paso a paso, este tipo de motor es accionado por medio de impulsos eléctricos, dependiendo del efecto que se desea obtener en determinado punto o articulación, se pueden utilizar motores de mayor o menor potencia, según sea el caso. Para el funcionamiento adecuado y un control efectivo de los motores, es necesario conocer la secuencia de cada uno de estos motores para poder activarlos, para poder guiar la rotación del motor en dirección de las agujas del reloj o en sentido contrario.

El voltaje que se necesita para poder accionar uno de estos motores puede variar dependiendo del tipo de motor, por lo que se utilizarán transformadores o fuentes de energía, capaces de generar los diferentes voltajes, necesarios para accionar cada uno de los motores que utilice el brazo robótico.

Debe existir un sistema de interfaz compuesto por circuitos y compuertas electrónicas, entre la computadora y el brazo robótico, para que los impulsos eléctricos emitidos por la computadora se conviertan en señales que permitan generar determinadas acciones en el robot.

El control efectivo de un motor paso a paso depende de la capacidad del sistema electrónico de conmutación, para efectuar los cambios de los devanados en el momento preciso, ya que si estos se conmutan con demasiada rapidez, es posible que el motor no sea capaz de adaptarse a las señales de mando y funcionará de forma errática, y algunas veces en forma oscilante.

En la siguiente figura se muestran ejemplos de algunos tipos de motores paso a paso que se encuentran en el mercado, que son utilizados en distintos aparatos y máquinas.

Figura 10. Ejemplos de tipos de motores paso a paso



FUENTE: <http://www.gmelectronica.com.ar/catalogo/pag65.html>

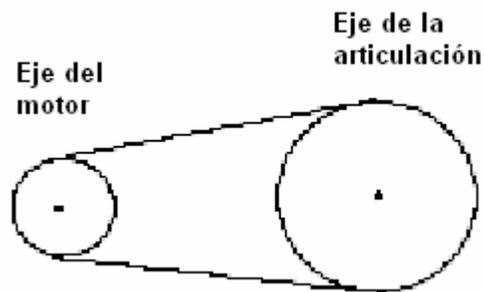
Cada una de las articulaciones podrá realizar sus movimientos, activada por medio de un motor. Por el tipo de brazo que se construirá, que consta de tres articulaciones y una pinza, serán cuatro motores paso a paso los que se utilizarán; tres de los cuatro motores deben ejecutar los movimientos para movilizar determinada articulación en cierta dirección, el motor restante será el encargado de realizar los movimientos para activar la pinza.

Se ha seleccionado utilizar motores de paso, ya que proporcionan una excelente controlabilidad requiriendo un mínimo de mantenimiento, y tienen la precisión en sus movimientos como su principal característica.

La desventaja de estos motores es que la fuerza máxima que pueden ejercer (torque) no es muy grande, y su volumen y peso pueden ser grandes.

Debido a esto, se utilizarán poleas y engranajes. Con estos dispositivos mecánicos se puede transportar el movimiento desde un punto hasta otro y conseguir efectos de variación de velocidad y par. El sistema de poleas transmite un movimiento giratorio desde un eje a otro (ver figura 11). Esta transferencia puede realizarse entre ejes paralelos, el tipo de poleas que se utilizarán permiten transmitir el movimiento desde un punto hasta otro y aumentar la fuerza ejercida por el motor, aunque la velocidad del movimiento disminuya.

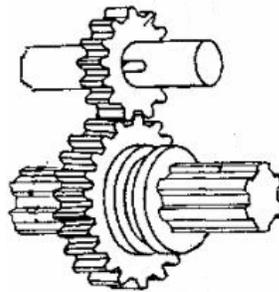
Figura 11. Diseño de la estructura de un sistema simple de poleas



El funcionamiento de los engranajes es similar, con la diferencia que la transmisión del movimiento no se realiza por medio de una faja como en las poleas, sino de una forma más directa. El empleo de engranajes para la transmisión de potencia en robots es muy frecuente, se utilizan para transmitir un movimiento giratorio desde un eje a otro. Esta transferencia puede realizarse entre ejes paralelos, ejes en intersección o ejes sesgados.

Los tipos más sencillos de engranajes, y el tipo que utilizará el brazo robótico, son los de ejes paralelos, que se conocen también como ejes rectos. Cuando se transmite el movimiento de un eje a otro no existe pérdida de potencia. Si en la transmisión del movimiento existen más de dos ruedas, se constituye un tren de engranajes.

Figura 12. Diseño de un tren de engranajes paralelos



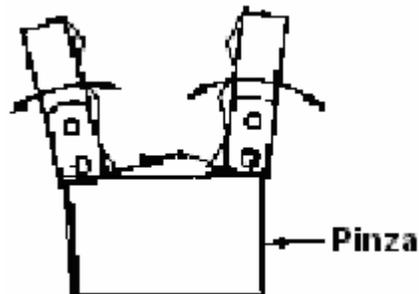
FUENTE: <http://fai.unne.edu.ar/contenido/4ENGRANAJES.htm>

El sistema de control del robot, por medio del programa de computadora realizará el análisis cinemático, y con base a los resultados obtenidos, transmitirá señales electrónicas al circuito de control, éste a su vez activa los motores para generar movimiento en las articulaciones.

2.3. Mecanismos manipuladores que serán utilizados

El brazo robótico tendrá al final de su muñeca una pinza, que utilizará para sujetar y sostener determinados objetos. El tipo de pinza que se utilizará se denomina pinza mecánica simple, la cual utiliza dos dedos mecánicos impulsados por un motor paso a paso para lograr aprehender la pieza (ver figura 13). Los dedos son los accesorios de la pinza que entran en contacto con la pieza.

Figura 13. Diseño de la estructura de la pinza mecánica simple que utiliza el robot



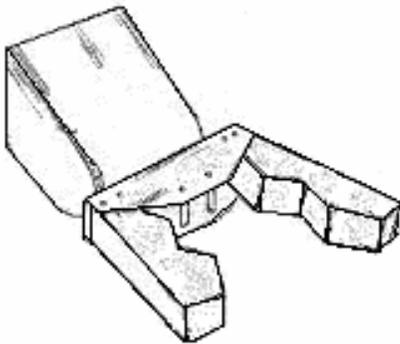
El motor encargado de activar los movimientos de la pinza estará conectado por medio de una polea y un par de engranes a los dedos de la pinza, cuando el motor gira en sentido de las manecillas del reloj, activa la faja de la polea que a su vez provoca el movimiento de los engranajes que están conectados cada uno al eje de uno de los dedos de la pinza, con lo cual provoca que se cierren los dedos; al girar el motor en sentido contrario, provoca que los dedos se alejen uno de otro, este es el movimiento de apertura de la pinza.

2.3.1. Requerimientos, diseño y funcionamiento

La pinza posee dos dedos, con los cuales se pretende que el brazo robótico sujete adecuadamente a la pieza de trabajo, sin dañarla.

Es importante aclarar que la distancia máxima que puede existir entre los dos dedos, y la mínima, es decir lo más cerca que se pueden encontrar uno del otro, son determinadas no solamente por la configuración mecánica de la pinza, sino también por aspectos tales como el peso del brazo, la fuerza máxima que puede llegar a ejercer las articulaciones, y la inestabilidad que puede provocar la pinza cuando esta tome determinada configuración.

Figura 14. Diseño del efector que utiliza el robot



Para sostener el objeto, los dedos de la pinza se mueven de tal forma que se acercan uno al otro, hasta que estos comprimen la pieza, la fuerza que ejercen los dedos en sentidos contrarios, limitan el movimiento de la pieza, y así logran sujetarla.

3. SENSORES

3.1. Descripción

Un sensor o transductor es un dispositivo que se utiliza para medir una cantidad física variable. Para su funcionamiento alguna señal proveniente de una variable física (fuerza, presión, temperatura, etc.) actúa sobre el sensor modificando alguna de sus propiedades, y el sensor la transforma en otra cantidad física.

Para que el sensor pueda cumplir con esta función eficientemente es necesario que se encuentre calibrado. Durante el procedimiento de calibración se establece la relación entre la cantidad física que se mide y la señal de salida convertida. Esta relación convierte cantidades físicas de un tipo a otro distinto, las segundas son función de las primeras.

Los sensores como dispositivos que forman parte del sistema de control del robot, son parte esencial en el proceso de realimentación, ya que con ellos se puede medir el impacto de ciertas acciones, determinar el estado en el que se encuentra el robot, y con base a esta información determinar las acciones a ejecutar.

En los robots pueden ser utilizadas distintas clases de sensores, por ejemplo los sensores táctiles, de proximidad y alcance, de visión de máquina y otros. Dependiendo del tipo de aplicación a la que es destinado el robot, se determina los dispositivos sensores que utilizará, por ejemplo si es un robot para transportar objetos de un lugar a otro será necesario implementarlo con sensores de proximidad.

3.1.1. Tipos de sensores

Los transductores o sensores pueden clasificarse en dos tipos básicos, dependiendo de la forma de la señal transformada, se encuentran los analógicos y los digitales.

3.1.1.1. Sensores o transductores analógicos

Estos transforman la cantidad física a medir en una señal analógica continua, por ejemplo, voltaje o corriente eléctrica. Esta señal representa, después de algunas transformaciones, el valor de la cantidad física que se mide. Un ejemplo de este tipo de sensores son los de temperatura o los de presión.

3.1.1.2. Sensores o transductores digitales

Estos sensores transforman la cantidad física a medir en una señal de salida digital, ya sea en forma paralela o serial. Estos sensores se han convertido en los más populares debido a la facilidad con que se pueden emplear, además, suelen ofrecer compatibilidad con las computadoras. Un ejemplo de estos sensores lo constituyen los sensores de contacto.

3.2. Sensores que serán utilizados

Inicialmente se había contemplado utilizar sensores de contacto binarios, para obtener información asociada con el contacto entre el manipulador y objetos en el espacio de trabajo. Este tipo de sensores son conmutadores que responden a la presencia o ausencia de un objeto.

Estos sensores son útiles para determinar si una pieza está presente entre los dedos. Debido al grado de complejidad que se añade al utilizar este tipo de sensores se optó por no utilizarlos.

3.2.1. Requerimientos, diseño y funcionamiento

Los sensores de contacto funcionan con electricidad, y el mismo sistema eléctrico del robot es el que proporciona la energía necesaria para su funcionamiento. Los microinterruptores de los sensores deben graduarse adecuadamente para que el contacto sea detectado cuando el objeto se encuentre sujetado correctamente. Si el sensor por algún motivo se activa antes de que la pinza tenga correctamente sujeta a la pieza, puede suceder que el objeto se deslice; ahora bien, si el sensor se activa después de que la pinza haya sujetado la pieza, podría suceder que el objeto se aprisione demasiado y se dañe, o que la pinza se resbale debido a las fuerzas aplicadas.

Las señales emitidas por los sensores se envían por medio del sistema eléctrico a la computadora en la cual se encuentra funcionando el programa de control, para la realimentación.

3.2.2. Procesos de control y realimentación

Para un funcionamiento adecuado, el robot debe tener un medio para controlar su sistema impulsor y sus movimientos. Existen cuatro tipos de controles de robot:

- ✓ Robot de secuencia limitada
- ✓ Robots de reproducción con control punto a punto
- ✓ Robots de reproducción con control de recorrido continuo
- ✓ Robots inteligentes

Los robots de secuencia limitada representan el nivel de control más bajo y los robots inteligentes el nivel más alto. Los robots de secuencia limitada no utilizan servo control para indicar las posiciones relativas de las articulaciones, se controlan por el posicionamiento de los interruptores de fin de carrera y/o topes mecánicos para establecer los puntos finales de desplazamiento para cada una de sus articulaciones; no suele existir realimentación asociada con un robot de secuencia limitada. Las aplicaciones de este tipo de robot suelen implicar movimientos simples.

Los robots de reproducción pueden clasificarse en dos categorías: robot punto a punto (PTP) y robot de trayectoria continua (CP). Los robots punto a punto son capaces de realizar ciclos de movimiento que consisten en una serie de localizaciones de puntos deseados y acciones afines. Al robot se le enseña cada punto, y estos puntos se registran en la unidad de control del robot. Durante la reproducción, el robot se controla para desplazarse desde un punto a otro en la secuencia adecuada.

Los robots punto a punto no controlan la trayectoria tomada por el robot para pasar de un punto al siguiente. Si el programador quiere ejercer una cantidad limitada de control sobre la trayectoria seguida, debe realizarlo mediante la programación de una serie de puntos a lo largo de la trayectoria deseada. El control de la secuencia de posiciones es bastante apropiado para muchas clases de aplicaciones, incluyendo las máquinas de carga y descarga y la soldadura de puntos.

Los robots de trayectoria continua son capaces de realizar ciclos de movimiento, en los que se controla la trayectoria seguida por el robot. Esto se suele realizar efectuando el desplazamiento del robot a través de serie de puntos próximos, que describen la trayectoria deseada. Los puntos individuales se definen por la unidad de control y no por el programador. El movimiento en línea recta es una forma común de control de trayectoria continua para los robots industriales.

El programador especifica el punto inicial y el punto final de la trayectoria y la unidad de control calcula la secuencia de puntos individuales que permiten al robot seguir una trayectoria en línea recta. Algunos robots tienen capacidad para seguir una trayectoria curva suave, definida por un programador que desplaza manualmente el brazo a través del ciclo de movimiento deseado.

Para conseguir un control de recorrido continuo más allá de una extensión limitada, se exige que la unidad de control sea capaz de almacenar un gran número de posiciones de puntos individuales que definan la trayectoria curva compuesta. Actualmente, esto implica el empleo de una computadora digital como unidad de control del robot.

Los robots inteligentes constituyen una clase cada vez más numerosa de los robots industriales, y tienen la capacidad no sólo para reproducir un ciclo de movimiento programado, sino para interactuar con su entorno de una manera que parece inteligente. Invariablemente, el controlador consiste en una computadora digital o un dispositivo programable.

Los robots inteligentes pueden modificar su ciclo programado en respuesta a las condiciones particulares que se produzcan en el lugar de trabajo. Pueden tomar decisiones lógicas basadas en los datos del sensor recibidos desde la operación. Los robots de esta clase tienen capacidad para comunicarse, durante el ciclo de trabajo, con los operadores humanos o con sistemas basados en computadora.

Las clases de aplicaciones que realizan los robots inteligentes se basan en el empleo de un lenguaje de alto nivel para realizar las actividades complejas y sofisticadas que pueden ser ejecutadas por estos robots.

El grado de inteligencia que posee el brazo robótico es limitado, ya que no podrá interactuar con un entorno cambiante, y se asume un área de trabajo libre de obstáculos.

4. PROGRAMACIÓN DEL ROBOT

4.1. Descripción

El robot será controlado por un sistema de control, el cual utilizará un programa de computadora para ordenar los desplazamientos e interpretar las instrucciones del usuario. El programa, por medio del teclado de la computadora y la interfaz con el usuario, recibe las instrucciones u órdenes que el robot debe ejecutar. El programa será desarrollado con la capacidad de procesar, calcular y enviar las instrucciones necesarias para que el robot pueda ejecutar sus tareas.

El control de los movimientos del robot hará lo necesario para obtener los modelos dinámicos del manipulador, utilizar estos modelos para determinar las estrategias de control para conseguir la respuesta y el funcionamiento del sistema deseado. El movimiento del brazo de un robot se suele realizar en dos fases de control distintas. La primera es el control de movimiento de aproximación, en el cual el brazo se mueve desde una posición/orientación inicial hasta la vecindad de la posición/orientación del destino deseado a lo largo de una trayectoria planificada. La segunda es el control del movimiento fino en el cual el efector final del brazo interacciona dinámicamente con el objeto para completar la tarea.

En general, hay distintas soluciones para un mismo problema al que un robot se enfrenta. Dependiendo de las restricciones del problema, un tipo de solución será más apropiado que otro, pero raramente será un tipo aislado de soluciones las que proporcionen el mejor resultado.

4.1.1. Ingeniería del entorno

La ingeniería del entorno se refiere al análisis y diseño de las condiciones que se pueden encontrar en el entorno de trabajo del robot. Cuando se diseña un robot hay ciertas características del entorno que pueden simplificar el diseño del mismo. Por ejemplo, un robot de limpieza que en vez de trabajar de día trabajará de noche, evitando así el problema de la gente moviéndose por su entorno. Los humanos utilizamos este método continuamente para hacernos la vida más fácil.

Para minimizar la complejidad del problema, en el entorno de trabajo del robot no existirán obstáculos, por lo tanto no existe realimentación de este tipo para este caso. Los algoritmos para calcular las trayectorias se simplifican, ya que no toman en cuenta posibles obstáculos que hay que evadir en el entorno de trabajo.

4.1.2. Cambio de la forma física del robot

La forma de un robot puede tener un gran impacto en sus prestaciones, por ejemplo, un robot no cilíndrico corre mayor riesgo de quedar atrapado por una disposición desfavorable de obstáculos o de fallar en encontrar un camino en un espacio estrecho o intrincado.

Cuando la capacidad de realizar movimientos complejos del robot es reducida, se requiere de un algoritmo más complejo para la navegación, que en un robot cuya capacidad de movimientos es más elevada.

4.1.3. *Software* de control más sofisticado para dirigir el comportamiento del robot

Un diseño sencillo del entorno del robot, puede ser suficiente para realizar la tarea encomendada si el *software* de control es lo suficientemente completo como para resolver todos los problemas a los que se enfrente. El *software* de control del robot, será capaz de planificar los movimientos y acciones a ejecutar para cumplir las tareas que le sean asignadas al robot, solamente si el sistema determina que el manipulador es capaz de poder ejecutarlas, ya que existirán puntos a los cuales por razones físicas el manipulador no podrá llegar.

El *software* que controla al robot, también debe ser capaz de enfrentarse a alguna irregularidad que pueda suceder en el ciclo de trabajo, y a partir de las anomalías detectadas reaccionar de determinada forma, con el objetivo de realizar la tarea especificada. El problema de control de un manipulador se puede dividir convenientemente en dos subproblemas coherentes: el sub-problema de planificación de movimiento y el sub-problema de control del movimiento.

4.2. Modelación del mundo

El mundo o sistema en el cual se encontrará el robot está formado por todos los objetos que se encuentran alrededor del mismo, y que están a su alcance.

El entorno puede afectar positivamente o negativamente para que el robot pueda realizar con éxito sus tareas. Por ejemplo, si el entorno es muy cambiante, el robot debe de ser capaz de reaccionar ante los posibles imprevistos, esto implica demasiada complejidad del sistema de control y la probabilidad de que en determinado momento no pueda ejecutar la tarea especificada, debido a que el robot no será capaz de reaccionar ante determinada situación.

En este caso se utilizará un modelo de coordenadas de referencia fija, cuyo origen se encontrará en la base del brazo robótico, para modelar el espacio de trabajo. En robótica se denomina volumen de trabajo al espacio dentro del cual el robot puede manipular el extremo de su muñeca. Ya que el efector final es una adición al robot básico, no se cuenta como parte del espacio de trabajo del robot.

4.3. Diseño

Se utiliza un enfoque sistemático para diseñar el programa que controlará los movimientos y las tareas que el brazo robótico ejecutará. Este sistema será como una caja negra, con entradas provenientes de las órdenes o instrucciones del usuario, y salidas en forma de señales electrónicas, que se convierten en las instrucciones que se enviarán a los circuitos para activar al manipulador. Dentro del sistema de control, el programa de computadora ejecutará los procesos necesarios para poder determinar las instrucciones que se enviarán al robot.

Figura 15. Diseño de caja negra del sistema de control del robot



4.3.1. Especificación del movimiento

El movimiento del brazo o manipulador se describe como una secuencia de puntos en el espacio (posición) a través de los cuales debe pasar (orientación), estos conforman la trayectoria que recorre en el espacio. La curva espacial que recorre el manipulador desde la posición inicial hasta la posición final se llama el camino.

El problema de controlar al brazo robótico se reduce a que el manipulador siga un camino preplanificado. Antes de mover al robot, es importante conocer si existe algún obstáculo presente en su camino (ligaduras de obstáculo), y si la mano del manipulador debe recorrer un camino especificado (ligaduras de camino). Cuando existe realimentación para detección de obstáculos el programa que controla al robot puede determinar la acción pertinente a tomar para evadir los obstáculos que se encuentren en la ruta, para nuestro caso no existe realimentación de este tipo, y se asume que no existirán obstáculos en la trayectoria.

En la siguiente tabla se muestran los cuatro modos de control posibles, que se pueden dar combinando la existencia de ligaduras de obstáculo y de camino.

Tabla I. Modos de control

		Ligaduras de obstáculo	
		Sí	No
Ligaduras del camino	Sí	Planificación de camino en línea más seguimiento del camino, libre de colisión porque se detectan los obstáculos y se planifica una ruta que los evite	Planificación de camino en línea más seguimiento del camino
	No	Control posicional y obstáculo en línea detección y evitación	Control posicional

El control posicional se refiere a que el robot debe tener implementado un sistema para verificar constantemente la posición en que se encuentra para poder controlar sus movimientos y verificar que se siga una ruta correcta para poder llegar al objetivo. Con la planificación del camino en línea, el programa que controla al robot determina las coordenadas en las cuales se debe mover el manipulador para llegar al objetivo.

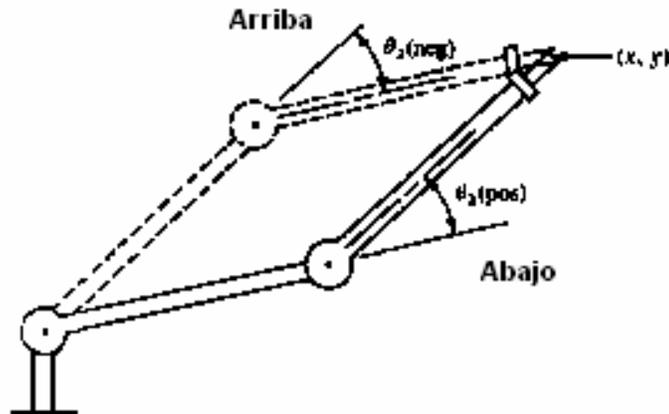
De la tabla anterior se observa que el problema de control de un manipulador se puede dividir convenientemente en dos subproblemas coherentes, el de planificación del movimiento y el control del movimiento.

La planificación del movimiento se refiere a determinar la trayectoria que debe recorrer el manipulador para llegar a su objetivo, mientras que el control del movimiento se refiere a verificar que el manipulador efectivamente recorra la trayectoria correcta para poder llegar a su objetivo.

Utilizando funciones trigonométricas, puntos de referencia fijos para el origen de la coordenadas, y conociendo las longitudes de las articulaciones del brazo, se puede calcular los ángulos de articulación requeridos para desplazar el brazo de una posición a otra determinada posición (x, y, z) en el espacio. Con esto genera una secuencia de puntos para controlar a lo largo del tiempo al manipulador desde su posición inicial hasta su destino. Los puntos extremos del camino se especificarán por medio de coordenadas cartesianas, ya que es más fácil visualizar las configuraciones correctas del efector final en dichas coordenadas.

Con bastante frecuencia, existen múltiples trayectorias posibles entre los dos puntos extremos del camino. La situación típica es aquella en que el controlador del robot debe determinar los ángulos de la articulación necesarios para desplazar el extremo del brazo a un punto del espacio. Por ejemplo, como se muestra en la figura que se muestra a continuación, existen dos configuraciones posibles para alcanzar el punto (x, y, z) .

Figura 16. Ejemplo de múltiples configuraciones para poder llegar a un objetivo



FUENTE: Groover, Mikell P., et. al. ROBÓTICA INDUSTRIAL. Tecnología, programación y aplicaciones. Pág. 100

Una explicación matemática de esto puede ser la siguiente identidad trigonométrica.

$$\text{Cos}(-x)=\text{Cos}(x)$$

Ángulos distintos de determinada articulación pueden producir idénticos valores de tal forma que se pueda posicionar al manipulador en un punto (x, y, z). Por lo tanto, el *software* debe ser capaz de decidir cual de las opciones para llegar a determinado punto es mejor, para esto se toman criterios de longitud de la trayectoria a recorrer, ruta más estable, cual es la posición más favorable para que el robot pueda lograr el objetivo.

4.3.2. Especificación de las tareas

Por medio de un *software* que interactúa con el programa que controla al robot, el usuario puede asignar tareas para que el manipulador las ejecute. La información para poder realizar una tarea, está constituida por las coordenadas del punto en el cual se encuentra el objeto o pieza que se desea mover, y las coordenadas del punto al cual se desea mover la pieza de trabajo.

Cuando se especifican las tareas que debe ejecutar el manipulador, el *software* que controla al robot, procesa esta información para planificar los movimientos necesarios para cumplir con el objetivo. Cuando finaliza la planificación de los movimientos, inicia el proceso de enviar las instrucciones por medio del puerto paralelo al robot.

4.3.3. Espacio de estados

Un estado "es una colección de números que junto con la entrada determina una única salida"³, y el conjunto de todas las configuraciones posibles es el espacio de estados del problema. Si tenemos un problema en concreto, el espacio de estados o las distintas configuraciones en las que se puede encontrar son $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$, donde n puede ser un número finito, infinito o una variable continua (dependiendo de la complejidad del problema), y cada una de estas X_n es una situación específica del problema.

Para que un problema cambie de un estado a otro distinto, alguna entrada externa puede provocar este cambio o simplemente el sistema tiene una trayectoria específica y cambia de un estado a otro sin la intervención de alguna acción externa. Un operador es una función que provoca un efecto o acción, que al aplicarse a un estado en general, lo transforma en otro.

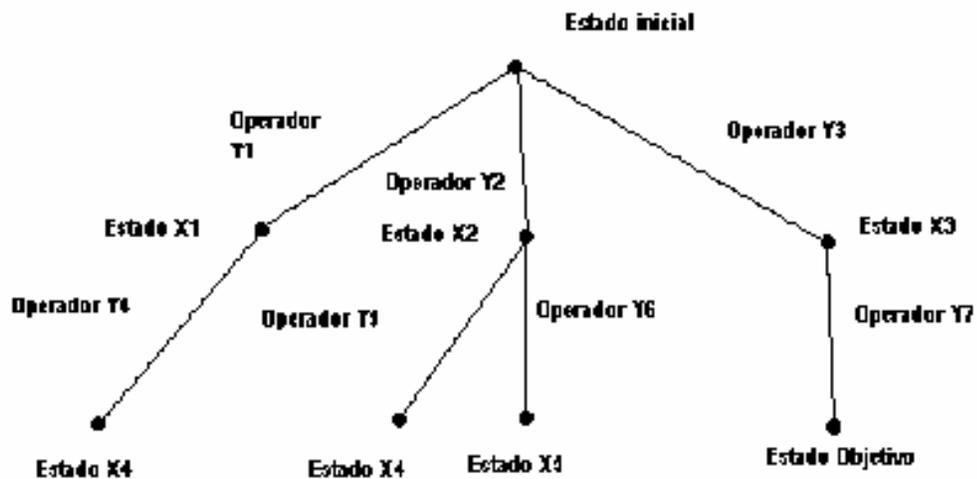
Una solución a un problema es una secuencia de operadores que transforma un estado inicial hasta el estado final que se quiere. Por ejemplo, tenemos una situación en donde el robot se encuentra sobre un plano finito T , y existe un bloque A . En el estado inicial el bloque A esta sobre el plano T en la coordenada (x_0, y_0, z_0) . Se le pide al robot que cambie el estado inicial a otro en el cual el bloque A , se encuentre en un punto distinto en la coordenada (x_1, y_1, z_1) siempre sobre el mismo plano T .

La única acción que el robot puede emplear para cambiar la configuración inicial es posicionar su pinza en la coordenada donde se encuentra el bloque A , sujetarlo y moverlo hasta la coordenada (x_1, y_1, z_1) .

Para resolver los problemas de cambios de estado en los robots, la forma más simple que existe es un sistema de producción que emplea la descripción de estados como una base de datos; ésta es una forma ineficiente en sistemas complejos, ya que es imposible almacenar todos estos estados. En una base de datos se almacenan todos los posibles estados en los cuales se puede encontrar el problema del robot, esta descripción de estados y objetivos para los problemas de robots se pueden construir con proposiciones lógicas. Por ejemplo, si el robot se encuentra en un estado X_0 , y aplica el operador Y_1 entonces irá al estado X_1 , si aplica el operador Y_2 entonces irá al estado X_2 , etc. Una representación gráfica de esto es un árbol o grafo de estados.

Este sistema resulta sencillo, ya que se puede determinar con exactitud los operadores que deben ser aplicados para poder llegar al objetivo deseado, pero no es eficiente, ya que es necesario contar con unidades grandes de almacenamiento de información (discos duros de gran capacidad) para colocar en ellos todos los estados, y unidades rápidas de procesamiento (microprocesadores rápidos) para encontrar la secuencia de operadores del estado inicial al final, de ser posible, en un corto tiempo para cualquier problema que le sea planteado al robot.

Figura 17. Ejemplo de un árbol de búsquedas



En la figura anterior, se puede observar que las acciones del robot pueden modificar la situación o estado actual del mundo que lo rodea, en otro estado distinto. Ya que no es factible almacenar todos los estados posibles en los que se puede encontrar el robot, para solucionar los problemas que le sean planteados, se puede calcular un plan determinado para resolver un problema particular, generalizando el plan específico.

El plan específico posee ciertos valores o constantes, los cuales determinan la acción que se tomará, reemplazando las constantes por parámetros que modelen una función matemática se puede generalizar el plan, para esto es necesario conocer las condiciones y efectos de cualquier parte del plan, y esto se logra con una base de datos pequeña.

Es necesario que la base de datos contenga las funciones o los planes generalizados que pueden resolver el problema, para que al sustituir sus variables por los parámetros del problema particular, se puedan obtener los resultados que se desean para resolverlo.

4.3.4. Planificación de las tareas

La planificación de los movimientos para resolver alguna tarea ya especificada es un problema básico en robótica. Planificar significa decidir una secuencia de operadores antes de actuar, por tanto, un plan es la representación del desarrollo de una serie de acciones para alcanzar un fin. El planificador de tareas del robot requiere una descripción de los estados iniciales y finales de una tarea determinada, sin embargo, también necesitan información detallada de los estados intermedios (para tener una planificación más correcta y detallada).

El planificador de tareas transforma las especificaciones a nivel de tarea con las especificaciones a nivel de manipulador. Para realizar esta transformación es necesario que el planificador de tareas tenga una descripción de los objetos a manipular, el entorno de trabajo, la forma de llevar a cabo la tarea por el robot, el estado inicial del entorno y el estado final (objetivo) deseado. Las especificaciones a nivel de tarea le indican al robot qué debe hacer, y las especificaciones a nivel de manipulador cómo y con qué debe hacerlo.

Para esto, el planificador de tareas debe tener una descripción de los objetos a manipular, del entorno que lo rodea, la forma en que llevará a cabo la tarea, el estado inicial del entorno y el estado final deseado. El resultado que da el planificador de tareas es un "programa" o secuencia de acciones, este es el plan para que el robot pueda alcanzar el estado final deseado, cuando se ejecuta el programa desde el estado inicial especificado.

En la planificación de tareas existen tres fases: la especificación de tareas, el modelado y la síntesis del programa manipulador. La especificación de las tareas, constituye la descripción del estado inicial del robot, y el estado final que se espera alcance. El modelado del mundo para una tarea debe incluir información tal como la descripción geométrica de todos los objetos y el entorno de la tarea, descripción física de estos objetos, descripción cinemática de todos los movimientos, descripción de las características del sensor y del robot. Los modelos de los estados de la tarea deben incluir también la configuración de todos los objetos en el modelo del mundo.

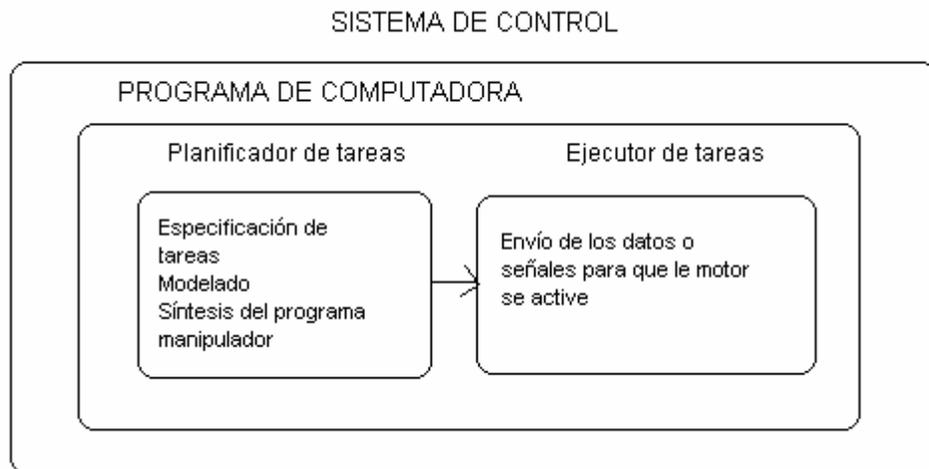
Finalmente, la síntesis de un programa o plan del manipulador es la fase crucial. Los pasos más importantes de esta fase son la planificación del asimiento, la planificación del movimiento y la detección de errores. El resultado es una serie de instrucciones que son enviadas al robot para sujetar los objetos, varios tipos de especificaciones de movimiento y pruebas de error.

4.4. Funcionamiento

El sistema de control utiliza un programa de computadora que se encarga del control del brazo robótico, por medio de una interfaz dedicada exclusivamente para la recepción de tareas y órdenes.

El programa de control se encarga de realizar el proceso de cálculo, para determinar las acciones que deben ejecutar los actuadores y efectores del robot. Este programa planifica la sujeción, el desplazamiento y comprueba el plan. La planificación de la forma de coger el objeto es de forma probable el problema más importante en la planificación del trabajo ya que dicha manera afecta a todas las operaciones subsiguientes.

Figura 18. Esquema del programa de computadora que implementa el sistema de control



La forma que adquiere un robot para coger un objeto está limitada por la geometría de tal objeto y la presencia de otros objetos en el lugar de trabajo, una configuración útil para tomarlo es aquella que sea posible y estable. El robot debe ser capaz de alcanzar el objeto sin chocar con otros objetos del lugar del trabajo y, una vez sujeto, el objeto debe permanecer estable durante los siguientes movimientos del robot.

Muchos de los métodos actuales para la planificación de asimiento de objetos se centran únicamente en alcanzar posiciones de agarre que sean posibles y sólo se considera un conjunto pequeño de restricciones, ya que coger objetos en presencia de incertidumbre es más difícil y a menudo hace necesario el uso de sensores.

Tras coger el objeto, el robot debe desplazar el objeto hasta su destino para cumplir la operación asignada. Este movimiento se puede dividir en cuatro fases:

- ✓ Una salida cuidadosa de la configuración inicial
- ✓ Un desplazamiento libre hasta la configuración deseada sin choques
- ✓ Una aproximación cuidadosa hasta el destino
- ✓ Un movimiento obediente hasta alcanzar la configuración objetivo

Como se determinó en un principio, se asume que la trayectoria que el programa elige para llegar al objetivo deseado se encuentra libre de obstáculos.

4.4.1. Lenguaje de programación

La herramienta de programación que se utiliza es Borland Delphi, la cual es una herramienta visual que ofrece compatibilidad con la programación a bajo nivel en Assembler y a la vez una presentación amigable para el usuario. Esta herramienta permite el desarrollo de un *software* que controla al robot capaz de poder realizar varios cálculos, y una interfaz en un ambiente gráfico. Otra ventaja es la facilidad para poder manipular la información que se envía al robot, o que se recibe de los sensores a través de lecturas al puerto paralelo.

4.4.2. Entradas

El programa que controlará al robot, tiene como entrada dos vectores de tres dimensiones. El primer vector indica la posición en la cual se encuentra un objeto, es la primera posición hacia la que tiene que moverse el robot, mientras que el segundo vector representa el punto final, al que se desea que el robot movilice el objeto. La interfaz gráfica le permite al usuario indicar las coordenadas del objeto que se desea movilizar, y las coordenadas del punto al cual se desea mover.

Todas las señales que recibe el sistema de control se utilizan como variables de control en los cálculos de movimientos y trayectorias, éstas también se utilizan como parámetros para evaluar si los objetivos planteados se están logrando efectivamente.

4.4.3. Salidas

El sistema de control basado en las entradas que percibe, genera las salidas en forma de señales electrónicas, las cuales se envían al robot por medio del puerto paralelo. En el monitor de la computadora en la cual se ejecuta el programa de control, se muestra el estado actual del robot. El circuito del robot, es el que se encarga de distribuir las señales a los destinos correctos, ya sea a los efectores o al manipulador.

4.4.4. Manejo de excepciones

Las excepciones son un aspecto importante en el control del robot, ya que éstas pueden provocar mal funcionamiento del mismo. El programa contará con matriz de estados, con la que podrá determinar las acciones correctivas o preventivas para poder seguir con un desempeño correcto. En algunos casos será necesario proporcionar asistencia humana para ejecutar la acción correctora, pero en otros el robot estará dotado con la capacidad de poder responder ante la contingencia de una forma inteligente.

Para el manejo adecuado de una excepción, primero se debe detectar el error y luego ejecutar la operación de recuperación. Para esto es necesario dotar de cierta inteligencia al robot, para que sea capaz de clasificar el tipo de excepción o error que suceda y pueda corregirlo. El problema de recuperación de errores, se preocupa por definir y realizar estrategias que puedan ser empleadas por el robot para corregir o compensar las mal funciones que puedan ocurrir u ocurran.

Es necesario desarrollar una clasificación de errores, ya que se debe desarrollar una estrategia de recuperación específica para cada tipo específico de error, puesto que una misma estrategia no puede responder ante distintos tipos de excepciones.

4.4.5. Seguridad

En robótica existen dos aspectos en cuestión de seguridad. El primero es la justificación de los robots, cuya razón fundamental, es la de utilizar los robots en aplicaciones industriales para sustituir operarios humanos en entornos de trabajo potencialmente peligrosos. El segundo aspecto del tema de seguridad se relaciona con los riesgos potenciales planteados por el propio robot para los humanos. La utilización de robots presenta un nuevo conjunto de posibles peligros para el trabajador y para los cuales se deben tomar precauciones, ya que pueden dañar de una forma no intencionada al humano, así como también lo pueden desplazar en ciertos puestos de trabajo que los robots pueden desempeñar eficazmente y eficientemente.

El brazo robótico, por las dimensiones y los objetivos que persigue su implementación, es casi imposible que pueda provocar daños serios a los humanos, si se toma en cuenta la fuerza que los efectores del mismo están en capacidad de generar.

4.4.6. Velocidad de respuesta y estabilidad del robot

La velocidad de respuesta y la estabilidad son dos características importantes del rendimiento dinámico en relación con el diseño de los sistemas de control. La velocidad de respuesta se refiere a la capacidad del robot para desplazarse a la siguiente posición en un breve período de tiempo, después de haber recibido la orden. Este tiempo está evidentemente relacionado con la velocidad de movimiento del robot, y también es una función del sistema de control.

En robótica la estabilidad se suele definir como una medida de las oscilaciones que se producen en el brazo durante el movimiento desde una posición a la siguiente. En este caso no se implementa la medición de estas oscilaciones, puesto que no existe realimentación para la posición.

Un robot con buena estabilidad presentará ninguna o pocas oscilaciones durante o en el fin del movimiento del brazo. Una estabilidad deficiente se observa por una gran cantidad de oscilaciones.

En el diseño de los sistemas de control suele ser deseable que el robot tenga buena estabilidad y un tiempo de respuesta corto, aunque lamentablemente estos objetivos en cierto modo son incompatibles. La estabilidad de un robot puede controlarse, en cierta medida, incorporando elementos amortiguadores en el diseño del mismo. Un alto nivel de amortiguación aumentará la estabilidad del robot. El problema con la alta amortiguación es que reduce la velocidad de respuesta.

Con la amortiguación de nivel bajo, el brazo se desplaza con rapidez a la posición programada, pero presenta una oscilación considerable al final. Con un nivel elevado de amortiguación incorporado al brazo robótico, el movimiento del brazo a la posición deseada es muy lento, por no existen oscilaciones en la posición final.

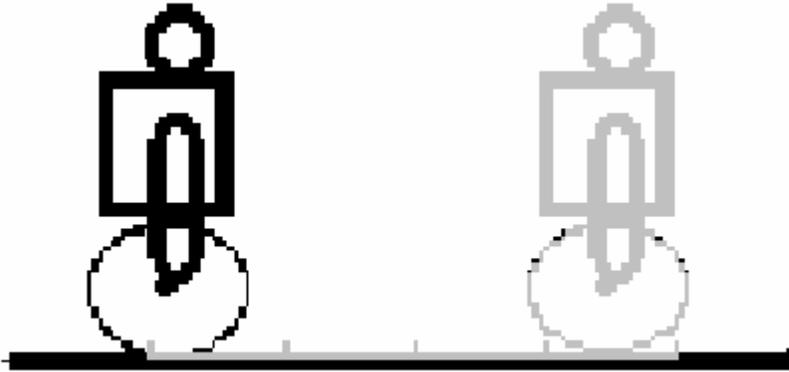
4.4.7. Imprecisiones

La exactitud en los movimientos es una característica muy importante en una aplicación como el brazo robótico, ya que las imprecisiones generadas por factores como la fricción, la velocidad, la tensión, la gravedad, fuerzas externas, pueden provocar que el robot no llegue con exactitud a algún punto, y puede suceder que no lo alcance o que lo sobrepase. La precisión de los movimientos del robot se puede definir como una función de tres características:

- ✓ Resolución espacial
- ✓ Exactitud
- ✓ Repetibilidad

La resolución espacial de un robot es el más pequeño incremento de movimiento en el que el robot puede dividir su volumen de trabajo. Por ejemplo, como se muestra en la siguiente figura, el volumen de trabajo del robot es de 4 metros, si las ruedas del robot cada vez que giran en alguna dirección provocan que este avance 10 centímetros, la resolución espacial del robot es de 10 centímetros.

Figura 19. Ejemplo de imprecisiones derivadas de la resolución espacial de un robot



La resolución espacial depende de dos factores: la resolución de control del sistema, determinada por el sistema de control de posición del robot y las inexactitudes mecánicas del robot, que se encuentran en las uniones y articulaciones del mismo.

Es más fácil conceptualizar estos factores en términos de un robot con un grado de libertad, ya que un robot con varios grados puede tener una magnitud de complicada determinación. La resolución del control viene determinada por el sistema de control de posición del robot y su sistema de medida de realimentación, es la capacidad del controlador para dividir el margen total de movimientos para la articulación particular en incrementos individuales, que pueden regularse en el controlador.

Las inexactitudes mecánicas proceden de la desviación elástica en los elementos de la estructura del robot: tensión de los cordones de las poleas, u otras imperfecciones en el sistema mecánico, por ejemplo. Las inexactitudes mecánicas del sistema llegan a ser el componente dominante en la resolución espacial.

La exactitud es la capacidad del robot para situar el extremo de su muñeca en un punto de destino deseado dentro del volumen de trabajo, puede definirse en términos de resolución espacial, porque la capacidad para alcanzar un punto de destino determinado depende de que tan próximos pueda el robot definir los incrementos de control para cada uno de sus movimientos de las articulaciones. En el caso más desfavorable, el punto deseado estaría a medio camino entre dos incrementos de control adyacentes.

Por ejemplo, si analizamos la figura número 16, si al robot le pidiesen que a partir de su posición inicial llegará a un punto localizado a 1.05 metros, como se mencionó que el robot solamente puede avanzar 10 centímetros en cada incremento de movimiento, entonces éste solamente puede llegar a un punto localizado 5 centímetros antes del objetivo o a 5 centímetros después del objetivo.

Ignorando de momento las inexactitudes mecánicas que reducirían la exactitud del robot, podríamos definir inicialmente la exactitud, en este supuesto más desfavorable, como una mitad de la resolución de control. La exactitud del robot varía dentro de su espacio de trabajo, tiende a ser peor cuando el brazo está en el rango exterior de su espacio de trabajo y mejor cuando el brazo está más próximo a su base, debido a su forma o estructura. La repetibilidad es la capacidad del robot para situar su muñeca o efector final unido a su muñeca, en un punto en el espacio que se hubiera enseñado con anterioridad al robot.

Los errores de repetibilidad forman una variable aleatoria y poseen una distribución estadística; sería adecuado que estos errores formarían una distribución normal. Cuando los errores de varios ejes de movimiento del robot se combinan, tiende a formar una distribución normal, ya que está influido por el teorema del límite central, que establece que la suma de variables aleatorias tiende a formar una variable normalmente distribuida, aun cuando los componentes individuales procedan de una distribución distinta de la normal.

5. IMPLEMENTACIÓN

5.1. *Software* del robot

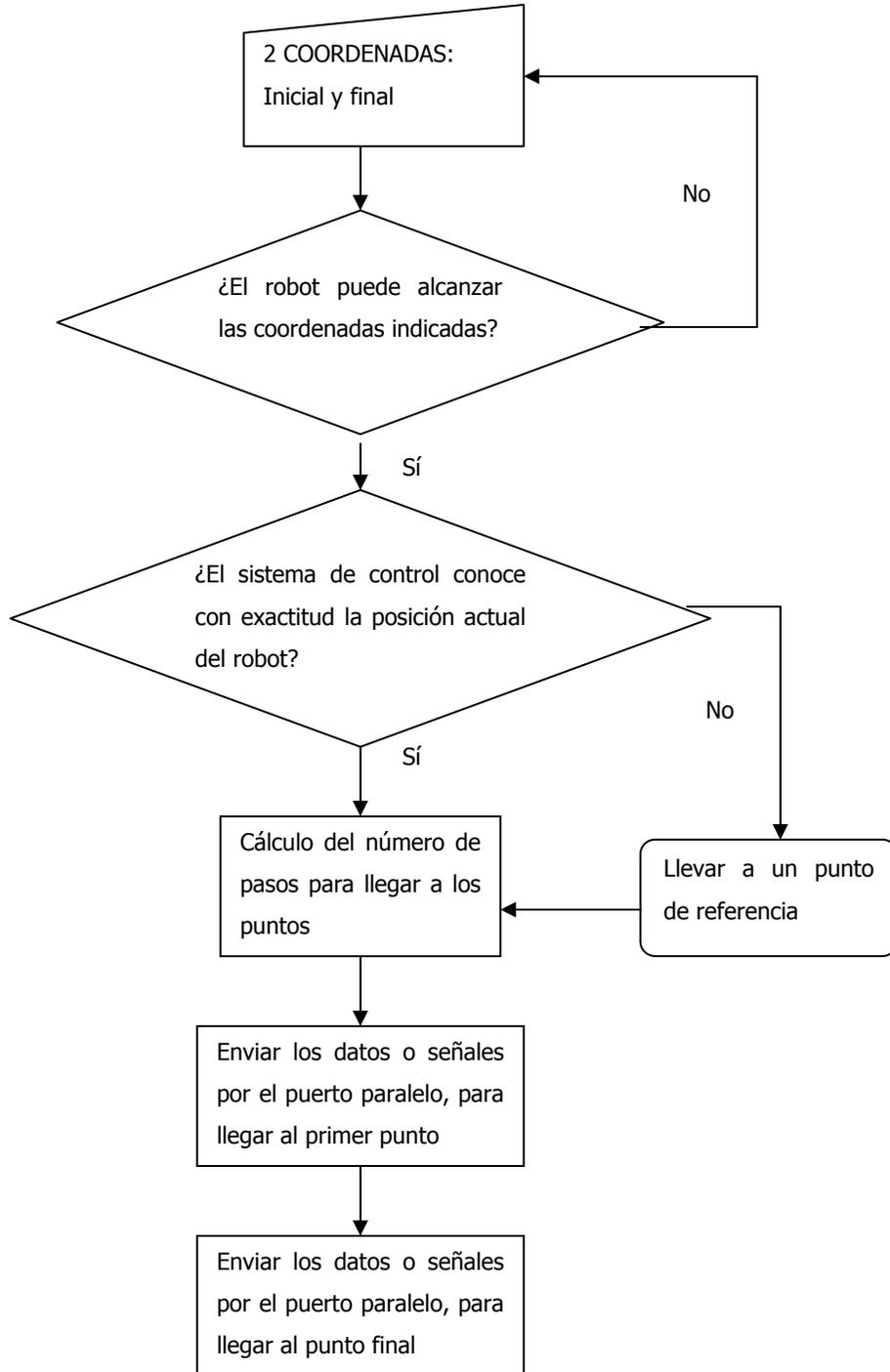
El programa de computadora o *software* fue desarrollado para implementar el sistema de control del robot, se basa en un algoritmo que tiene como entrada dos vectores de 3 componentes indicados por el usuario, realiza los cálculos para diseñar una trayectoria que permite al robot moverse de su posición actual, primer vector, y después al segundo vector o final. Los movimientos que realiza el robot se realizan sobre un plano, al conjuntar los movimientos de las articulaciones, se produce el efecto de movilizarse en un espacio de tres dimensiones. El algoritmo del sistema de control del robot se describe a continuación:

1. El usuario debe ingresar dos puntos en un sistema de tres coordenadas, el primero indica el punto donde se encuentra un objeto, y el segundo a donde se desea que el robot mueva ese objeto.
2. El robot debe encontrarse situado en un punto de referencia fijo, para poder calcular el ángulo y la distancia que debe desplazarse, además de la dirección en la cual deben rotar los ejes de las articulaciones para alcanzar los puntos indicados en el paso anterior. Estos cálculos se realizan con funciones e identidades trigonométricas; los parámetros que se utilizan son la ubicación actual que se toma como punto de referencia, el punto al cual se desea llegar, la longitud de cada articulación del robot, los rangos de operación y los factores de imprecisión de las articulaciones. Este cálculo

también se realiza para determinar la trayectoria para llegar al segundo punto, y se toma como punto de partida el primer punto.

3. Se determina si es posible que alguna configuración física del robot pueda alcanzar los dos puntos indicados. Si los puntos se encuentran dentro de su espacio de trabajo válido, se continúa con el proceso.
4. Con los datos obtenidos en el paso número dos, se obtienen los ángulos de articulación, y si existe más de una trayectoria posible para alcanzar el objetivo, se optimiza la ruta evaluando dos criterios distancia y estabilidad.
5. Después de determinar la trayectoria, el sistema de control calcula la secuencia de datos o señales que debe ser enviada por medio de la computadora al circuito de control, para que se ejecuten los movimientos.
6. Se envían la secuencia de datos por el puerto paralelo hacia los motores de las articulaciones y el motor que activa la pinza.
7. Cuando se llega al punto en donde se debe encontrar la pieza de trabajo, el sistema de control envía las instrucciones para que la pinza logre sujetar la pieza de trabajo.
8. Después de sujetar la pieza de trabajo, el robot se desplaza al punto final.

Figura 20. Diagrama del algoritmo del sistema de control

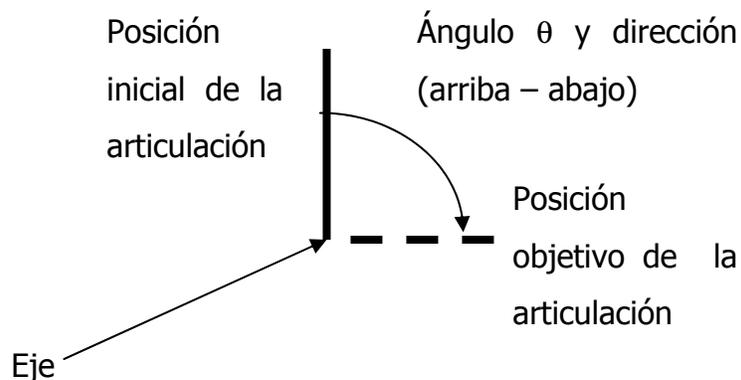


En el desarrollo del *software* se utilizaron ciertas funciones, teoremas y se determinaron utilizar ciertas medidas y reglas; éstas se listan a continuación:

- ✓ Los valores de los ángulos de articulación, los ángulos de variación en los movimientos de los motores y los límites de operación se utilizan en radianes.
- ✓ La longitud de las articulaciones del robot son manejadas por el *software* en milímetros.
- ✓ Las funciones trigonométricas que se utilizan son Seno y Coseno, identidades trigonométricas, el teorema de Pitágoras y la Ley de los Cosenos.

Para calcular la trayectoria que debe ejecutar el robot, para cada articulación se obtiene un ángulo y la dirección del movimiento. El ángulo, en radianes determina cuánto debe rotar esta articulación desde su posición actual, y la dirección indica la orientación que debe tomar este movimiento de rotación. Dependiendo del tipo de articulación, la dirección puede ser derecha-izquierda o arriba-abajo.

Figura 21. Ejemplo de ángulo de articulación y dirección del movimiento

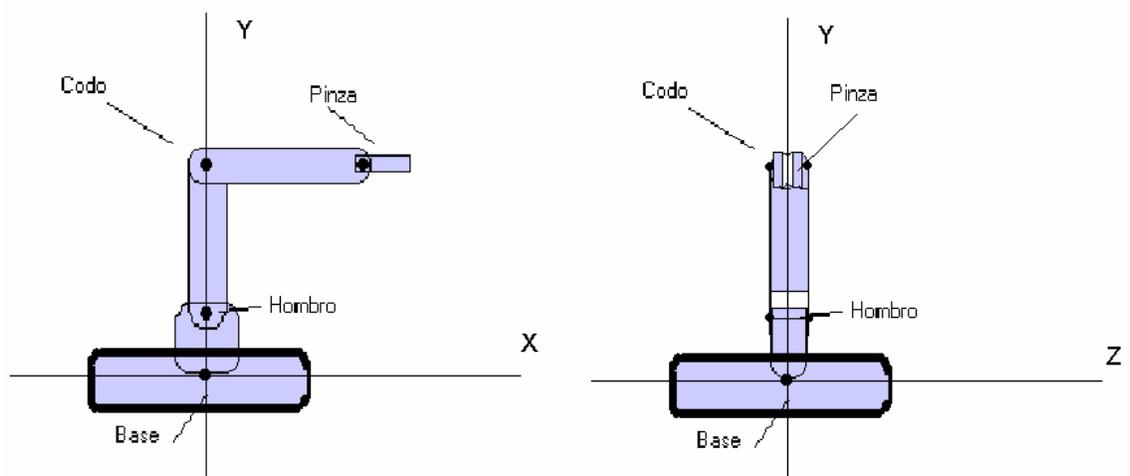


La figura anterior, muestra un ejemplo de un ángulo de articulación θ , que debe rotar una articulación sobre su eje, desde una posición inicial hasta una posición objetivo o final, con una dirección a favor de las agujas del reloj.

Se definió una nomenclatura para identificar a cada una de las articulaciones, y señalar los ejes sobre los cuales se moverá. La base se mueve sobre el plano XZ, el hombro gira sobre el plano XY, al igual que el codo, y la pinza se desplaza también sobre un plano XZ.

Por facilidad de cálculo, para determinar los ángulos de articulación y las direcciones de los movimientos, el sistema de control procesa la información de la siguiente forma: primero obtiene el ángulo de la articulación que se desplaza sobre el plano XZ (base) y la dirección (derecha-izquierda). Los dos ángulos restantes el del hombro y el codo, se obtienen sobre el plano XY.

Figura 22. Nomenclatura de las partes del brazo robótico



Se obtiene el ángulo de la articulación del hombro, y del codo con el mismo procedimiento, ya que estos dos valores determinan si la configuración física que debe adoptar el robot para llegar a determinado punto es físicamente posible, estos cálculos se realizan con funciones y teoremas trigonométricos. La posición del robot, antes de ejecutar el movimiento, es la que determina la dirección de los movimientos que se deben realizar.

Para que el robot realice ciertos movimientos, el sistema de control ejecutan operaciones matemáticas para el cálculo de la trayectoria. Estas operaciones y los criterios de selección de la trayectoria que debe ejecutar el robot se describen a continuación:

Sean dos puntos P_0 y P_1 tales que:

$P_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ es el punto inicial o posición inicial de la pinza del robot

$P_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ es el punto final al que se desea mover la pinza del robot

Sea A_x una articulación de un robot con tres articulaciones, donde $x = \{\text{Base, Hombro, Codo}\}$

$\forall A_x$ tenemos un θ_x , que es el ángulo de la articulación.

\forall movimiento de traslación, que el robot tenga que realizar para movilizar su efector desde el punto P_0 al punto P_1 , se tienen que obtener un $\theta_x \forall A_x$, del robot.

Por facilidad de operación, el algoritmo utilizado determina primero el θ_{base} , luego el θ_{hombro} y finalmente el θ_{codo} .

\forall movimiento de rotación de una A_x existen dos puntos P_{x0} y P_{x1} .

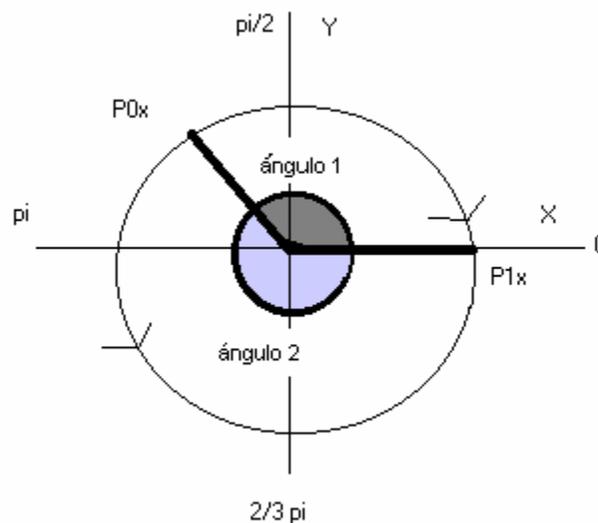
$P_{x0} = (X_{x0}, Y_{x0})$ es el punto inicial donde se encuentra el extremo de la articulación.

$P_{x1} = (X_{x1}, Y_{x1})$ es el punto final a donde se desea mover el extremo de la articulación.

\forall movimiento de rotación de una A_x existen dos posibles ángulos θ_x para realizar el movimiento de desplazar el extremo de la articulación del punto P_{x0} al punto P_{x1} .

La figura 23 muestra de mejor forma que se puede llegar en un plano de dos dimensiones, desde el punto P_0 al P_1 , de dos formas girando de derecha – izquierda, distancia más corta, o bien girando de izquierda – derecha, distancia más larga.

Figura 23. Ángulos de rotación para una articulación



\Rightarrow Se procede a determinar el θ_{hombro} y el θ_{codo} , sobre el plano XY, tal que permitan llegar desde el punto (X_0, Y_0) al (X_1, Y_1) .

⇒ Para cada A_x habrá θ_x , que debe desplazarse para provocar el efecto de mover el efector del robot del P_0 al P_1 .

⇒ Para cada A_x existe una dirección hacia la cual debe girar θ_x , para llegar al punto P_1 . Determinada como se demostró anteriormente por la distancia más corta que debe de girar la articulación.

El programa posee una pantalla en la cual el usuario debe ingresar dos coordenadas o puntos (ver figura 24). Este punto representa una posición dentro de un sistema de tres coordenadas, los valores X y Z, representan valores dentro de un plano horizontal, ahora el valor Y indica valores en un plano vertical. Éstos representan medidas del sistema real en donde se encuentra el robot, y se especifican en milímetros.

Figura 24. Pantalla para el ingreso de coordenadas

PARAMETROS

Coordenada del objeto X Y Z

0	0	0
---	---	---

Coordenada final X Y Z

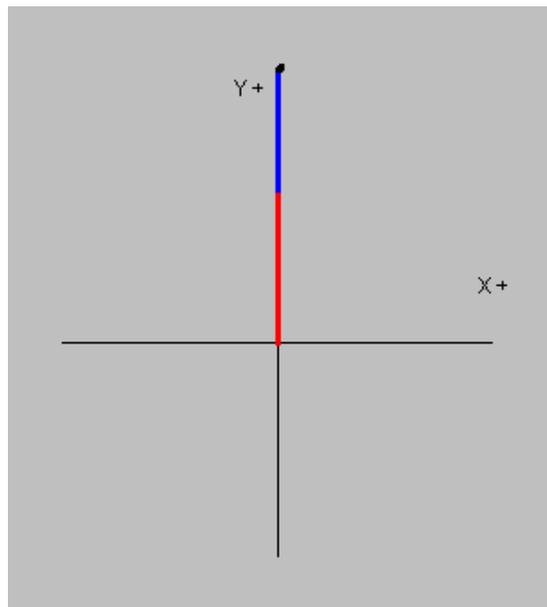
0	0	0
---	---	---

Aceptar Cancelar

Después de ingresar estos puntos, el usuario debe presionar el botón "Aceptar" para que el programa tome estas entradas y ejecute los movimientos indicados. Si el programa determina que los movimientos indicados, se encuentran dentro del entorno de trabajo definido para el robot, ejecuta los movimientos para llegar a las coordenadas indicadas.

El programa despliega tres vistas, que simulan los movimientos que en la realidad esta ejecutando el robot, éstas se encuentran sobre los planos XZ, XY y YZ.

Figura 25. Ejemplo de vista del plano XY en el programa



Las vistas que muestra el programa tratan de ilustrar al usuario como se están ejecutando los movimientos del brazo mecánico. La vista del plano XY, es la que se muestra en la gráfica anterior, el objetivo de ésta es mostrar al usuario cómo se observa el robot visto desde el plano XY, con rojo se marca la articulación que va de la base del brazo mecánico al codo, y con azul, la que va del codo a la pinza.

Cuando el robot se encuentra en movimiento, en las vistas se reflejan los cambios que sufre su configuración física, para adaptarse a una posición capaz de alcanzar ciertos puntos en el espacio. En las vistas se indica con el signo "+", el lado de los valores positivos de la coordenada que se grafica.

5.2. Circuitos del robot

El sistema mecánico del robot es activado por motores paso a paso que funcionan con electricidad; se diseñó y construyó un circuito para que el robot fuese capaz de ejecutar movimientos autónomos. En la etapa de análisis, preliminar a la elaboración del circuito se identificaron algunos factores, estos fueron los que determinaron la forma y funcionalidad del circuito, a continuación se presentan los más importantes:

- ✓ Una computadora enviará las señales a los motores por medio del puerto paralelo.

- ✓ Todos los motores que serán utilizados poseen 5 líneas en las cuales reciben las señales para ejecutar sus movimientos, 4 son de control y 1 para la alimentación de la fuente de energía.

- ✓ En total son necesarias 18 líneas o canales de comunicación entre el circuito y la computadora.
- ✓ El número de canales de comunicación bidireccionales que posee un puerto paralelo de una computadora es menor a la cantidad de líneas requeridas, debe existir multiplexación de la información.
- ✓ La tierra de las fuentes de poder, que emiten los voltajes necesarios para que funcione el circuito y la de la computadora, deben de conectarse entre sí para permitir el flujo de la transmisión de datos sin interferencias o ruidos.
- ✓ La señal enviada por la computadora es emitida en un voltaje inferior al necesario para activar los motores.

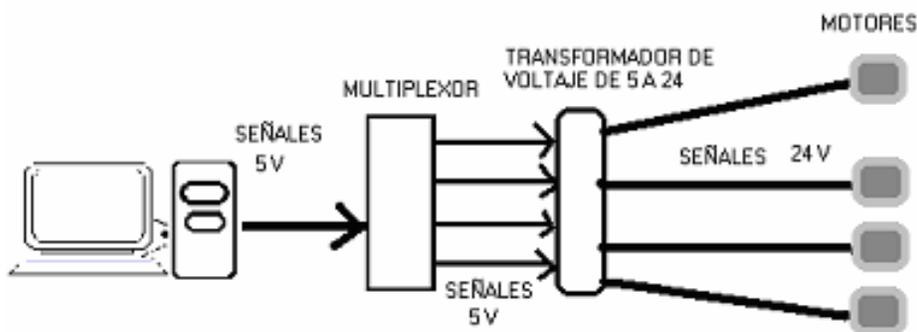
Tomando en cuenta los factores de la cantidad de líneas disponibles en el puerto paralelo y la inestabilidad u oscilaciones en el mecanismo provocada por los movimientos, se decidió que los movimientos en las articulaciones no serían simultáneos y que solamente una articulación podrá ser activada a la vez. Con esta condición y los factores anteriores, se debía diseñar un circuito con las siguientes características:

- ✓ Capaz de recibir la señal enviada por la computadora, memorizarla y transmitirla solamente a un motor.
- ✓ Las señales enviadas por la computadora son de 5 Voltios, y deben ser transformadas en 24 Voltios, para que los motores funcionen y provoquen los movimientos.

- ✓ Debe existir un sistema de protección entre el circuito del robot y la computadora, para prevenir daños en cualquiera de los dos dispositivos.

En la siguiente figura se puede observar un diagrama de bloques de los componentes del circuito del robot.

Figura 26. Diagrama de bloques del circuito del robot



Se determinó utilizar solamente ocho canales de comunicación del puerto paralelo, para la comunicación de la computadora y el circuito robot, y se instaló un dispositivo 74LS244, que funciona como protección entre el circuito y la computadora. Por éste pasan los seis canales que se utilizan para el envío de la señal hacia los motores.

En la siguiente tabla se muestra la distribución de las ocho líneas que posee el puerto paralelo, además se identifica la función que tendrá cada una de estas. La nomenclatura del puerto paralelo de una computadora, identifica cada línea o canal de comunicación con un número, se identifica también el número de canal que será utilizado.

Tabla II. Canales del puerto paralelo que serán utilizados

Número	Canal	Función	Tipo
2	Data 0	Pulsos para activar el motor	Salida
3	Data 1	Pulsos para activar el motor	Salida
4	Data 2	Pulsos para activar el motor	Salida
5	Data 3	Pulsos para activar el motor	Salida
6	Data 4	Direccionamiento del motor A	Salida
7	Data 5	Direccionamiento del motor B	Salida
8	Data 6	Sin utilizar	
9	Data 7	Sin utilizar	

Debido a que solamente seis señales podrá enviar la computadora al circuito del robot, se instaló un multiplexor para que pueda conmutar las señales enviadas, entre los cuatro motores. Otras 16 compuertas lógicas de tipo AND, son instaladas para que contribuyan a la misma tarea.

Este proceso de redireccionar las señales funciona de la siguiente forma: el multiplexor recibe dos señales, por medio de los canales Data 4 y Data 5, es necesario aclarar en este punto que estas líneas de comunicación son digitales y solamente pueden tener dos valores (0 a 1.5 Voltios, que se interpreta por los componentes del circuito como 0 lógico, y 4.5 a 5.0 Voltios, que es interpretado como un 1 lógico). Dada esta situación, solamente pueden existir cuatro combinaciones (ver tabla III), el multiplexor posee cuatro salidas, dependiendo de la combinación ingresada solamente una de ellas se habilitará con un valor 1 lógico, y las otras tendrán un 0 lógico.

Tabla III. Señales que le indican al circuito qué motor debe activarse

Data 4	Data 5	Motor habilitado
0	0	Pinza
0	1	Hombro
1	0	Codo
1	1	Base

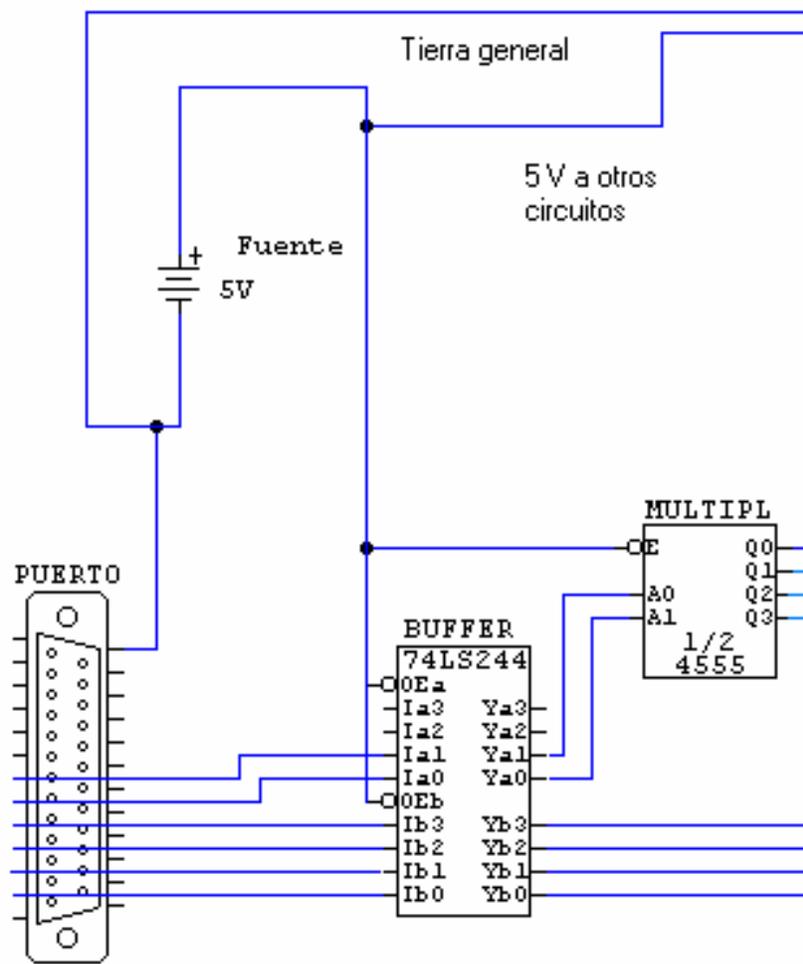
Estas cuatro configuraciones le indican al multiplexor a que motor va dirigida la información que viaja por los otros cuatro canales. Entonces cada una de las salidas del multiplexor se comunica a 4 compuertas AND. Estas compuertas poseen dos entradas y una salida. La otra entrada de las compuertas AND es una de las señales enviadas por la computadora por los canales Data 0-3. En total, para cada motor existen cuatro compuertas AND, éstas con dos entradas cada una, una entrada es común, y viene del multiplexor, y la otra es alguna de las señales que, como se indicó, vienen en los canales Data 0-3.

Se podría decir que los cuatro canales Data 0-3, se comunican con todos los motores, y el *switch* que habilita el paso de la información son las compuertas AND. Vale la pena recordar que en una compuerta de este tipo, si ambas entradas son 1 lógicos, producen la salida de un 1 lógico, en cualquier otro caso la salida es un 0 lógico. Cuando el multiplexor habilita determinado motor, en las cuatro compuertas AND que se comunican con este motor, existirá una entrada con valor 1, y si se esta enviando alguna información que viene en formato de 1 lógico, se habilitará un 1 lógico, si la información enviada viene en formato de 0 lógico, se produciría la salida de un 0, por lo cual la información pasa directamente al motor sin ninguna alteración.

En las compuertas de los otros motores, como una de sus entradas tiene valor 0, se encontrarán bloqueadas y sus salidas serán ceros lógicos, y estas no provocan efecto alguno en los otros motores.

En la siguiente figura se muestra las líneas del puerto paralelo que van al *buffer* y al multiplexor del circuito del robot.

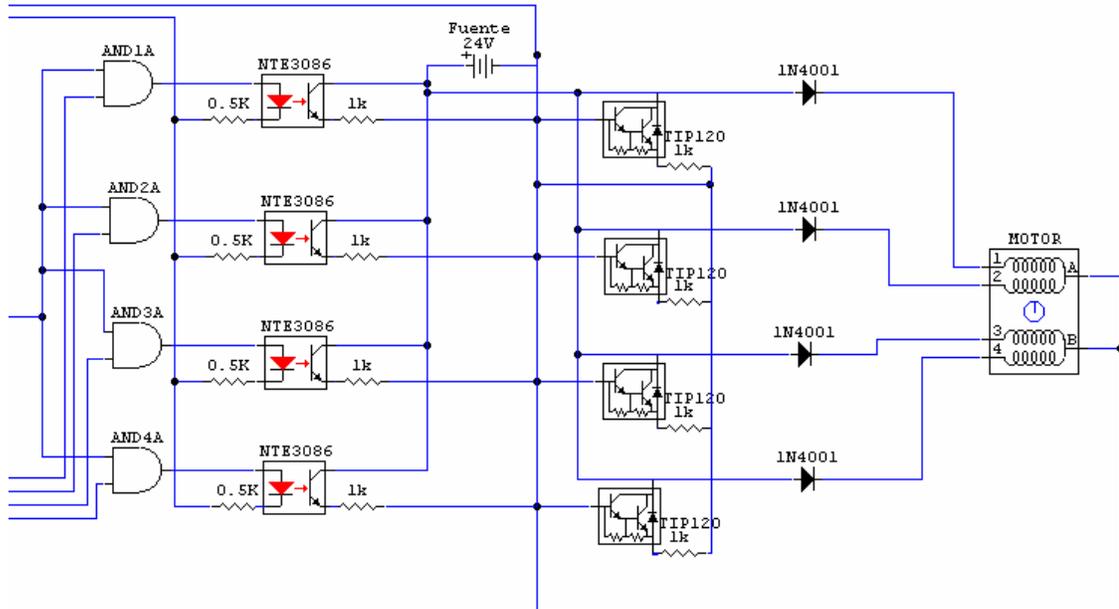
Figura 27. Diagrama de una parte de circuito, muestra la conexión entre el puerto paralelo, el *buffer* 74LS244 y el multiplexor



Cuando la señal pasa enviada por la computadora es habilitada por las compuertas AND, aún es de 5 Voltios, y como se recordará los motores del robot funcionan con 24 voltios. Antes de que la señal llegue a los motores se diseñó y construyó otra parte del circuito que se encarga de transformar las señales eléctricas de 5 voltios a 24 voltios. Para esto se utilizaron opto aisladores que se activan con la señal de 5 voltios (ver figura 28), cuando el opto aislador detecta una señal de 5 voltios, se activa su salida que está conectada a la base de un transistor, se excita y el emisor se satura con 24 voltios, los cuales son enviados directamente al motor.

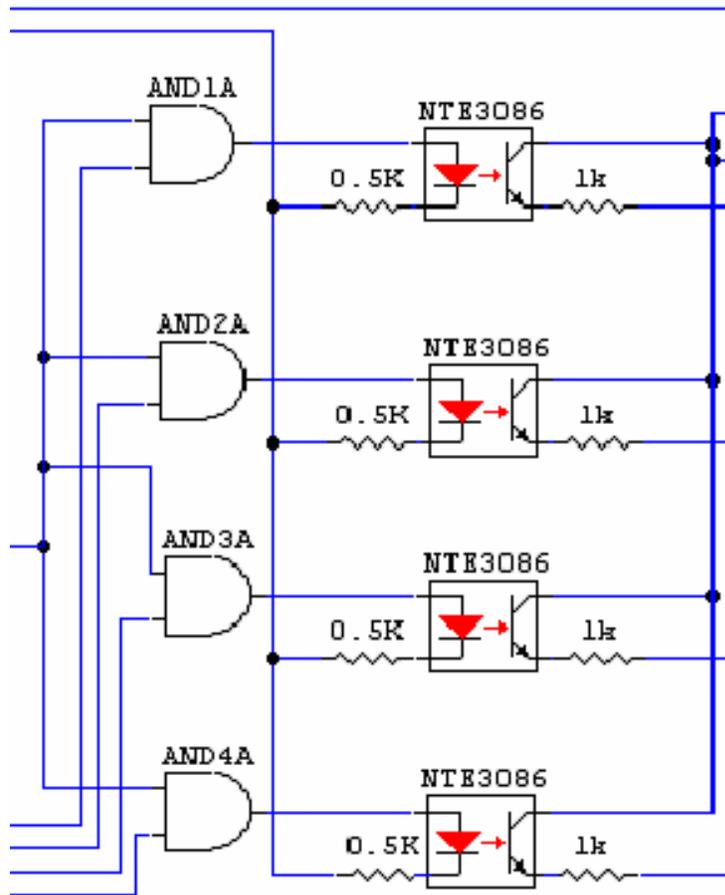
El propósito de los opto aisladores es proteger al multiplexor y las compuertas AND de posibles daños, por problemas en los transistores o los motores.

Figura 28. Diagrama de una parte del circuito, muestra las compuertas AND, y los componentes que transforman las señales recibidas de la computadora a un voltaje superior



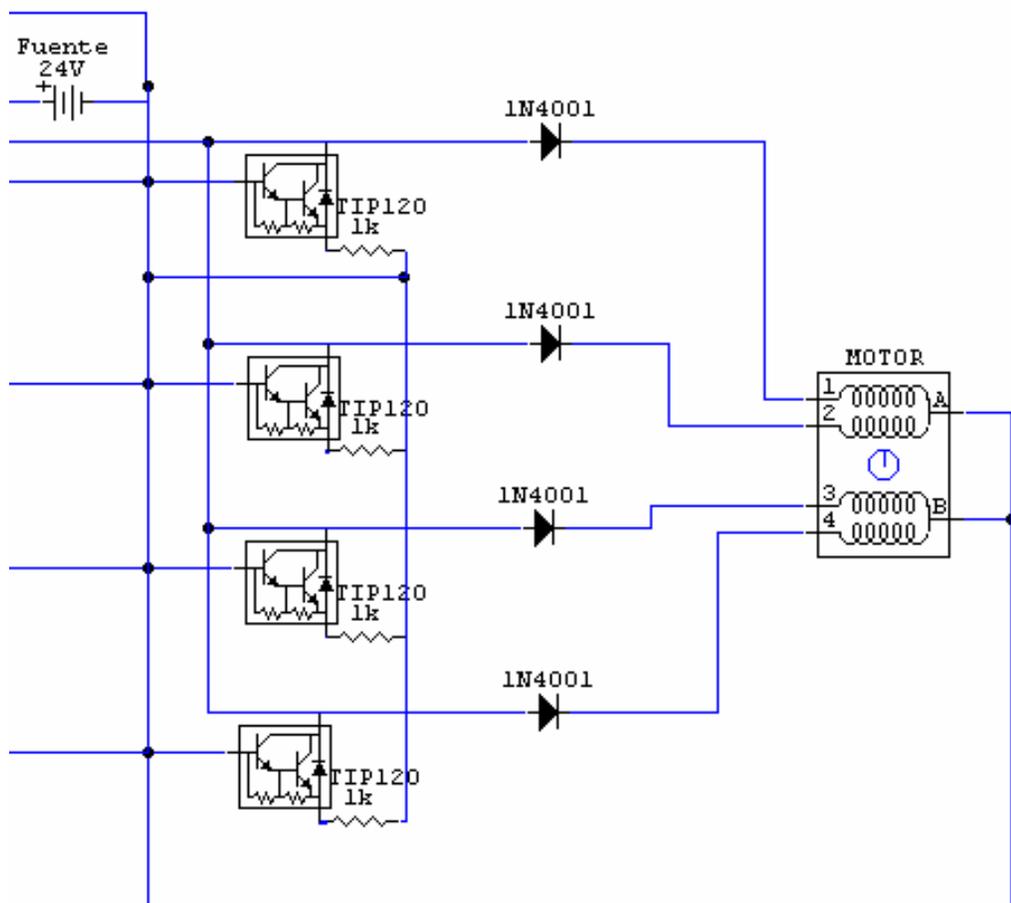
Para generar el voltaje y amperaje necesarios para el funcionamiento del robot y sus dispositivos, se utilizaron tres fuentes de energía eléctrica, una produce salidas de 5 voltios, las otras dos poseen salidas de 12 voltios. Estas dos últimas fuentes se conectaron en serie, para producir una salida conjunta de 24 voltios.

Figura 29. Diagrama de una parte del circuito, muestra las compuertas AND y los opto aisladores



En la figura anterior se muestra más claramente como se conectaron las compuertas AND a los opto aisladores, la configuración de las resistencias utilizadas. Se muestra cómo son internamente los opto aisladores utilizados.

Figura 30. Diagrama de una parte del circuito, muestra los transistores, diodos, resistencias, y cómo se conectan a un motor

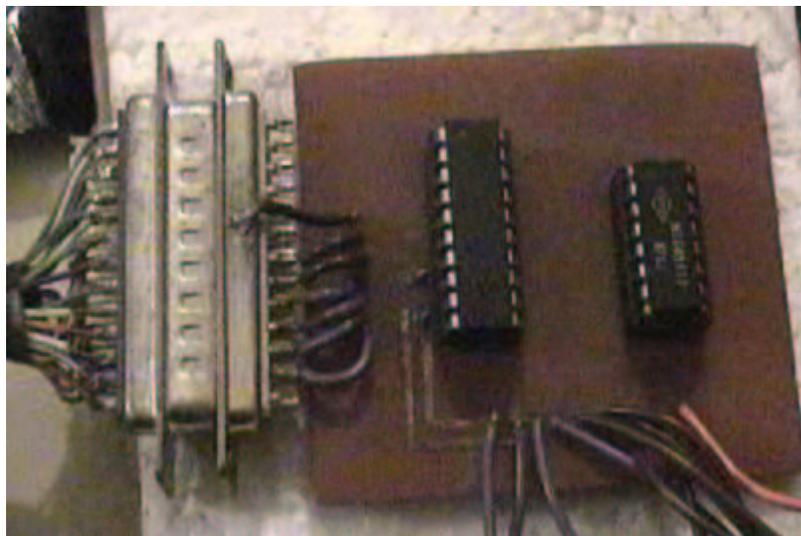


La figura anterior nos muestra los valores de las resistencias y cómo se conectaron los transistores y los diodos con el motor. El objetivo de los diodos es evitar que exista retorno de corriente entre el motor y el circuito, pues una situación de estas provocaría daños en este último.

Posterior al diseño del circuito, se realizaron pruebas en *protoboard*, utilizando los componentes e integrados que se iban a utilizar, después de las pruebas respectivas, se procedió a la construcción del circuito en placas de cobre, de doble cara, para facilidad de construcción y así evitar cruce de conexiones no deseadas.

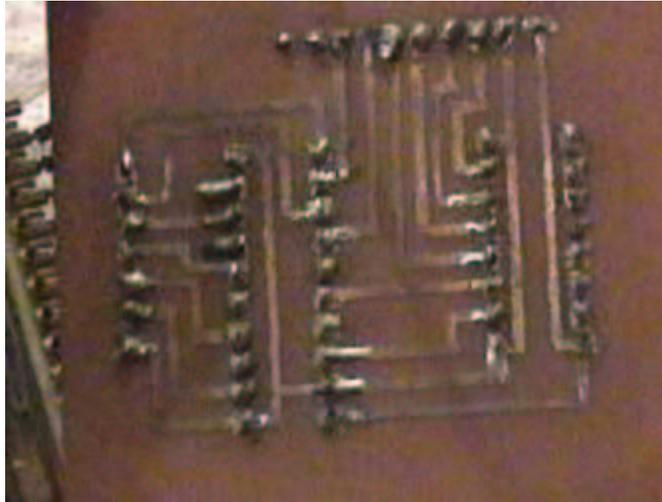
Por facilidad se segmentó la construcción del circuito, se desarrollaron cinco placas por separado, una para el conector que comunica al puerto de la computadora con el circuito, el *buffer* entre la computadora y el multiplexor (ver figuras 31 y 32). En esta placa todos sus componentes funcionan con 5 voltios.

Figura 31. Vista superior de la placa donde se encuentra instalado el *buffer* y el multiplexor



Estas figuras muestran la placa que contiene la primera parte del circuito, conecta las señales de la computadora con las otras partes del circuito, además de seleccionar de una vez el motor que será utilizado, esto mediante el multiplexor y sus salidas.

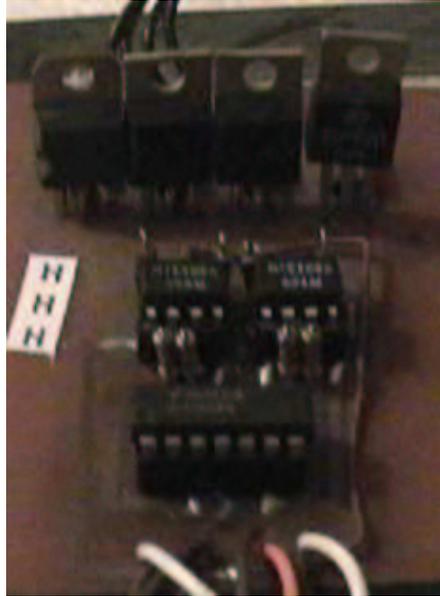
Figura 32. Vista inferior de la placa donde se encuentra instalado el *buffer* y el multiplexor



Como se utilizaron placas de cobre de doble cara, la parte superior e inferior de estas placas fueron utilizadas. En la gráfica anterior se muestra una vista inferior de la placa donde se encuentra instalado el multiplexor.

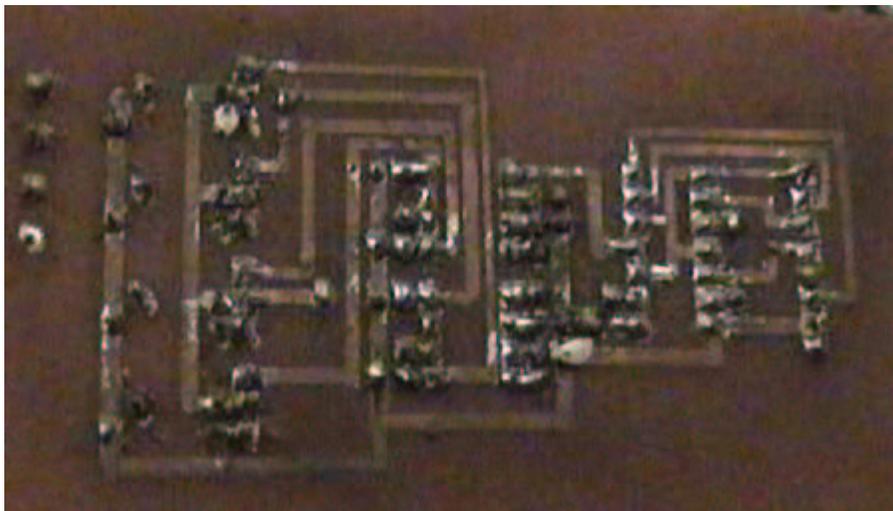
Se desarrollaron otras cuatro placas iguales (ver figuras 33 y 34), que funcionan con componentes que operan con 5 y 24 voltios, se utiliza para habilitar la señal a los motores y transformarla en señales de 24 voltios.

Figura 33. Vista superior de la placa donde se encuentran instaladas las compuertas AND, los opto aisladores y los transistores



Al igual que la primera placa, en la parte inferior de la misma también se instalaron conexiones, y se muestran a continuación.

Figura 34. Vista inferior de la placa donde se encuentran instaladas las compuertas AND, los opto aisladores y los transistores



Cada una de estas placas posee cuatro salidas, las cuales están numeradas del 1 al 4, y éstas son conectadas a las cuatro entradas de control de alguno de los motores.

Las fuentes de energía instaladas tuvieron que cumplir ciertos requisitos, en cuanto al amperaje que pueden llegar a tolerar, ya que la demanda de los motores así lo requiere. Además, se requiere de fuentes que generen el voltaje requerido de una forma estable, para que los componentes electrónicos no se dañen.

Figura 35. Ejemplo de fuente de energía utilizada



5.3. Mecánica del robot

Se utilizaron cuatro motores, material plástico y metálico, para la construcción del brazo robótico. Cada una de las tres articulaciones del robot es activada por medio de un motor paso a paso, un cuarto motor se utiliza para activar la pinza. La estructura está diseñada de tal forma que los motores puedan transmitir los movimientos a través de engranajes o poleas, de tal forma que se obtengan los movimientos deseados tanto de las articulaciones como los de la pinza.

Los motores utilizados poseen en sus ejes engranajes, que se utilizaron para conectar a otros engranajes para realizar la transmisión del movimiento y la fuerza, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 36. Ejemplo de motores paso a paso utilizados



Los motores utilizados no producen demasiada fuerza cuando se activan, por lo cual se utilizaron engranajes para multiplicar la fuerza. La multiplicación de las fuerzas por medio de engranajes y poleas con fajas dentadas permitió definir un espacio de trabajo estable para el dispositivo, en el cual el mismo se puede movilizar sin un alto grado de imprecisión e inestabilidad.

Figura 37. Ejemplo de engranajes y fajas utilizadas en las partes mecánicas del robot



La multiplicación de la fuerza con los engranajes es proporcional al tamaño del diámetro del engranaje al que se le transmite la misma. Se utilizaron engranajes de mayor diámetro al del engranaje del motor, y transmisiones paralelas de potencia, para multiplicar la fuerza; las poleas de fajas dentadas solamente se utilizaron para la transmisión del movimiento y fuerza, ya que éstas no causan ningún efecto adicional al movimiento.

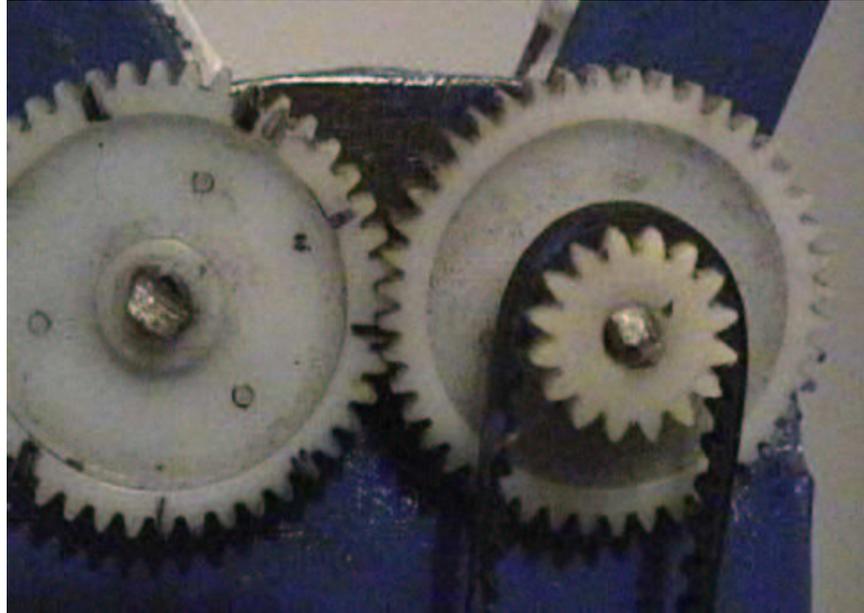
Figura 38. Estructura del codo del brazo robótico



Se utilizaron cojinetes para sujetar los ejes de las articulaciones a la estructura del robot para que puedan realizar algún tipo de movimiento. Un ejemplo de estas estructuras mecánicas se muestra en la figura anterior.

Los engranajes utilizados son plásticos, debido a que producen una resistencia por la fricción inferior a la que pudieran ejercer engranajes de otro material, los cojinetes y la estructura de las articulaciones sí son de un material metálico, y las fajas dentadas son de un material similar a la lona.

Figura 39. Ejemplo de la estructura de los engranajes que mueven los dedos de la pinza



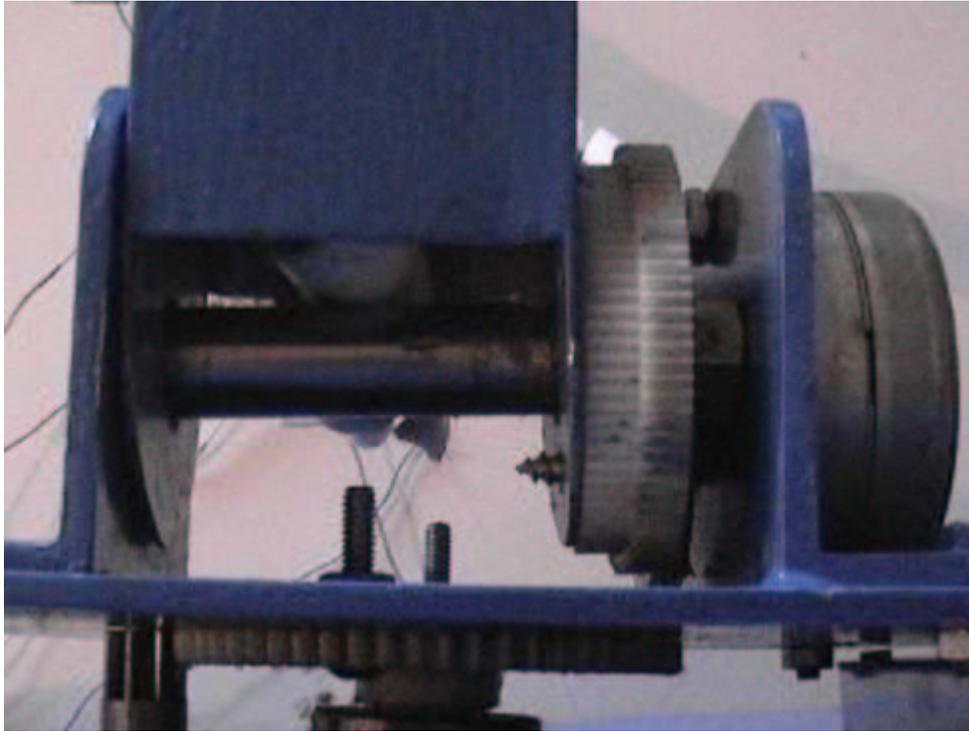
Para la activación de la pinza se utilizaron engranajes y una faja. Para la transmisión del movimiento, como se puede observar en la siguiente figura, el motor se encuentra localizado cerca del codo del robot, y por medio de la faja transmite la fuerza para generar el movimiento. Dependiendo del sentido de rotación del motor, provoca que la pinza se abra o se cierre.

Figura 40. Sistema de engranajes y poleas para activar la pinza



En la articulación del codo se utilizó un sistema combinado de poleas y engranajes para generar el movimiento, en la articulación de la base y el hombro solamente se utilizaron engranajes.

Figura 41. Sistema de engranajes paralelos implementados en una de las articulaciones



A continuación se muestra una imagen completa de la estructura final del robot.

Figura 42. Estructura final del brazo robótico



5.4. Notas importantes

La parte mecánica de un robot, que comprende sus articulaciones, motores, circuitos, efectores, engranajes, fajas, poleas, pinzas, son la parte esencial de este tipo de dispositivos, ya que su funcionamiento y las características de su estructura determinan las capacidades del robot, tales como el espacio de trabajo en el cual se puede desenvolver, la fuerza que puede ejercer, el grado de inestabilidad, la precisión, la fuerza de sus articulaciones, la velocidad, etc.

El sistema de control desarrollado, con base a las características físicas de la estructura del robot, es capaz de calcular las trayectorias que el brazo mecánico debe ejecutar para llegar a determinado punto. Antes de realizar cualquier movimiento, el sistema de control debe verificar que todos estos se realicen dentro del espacio de trabajo permitido, en caso contrario, puede suceder que el robot se salga del espacio de trabajo y las piezas se dañen y el mecanismo se quede trabado. Lamentablemente, por tiempo, costos y complejidad, no se pudieron instalar en este mecanismo sensores de posición, capaces de determinar los puntos en los cuales se encuentran las articulaciones.

Para determinar con exactitud los grados de imprecisión, y las distancias que se mueve cada articulación por cada impulso o señal enviada al motor de la misma, se realizaron pruebas que consistían en medir la posición actual del mecanismo, luego enviar cierta secuencia de datos al motor de la articulación, y al final medir la posición en la cual terminaba. Estas pruebas eran realizadas de varias formas, en distintas posiciones del mecanismo y con distintas secuencias de datos. Se determinó que existían posiciones en las cuales la estructura física, por el peso y el sistema de transmisión de potencia utilizado, colapsaba y provocaba que los engranajes se quedaran atorados, y que no se produjera el movimiento.

Conforme a estas pruebas, se determinaron posiciones físicas del robot, que son estables y controlables por el sistema, por lo cual se determinaron los rangos de operación para cada articulación, para que no se permita que el robot pueda moverse más allá de éstos y que el mecanismo ya no funcione.

Posterior a la determinación de los rangos de operación, se realizaron las pruebas de precisión de movimientos ya dentro del espacio de trabajo definido. Éstas determinaron pequeñas imprecisiones, las cuales al ser promediadas y evaluadas, resultaron ser insignificantes, ya que el robot opera con distancias medidas en milímetros, y las imprecisiones resultaban ser menores a décimas de milímetros. Para las mediciones se utilizaron reglas y transportadores, para medir los ángulos que giraban las articulaciones y la distancia de un punto a otro. Las mediciones realizadas determinaron imprecisiones en promedio menores a 0.0011 milímetros.

Un aspecto importante en la construcción de robots lo constituyen los circuitos. Este robot forma parte de un trabajo de investigación, por distintos motivos no se implementaron ciertas normas de seguridad que en el desarrollo de un robot para un uso específico deben implementarse, para garantizar un alto rendimiento. Por ejemplo, los motores utilizados funcionan con 24 Voltios y demandaban cierta corriente, cuando entran en funcionamiento durante períodos largos de tiempo empiezan a calentarse, al igual que ciertos componentes del circuito, especialmente los transistores, en un robot de uso dedicado se tendrían que cambiar estos materiales por dispositivos contruidos con mejores materiales, que disipen de mejor forma el calor, o se tendrían que implementar sistemas de control de temperatura, para mantener una temperatura promedio, evitando que se dañen los componentes y accidentes.

En la construcción de un robot se debe analizar también si la capacidad de la fuente de energía que alimenta los mecanismos motores, es suficiente para abastecer la demanda de los mismos, ya que las distintas demandas consecutivas de energía de los motores pueden no ser satisfechas.

CONCLUSIONES

1. En el diseño, desarrollo y fabricación de mecanismos autónomos, siempre será necesario implementarlos con un sistema de control, para que les permita interactuar con el entorno de una forma óptima. Este sistema debe evaluar si el funcionamiento del mecanismo es el adecuado y que las acciones que ejecuta contribuyen a realizar sus tareas y cumplir los objetivos que se le hayan ordenado.
2. Posterior a la construcción de la parte mecánica de un robot, es necesario que se realicen pruebas para determinar si existen elementos que no se incluyeron en el diseño y que su presencia o ausencia afectan el desempeño planificado, estas correcciones son necesarias para eliminar ciertas imperfecciones que no se tenían previstas. En la realidad, los componentes mecánicos muchas veces, por ciertas imprecisiones, provocan fallos que hacen colapsar todo el sistema mecánico del robot.
3. Los robots están contruidos con piezas mecánicas y fuerzas externas como la gravedad y fricción, que provocan distintos efectos en estos mecanismos. Los efectos más severos son el desgaste de las piezas y las imprecisiones en los movimientos; dependiendo del tipo de tareas que éstos deben desarrollar determinan también la configuración, la forma de ubicar sus componentes y sus capacidades, además de que todas estas situaciones deben ser

consideradas por el sistema de control, en los planes de mantenimiento y contingencia.

4. Si aumenta la capacidad sensorial de un robot u otro tipo de dispositivo, la complejidad del sistema de control también crecerá. A mayor volumen de información proveniente de los sensores, se requiere de una arquitectura tecnológica capaz de procesar rápidamente la información, algoritmos de control más sofisticados y una base de datos de alto rendimiento. El procesamiento de información se vuelve complejo, por lo que se deben desarrollar planes de contingencia, desarrollo de trayectorias más complejas para evitar colisiones, aprendizaje, etc. (En la actualidad, la inteligencia artificial es la ciencia encargada de realizar estudios de este tipo.)
5. El mayor aporte de la robótica a la humanidad y especialmente a la industria, es que ha contribuido al mejoramiento de la producción, minimizando el tiempo de fabricación, mejorando la calidad y uniformidad de los productos. Lamentablemente, paralelo a este desarrollo es innegable que la implantación de robots en las fábricas e industrias ha generado que se eliminen ciertos puestos de trabajo, pero vale la pena agregar que ha generado otro tipo de empleos más especializados, para ingenieros y técnicos que se dedican a la construcción y mantenimiento de robots.
6. En robótica se trabaja con componentes electrónicos, sensores, computadoras, piezas mecánicas y motores, las restricciones y limitaciones de estos elementos definen las propiedades físicas del

robot, tales como la fuerza, velocidad, tiempo de funcionamiento, etc.

7. Los beneficios que brinda la robótica en el presente y que brindará en el futuro son muy importantes y beneficiosos para la humanidad, pero no debemos olvidar que su significación social, afectará a la mano de obra humana a todos niveles, desde los trabajadores no especializados, directores de producción, técnicos profesionales. En los países pobres, como es el caso de Guatemala, puede provocar mayor atraso, debido a la falta de acceso a sistemas de información tales como bibliotecas, Internet, etc. y por ende menores oportunidades de desarrollo. Es necesario invertir más en la educación para evitar el atraso tecnológico y económico que tiene el país.

RECOMENDACIONES

1. Se deben usar estándares o especificaciones en los prototipos, diagramas, procesos y variables, al igual que documentación de estos mismos, para la gestión de la información puesto que son importantes y adquieren una mayor relevancia cuando se necesita intercambio de información en proyectos multidisciplinarios. Esta práctica contribuye a la optimización de tiempos de análisis y desarrollo, y mejoramiento de la calidad de los proyectos.
2. Un programa de computación que se utiliza para control de robots debe ser diseñado y desarrollado para que la interfaz con el usuario permita un manejo sencillo y de forma natural del robot. Se pueden implementar simulaciones en pantalla en tiempo real para que muestren al usuario el funcionamiento del robot y ventanas con distintas lecturas obtenidas de los sensores.
3. Las pruebas que se realicen para evaluar el diseño y la implementación del robot, podrían realizarse por medio de simulaciones computarizadas. Es importante evaluar el desempeño del diseño antes de empezar a construirlo para no incurrir en pérdidas de tiempo y dinero. En la fase de construcción del dispositivo, las pruebas unitarias de los componentes que se vayan construyendo son importantes antes de integrarlos al robot.

4. En proyectos multidisciplinarios es importante determinar las interrelaciones entre las distintas disciplinas, para enfocarse en los puntos más críticos e importantes y obtener la cooperación y la información correspondiente de una forma más objetiva, a la vez que esto permita un análisis más sencillo y una fluidez en el manejo de la información.

5. Para mejorar la capacidad sensorial de un robot y dotarlo de un grado alto de inteligencia artificial, se deben tomar en cuenta que los costos, el tiempo y la complejidad para implementarlo se incrementan exponencialmente. En la construcción de un robot, sucede que muchos de los dispositivos que se utilizarán son difíciles de encontrar en el mercado, por lo que deben construirse a la medida.

REFERENCIAS

1. ROBOT Y ROBÓTICA. <http://www.robotics.freeservers.com/robot.htm>.
2. Diccionario Enciclopédico OCÉANO.
3. Espacios de Estado y Sistemas Lineales. Donald M. Wilberg. Página 2.

BIBLIOGRAFÍA

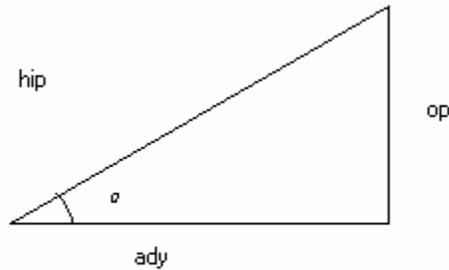
1. **Brazo de movimientos mecánicos PUMA - 560.** Consultada el 29 de noviembre de 2003.
<http://www.chi.itesm.mx/cim/practicas/pract4.html>
2. **Diccionario Enciclopédico OCÉANO.**
3. **Domótica.** Consultada el 23 de noviembre de 2003.
<http://personal.redestb.es/jorgecd/domotica.html>
4. Fu, K. S., et. al. **Robótica: Control, detección, visión e inteligencia.** Tr. Sebastián Dormido Bencomo. México: Editorial McGraw Hill, 1993. 599 p. p.
5. **Glosario de robótica.** Consultada el 10 de septiembre de 2003.
<http://www.robotics.freesevers.com/glosario.htm>
6. Groover, Mikell P., et. al. **Robótica Industrial. Tecnología, programación y aplicaciones.** Tr. Sebastián Dormido Bencomo y Ángel Segado Bernal. México: Editorial McGraw Hill, 1993. 601 p. p.
7. **Motores paso a paso.** Consultada el 15 de agosto de 2003.
<http://comunidad.ciudad.com.ar/internacional/aruba/megatronica/nuevo1.htm>
8. **Sensores.** Consultada el 28 de agosto de 2003.
<http://www.sensing.es/presion.htm>
9. **Sensores transductores.** Consultada el 10 de septiembre de 2003.
http://www.sensing.es/transductor_202.htm
10. **Sistemas de brazos.** Consultada el 23 de noviembre de 2003.
http://usuarios.bitmailer.com/aperobot/sistemas_de_brazos.htm

11. Swokowski, Earl W. y Cole, Jeffery A. **Álgebra y trigonometría con geometría analítica**. Tr. Jorge Humberto Muñoz. México.
12. **Transistores, creaturoides, robótica fantástica**. Consultada el 23 de noviembre de 2003. <http://www.creaturoides.com/puentesh.htm>
13. **Robot y robótica**. Consultada en el año 2003. <http://www.robotics.freeservers.com/robot.htm>
14. **Robótica industrial**. Consultada el 15 de junio de 2003. http://webdia.cem.itesm.mx/ac/jgarrido/87,89_96.htm
15. **Robots**. Consultada el 10 de noviembre de 2003. <http://www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm>

ANEXO

Funciones trigonométricas utilizadas:

Ángulos agudos



$$\text{sen } \theta = \text{op}/\text{hip}$$

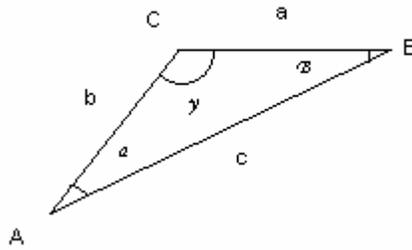
$$\text{cos } \theta = \text{ady}/\text{hip}$$

$$\text{tan } \theta = \text{op}/\text{ady}$$

Teorema de Pitágoras

$$\text{hip}^2 = \text{op}^2 + \text{ady}^2$$

Triángulo oblicuo



$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$