



118
2j

**Universidad Nacional Autónoma
de México**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y CONTROL
DE VEHICULO MANIPULADOR DE
NAVEGACION AUTONOMA PARA
TRANSFERENCIA DE PIEZAS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACION
P R E S E N T A N:
AIMEE VARGAS ESTRADA
MARCO ANTONIO MORALES AGUIRRE
PAUL OSWALDO SALDAÑA NAVA

DIRECTOR: M. EN I. IGNACIO JUAREZ CAMPOS

CD. UNIVERSITARIA, MEXICO AGOSTO DE 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A todos nuestros MAESTROS

Por facilitarnos sus conocimientos y estimular nuestro desarrollo.

AI PUEBLO de MÉXICO

Por darnos el privilegio de la educación en esta su Universidad Nacional.

AI M. en I. IGNACIO JUÁREZ CAMPOS

Por su paciencia y porque más que ser nuestro director de tesis, ha sido una excelente persona que nos ha apoyado incondicionalmente durante el desarrollo de este proyecto.

Aimée, Marco Antonio, Paul.

A mi PADRE

Por sus palabras de aliento y porque en los momentos cruciales, siempre estuvo a mi lado. Gracias papá.

A mi MADRE

Por sus cuidados, apoyo y amor incondicionales.

A mis ABUELOS

Por ser la guía para nunca perder de vista el camino correcto.

A mis HERMANOS

Principalmente a Eusebio, para que éste trabajo sea un aliciente y sepan que en la vida todo es posible.

A MARCO ANTONIO

Por todo el amor y apoyo que día con día me demuestra y porque éste sea el primero de nuestros grandes logros.

Aimée.

A mi PADRE

Por ser siempre el ejemplo del esfuerzo y las ganas de ser el mejor.

A mi MADRE

Por el cuidado que siempre ha tenido en mi educación.

A mi HERMANA

Esperando que este trabajo estimule sus esfuerzos de superación.

A mis ABUELOS

Por su paciencia y estímulo constantes. Especialmente a mi abuelo Ignacio (q.e.p.d.), por su ejemplar forma de vivir.

A AMÉE

Porque su amor, su apoyo y su compañía han sido el sustento más fuerte en los momentos más difíciles a lo largo de estos cinco años.

Marco Antonio.

A DIOS:

Por darme la oportunidad de terminar mi carrera.

A mi MADRE

Por su amor, comprensión y por ser el apoyo mas firme durante mi camino por la vida.

A mi PADRE (q.e.p.d.)

En cualquier lugar donde se encuentre por el ejemplo de humildad y superación que nos dejó a mi hermano y a mi.

A mis ABUELITOS

Por soportarme y apoyarme.

A mi HERMANO ÁLVARO

Por ser un ejemplo a seguir y por todos sus consejos tan valiosos que me ha confiado

A ALEJANDRA

Por confiar tanto en mi, por sus ánimos y amor tan necesarios que me ha dado para concluir la carrera.

A mis FAMILIARES y AMIGOS

Por su apoyo incondicional que me han brindado en todas las etapas de mi vida.

Paul.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| OBJETIVO..... | IX |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | X |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1. <u>Justificación</u> | 3 |
| 1.2. <u>Definición del problema</u> | 4 |
| 1.3. <u>Metodología de trabajo</u> | 6 |
| II. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL..... | 8 |
| 11.1. <u>Estado del arte de los sistemas de manufactura flexible</u> | 9 |
| 11.2. <u>Antecedentes de vehículos de guía automática (VGA's)</u> | 11 |
| 11.3. <u>Objetivos de los VGA's</u> | 13 |
| 11.4. <u>Aplicaciones de los VGA's</u> | 14 |
| 11.5. <u>Sistemas constitutivos de los VGA's</u> | 15 |
| 11.6. <u>Sistemas de navegación</u> | 16 |
| 11.6.1. <u>Sistemas de navegación basados en láser</u> | 17 |
| 11.6.2. <u>Sistemas de navegación basados en ultrasonido</u> | 19 |

| | |
|---|-----------|
| II.6.3. Navegación por radiocontrol..... | 20 |
| II.6.4. Sistemas ópticos..... | 21 |
| II.6.5. Guía de alambre subterráneo..... | 22 |
| II.7. Estado del arte de los VGA's..... | 22 |
| II.8. Antecedentes de los manipuladores..... | 24 |
| II.9. Objetivos de los manipuladores..... | 26 |
| II.10. Aplicaciones de los manipuladores..... | 27 |
| II.11. Sistemas constitutivos de los manipuladores..... | 28 |
| II.11.1. Anatomía de los manipuladores..... | 28 |
| II.11.2. Sensores de posición..... | 32 |
| II.11.3. Actuadores de manipuladores..... | 34 |
| II.11.4. Inteligencia de robots..... | 35 |
| II.12. Estado del arte de los manipuladores..... | 36 |
| III. DISEÑO DEL VEHÍCULO DE GUÍA AUTOMÁTICA..... | 37 |
| III.1. Análisis de necesidades..... | 37 |
| III.2. Modelado matemático..... | 38 |
| III.3. Diseño del sistema mecánico..... | 39 |
| III.4. Diseño del sistema electrónico..... | 42 |
| III.4.1. Diseño del sistema de navegación..... | 44 |
| III.4.2. Etapa de potencia del vehículo..... | 53 |
| III.4.3. Diseño del sistema de alimentación autónoma..... | 55 |
| III.4.4. Interfaz con la computadora..... | 57 |
| III.5. Diseño del sistema de cómputo..... | 60 |
| III.5.1. Algoritmo del sistema de control del VGA..... | 60 |
| IV. DISEÑO DEL MANIPULADOR..... | 63 |
| IV.1. Análisis de necesidades..... | 63 |
| IV.2. Modelado matemático..... | 64 |
| IV.2.1. Cinemática directa..... | 65 |

| | |
|---|------------|
| IV.2.2. Cinemática inversa..... | 70 |
| <u>IV.3. Diseño del sistema mecánico.....</u> | <u>76</u> |
| <u>IV.4. Diseño del sistema electrónico.....</u> | <u>79</u> |
| IV.4.1. Lógica de los motores..... | 82 |
| IV.4.2 Potencia de los motores..... | 87 |
| IV.4.3. Adquisición de datos..... | 89 |
| IV.4.4. Sensores de posición..... | 92 |
| IV.4.5. Interfaz con la computadora..... | 92 |
| <u>IV.5. Diseño de sistema de cómputo.....</u> | <u>94</u> |
| IV.5.1. Algoritmo del programa de control del manipulador..... | 94 |
| IV.5.2. Lectura de posición..... | 95 |
| IV.5.3. Movimiento de los motores..... | 96 |
| IV.5.4. Movimiento sobre una recta..... | 98 |
| V. IMPLEMENTACIÓN..... | 100 |
| <u>V.1. Integración de los elementos estructurales, de actuación</u> <u>y transmisión mecánicos.....</u> | <u>101</u> |
| <u>V.2. Implementación e integración del sistema de navegación.....</u> | <u>102</u> |
| <u>V.3. Implementación e integración del sistema de transferencia</u> <u>de piezas.....</u> | <u>103</u> |
| <u>V.4. Integración total del vehículo de navegación autónoma.....</u> | <u>104</u> |
| VI. PRUEBAS DE CAMPO..... | 106 |
| <u>VI.1. Detección y corrección de fallas.....</u> | <u>107</u> |
| <u>VI.2. Optimización.....</u> | <u>109</u> |
| VII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES..... | 110 |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA..... | 113 |

| | |
|--|-----|
| APÉNDICE A: DATOS TÉCNICOS..... | 115 |
| <u>A.1. Vehículo</u> | 115 |
| <u>A.2. Sistema manipulador de carga</u> | 116 |
| <u>A.3. Energía</u> | 117 |
| | |
| APÉNDICE B: CIRCUITOS IMPRESOS..... | 118 |
| <u>B.1. Control del vehículo</u> | 118 |
| <u>B.2. Control del manipulador</u> | 121 |
| | |
| APÉNDICE C: PROGRAMAS EN LENGUAJE C..... | 127 |
| <u>C.1. Vehículo</u> | 127 |
| <u>C.2. Sistema manipulador de carga</u> | 130 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 2.1 Triangulación geométrica..... | 18 |
| 2.2 Unidad de transporte móvil 4020 de la corporación FMS..... | 23 |
| 2.3 Robot de coordenadas cartesianas..... | 29 |
| 2.4 Robot de coordenadas cilíndricas..... | 30 |
| 2.5 Robot de coordenadas esféricas..... | 31 |
| 2.6 Robot de coordenadas articuladas..... | 32 |
| | |
| 3.1 Vista superior de la base del vehículo (a escala)..... | 39 |
| 3.2 Mecanismo diferencial en las ruedas traseras del vehículo..... | 40 |
| 3.3 Vistas frontal y lateral del mecanismo de impulso del vehículo..... | 41 |
| 3.4 Motor de dirección del VGA..... | 42 |
| 3.5 Diagrama de bloques del Sistema Electrónico del VGA..... | 43 |
| 3.6 Distribución física de los sensores y fuente emisora de luz..... | 45 |
| 3.7 Sensor de guía..... | 48 |
| 3.8 Diagrama del habilitador del motor de dirección..... | 50 |
| 3.9 Diagrama electrónico de la lógica del VGA..... | 52 |
| 3.10 Etapa de potencia del motor de arranque o impulso..... | 54 |
| 3.11 Etapa de potencia del motor de dirección..... | 55 |
| 3.12 Sistema de Alimentación Autónoma..... | 58 |
| 3.13 Técnica de modulación por ancho de pulsos..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| 4.1 Parámetros de coordenadas en notación de Denavit-Hartenberg para el modelado matemático del manipulador..... | 66 |
| 4.2 Posición del punto extremo del brazo (O) en función del ángulo que presenta la articulación de la base (θ_1)..... | 71 |
| 4.3 Posición del extremo del brazo en relación al ángulo (O) que presenta la articulación del hombro (θ_2)..... | 72 |
| 4.4 Relación entre la posición del extremo del brazo (O) y el ángulo que presenta la articulación del codo (θ_3)..... | 75 |
| 4.5 Estructura del manipulador..... | 77 |
| 4.6 Diagrama de bloques del sistema electrónico del manipulador..... | 81 |
| 4.7 Diagrama electrónico para el motor de pasos..... | 86 |
| 4.8 Diagrama de conexiones para la etapa de potencia de los motores de DC del manipulador..... | 87 |
| 4.9 Diagrama de conexiones para la etapa de potencia del motor de pasos del manipulador..... | 88 |
| 4.10 Diagrama electrónico de adquisición de los datos..... | 91 |
| | |
| B.1. Máscaras de componentes y de soldadura del impreso del VGA..... | 119 |
| B.2. Caras inferior y superior del circuito impreso del VGA..... | 120 |
| B.3. Máscara de componentes del circuito impreso del manipulador..... | 122 |
| B.4. Máscara de soldadura del circuito impreso del manipulador..... | 123 |
| B.5. Máscara de la cara inferior para el impreso del manipulador..... | 124 |
| B.6. Máscara para la cara superior del impreso del manipulador..... | 125 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| 2.1 Ventajas y desventajas de sensores de posición..... | 33 |
| 3.1 Resistencia Promedio de Sensores..... | 47 |
| 3.2. Lógica del motor de dirección del VGA..... | 49 |
| 3.3 Lógica de activación del motor de arranque..... | 51 |
| 3.4 Pines utilizados del puerto paralelo..... | 59 |
| 4.1 Parámetros de coordenadas de los elementos..... | 67 |
| 4.2 Estados de los motores de corriente directa..... | 82 |
| 4.3 Secuencia para movimiento del motor de pasos..... | 83 |
| 4.4 Estado presente y siguiente del motor de pasos..... | 84 |
| 4.5 Estados siguientes de lógica para el Flip-Flop JK..... | 84 |
| 4.6 Mapas de Karnaugh para obtener función de entradas para los Flip-Flops..... | 85 |
| 4.7 Bits que recibe el sistema electrónico del manipulador..... | 93 |
| 4.8 Bits que entrega el sistema electrónico del manipulador a la PC..... | 93 |
| 4.9 Relación existente entre el número de motor y la parte de palabra que los representa..... | 96 |
| 4.10 Descripción de la palabra de salida de la PC para el control del manipulador..... | 96 |
| 4.11 Máscaras de bits empleadas en el sistema de cómputo..... | 97 |

OBJETIVO

Desarrollar un vehículo autónomo desde el punto de vista energético, con capacidad de navegación propia, que pueda ser empleado para la transferencia de partes y piezas de una estación de proceso a otra dentro de un ambiente industrial, auxiliándose de un sistema manipulador, con la finalidad de hacer más flexible el proceso de producción.

LISTA DE SÍMBOLOS

Funciones trigonométricas

$c\varphi$ $\cos \varphi$, o coseno del ángulo φ .

$s\varphi$ $\sin \varphi$, o seno del ángulo φ .

Variables articulares

θ_i ángulo medido entre la a_{i-1} y a_i alrededor del eje i .

α_{i-1} ángulo entre el eje $i-1(+)$ y el eje $i(+)$, alrededor de $a_{i-1}(+)$ siguiendo la regla de la mano derecha.

a_{i-1} distancia más corta entre el eje $i-1$ y el eje i .

d_i distancia medida sobre el eje i desde el punto en que a_{i-1} corta el eje i , hasta donde a_i corta al eje i .

Longitudes

l_i longitud del eslabón i .

Matrices

${}^A_B R$ matriz de rotación del sistema de coordenadas B con respecto al sistema de coordenadas A.

${}^A_B T$ matriz que permite hacer una transformación del sistema de coordenadas B al sistema de coordenadas A.

Vectores

${}^A P$ vector de posición de un punto cualquiera con respecto al sistema coordenado A.

${}^A P_{ORG(B)}$ vector de posición del origen del sistema de coordenadas B visto desde el sistema de coordenadas A.

Puntos

- O* posición del extremo del brazo vista desde el sistema de coordenadas 0 (u origen).
- H* posición del sistema de coordenadas 1, vista desde el sistema de coordenadas 0

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería en Computación tiene un desarrollo reciente en nuestro país, y aunque aún no llega a tener el nivel de desarrollo de otras naciones más desarrolladas, poco a poco se va acercando en diversos aspectos tales como la investigación y el desarrollo de prototipos.

La robótica es un área en la que se necesita de la aplicación de conocimientos de varias ramas de la Ingeniería, a saber, la mecánica, la electrónica y la computación, al menos. Cada una de esas ramas aporta sus conocimientos para llevar a buen término un proyecto de robótica. El trabajo de Ingeniería Mecánica es necesario para realizar el diseño de los mecanismos que formarán físicamente al robot, en tanto que el trabajo de Ingeniería Electrónica es necesario para diseñar los circuitos que sean capaces de controlar al robot en sus acciones, y el trabajo de Ingeniería en Computación tiene como fin hacer que el robot pueda ser fácilmente reprogramado y que desarrolle tareas con flexibilidad y con cierto nivel de "Inteligencia".

La motivación fundamental que nos llevó a realizar este trabajo fue la posibilidad de aplicar muchos de los conocimientos adquiridos durante nuestros estudios en forma teórica y práctica. Al final veremos que nuestras

expectativas se cumplieron, pero también se verá como encontramos que la tarea de construir un dispositivo robótico parece una tarea sin fin, pues conforme se avanza en el desarrollo del mismo surgen nuevas ideas y necesidades que sólo podrían verse coronadas después de un trabajo de un alcance mucho mayor que el que tiene éste.

Nuestro trabajo se desarrolló en varias etapas, que se reflejan en el orden en que se presentan los capítulos subsecuentes. En el capítulo I se establecen la justificación del presente trabajo, la definición del problema y la metodología empleada para la solución. En el capítulo II se presenta una investigación documental que pretende hacer una descripción general de los sistemas de manufactura flexible, vehículos de guía automática y brazos manipuladores. Para fines prácticos se dividió nuestro vehículo en dos subsistemas: el vehículo y el manipulador. Hemos decidido poner en capítulos separados el diseño de cada uno de estos subsistemas por dos razones: para que haya más claridad en la exposición y evitar tener un solo capítulo muy extenso. En el capítulo III se describe el diseño del vehículo y sus componentes. En el capítulo IV se describe el diseño del manipulador y su mecanismo de control. En el capítulo V se verá como se realizó la integración de todos los sistemas. El capítulo VI muestra las pruebas realizadas para verificar el buen funcionamiento del sistema completo y finalmente, en el capítulo VII se muestran los resultados obtenidos y nuestras conclusiones.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una máquina puede hacer el trabajo
de mil hombres, pero ninguna
máquina puede hacer el trabajo
de un hombre extraordinario.

Elbert Hubbard¹

I.1. Justificación

La necesidad de aumentar la productividad y conseguir productos acabados de calidad uniforme es cada vez más grande y hace que la industria se incline hacia la automatización de sus plantas de producción. La mayoría de las tareas de fabricación automatizadas se hacen mediante máquinas diseñadas para realizar una función especial y predeterminada.

¹ Citado en Fu, K. S., et. al. *Robótica, Control, detección, visión e inteligencia*. Primera edición, Madrid 1988. McGraw - Hill, Inc. Página 1.

Esta metodología requiere de un gran esfuerzo de rediseño y altas inversiones cuando se necesita realizar nuevas tareas, y la maquinaria se vuelve obsoleta en un tiempo muy corto.

La inflexibilidad y el alto costo de estas máquinas, han dado pauta al diseño de *sistemas de manufactura flexible* a un menor costo de producción y con mayor capacidad de adaptación al espacio de trabajo y a procesos de producción que requieren cambios constantes.

1.2. Definición del problema

El objetivo del presente trabajo, es realizar el diseño, construir y controlar un vehículo de navegación autónoma para transferencia de piezas, es decir, un sistema de manufactura flexible que estará formado por un vehículo de guía automática (VGA) para transporte de material, que se compondrá de un coche con un brazo manipulador controlados por una computadora para seguir una guía que le muestra estaciones de trabajo y el camino para llegar a ellas y para llevar a cabo tareas de carga y descarga de pequeñas piezas.

La computadora coordinará la operación de todo el sistema. El vehículo transportará al manipulador desplazándose sobre una guía que se encuentra en el piso e informando a la computadora su posición dentro de esta guía. El manipulador se encargará de la carga y transferencia de las piezas de una estación a otra. Como el vehículo será autónomo, contará con un sistema de alimentación de baterías recargables. Los VGA son sistemas

bastante adaptables a las situaciones cambiantes de la producción actual y pueden circular flexiblemente de una estación o célula de manufactura a otra, si así se requiere.

La idea que dio origen al presente trabajo se generó en el curso de Robótica en la Facultad de Ingeniería en donde se planteó en un principio la construcción de un brazo manipulador de seis grados de libertad, esta idea evolucionó y se convirtió en el VGA gracias a que en el Instituto Tecnológico de Morelia surgió la necesidad de realizar un robot para su participación en el Concurso Nacional de Creatividad organizado por el Sistema de Institutos Tecnológicos. El objetivo que tenían en el citado Instituto era diseñar un robot de tres grados de libertad y un vehículo que pudiera interactuar con el robot para que en conjunto pudieran participar en el transporte de piezas dentro de un ambiente industrial, a nosotros se nos entregó el vehículo y el manipulador y nuestra tarea fue implantar el control de ambos sistemas para que pudieran convertirse en un Vehículo de Guía Automática. En resumen, nuestra tarea era realizar el diseño y la construcción del sistema electrónico, del sistema de cómputo para el control, y el ensamble del brazo y el vehículo que nos fueron entregados.

Este trabajo pretende mostrar como es posible realizar dispositivos que coadyuven al proceso de producción en forma eficaz y con tecnología de punta en nuestro país, y aunque no es una investigación que pretenda generar nuevo conocimiento ya que está sustentada en trabajos previos, los mecanismos de control empleados son en su mayoría producto de ideas originales nuestras. Cabe mencionar que nuestra intención no fue presentar el vehículo de navegación autónoma más eficiente ni el más barato, ni siquiera uno completamente terminado, sino un vehículo que sea capaz de realizar tareas propias de los VGA's. Es de reconocer que nuestro sistema admite muchas mejoras así como la ampliación de sus capacidades, pero

ésto escapa a nuestro objetivo inicial de construir un VGA mínimo con algunas peculiaridades como el brazo mecánico que tiene montado, ya que la mayoría de los vehículos de guía automática existentes son simplemente vehículos alimentados por un brazo mecánico externo.

1.3. Metodología de trabajo

Existen muchas metodologías de trabajo que se pueden seguir para lograr que una idea como la planteada en este trabajo se pueda realizar, aunque todas se engloban en los siguientes pasos generales:

- Planteamiento del problema.
- Análisis del problema.
- Diseño de la solución.
- Implantación.
- Pruebas.
- Verificación y corrección de errores en cada uno de los pasos anteriores.

Es importante decir que este trabajo se enfoca exclusivamente a la realización de una idea por lo que se decidió adoptar esta metodología adaptándola al caso del vehículo de navegación autónoma. Como se podrá observar se ataca el problema del manipulador de carga en forma independiente al vehículo, esto se hace para tener dispositivos independientes que puedan funcionar en forma aislada. Considerando lo anterior se plantearon los siguientes pasos:

- Investigación bibliográfica acerca de los principios teóricos y de operación vehículos de guía automática y manipuladores.
- Modelado del vehículo.
- Diseño del sistema electrónico para el vehículo.
- Diseño del programa de computadora para control del vehículo.
- Modelado del manipulador.
- Diseño del sistema electrónico para el manipulador.
- Diseño del programa de control del manipulador.
- Construcción e integración de los sistemas.
- Verificación.
- Prueba final.

Se puede observar que factores tales como el impacto social o estudios de viabilidad de nuestro proyecto no son considerados en este trabajo, debido a que por el momento nuestro fundamental interés fue la realización física de un vehículo de navegación autónoma para transferencia de piezas.

II. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

Realizar un Vehículo de Guía Automática es, como toda creación humana, el resultado de todo un proceso en el que participan, además de la imaginación de las personas involucradas, los conocimientos acumulados a lo largo de la historia de la humanidad. Ciertamente, la tecnología para poder automatizar procesos es muy reciente, pero en su corta vida ha generado un cúmulo impresionante de conocimientos y también se ha aprovechado de algunos otros que ya existían.

Este capítulo no pretende ser el compendio del desarrollo de la automatización, tan solo es una investigación en la que se tratan de manera general los mecanismos que se utilizan para desarrollar Vehículos de Guía Automática y Brazos Manipuladores. Su propósito es ofrecer una idea general de desarrollos previos para así poder ubicar nuestro proyecto dentro del contexto global que forman las investigaciones realizadas en el área de la Automatización.

II.1. Estado del arte de los sistemas de manufactura flexible

Debido a los cambios continuos que actualmente se suscitan en la industria, es indispensable contar con sistemas flexibles de producción, es decir, sistemas que sean versátiles para poder producir una gran variedad de partes y que sean adaptables, de manera que al necesitarse una línea de producción completamente distinta se puedan hacer las modificaciones con relativa facilidad.

Decir qué es un Sistema de Manufactura Flexible (SMF) no es una tarea sencilla, pues existen una gran cantidad de definiciones. Pero en general se puede decir que se trata de una máquina o grupo de máquinas utilizadas para manejar y fabricar lotes de piezas mediante un control computarizado, de tal forma que pueda ser continuamente reprogramado para poder elaborar una gran variedad de productos, sin necesidad de realizar cambios substanciales en las líneas de producción.

La tecnología de SMF ha tenido un amplio desarrollo a partir de los años 70s debido al surgimiento de nuevos y cada vez más rápidos equipos de cómputo que permiten resolver las ecuaciones matemáticas involucradas a grandes velocidades.

Actualmente los principales usuarios de Sistemas de Manufactura Flexible son las Industrias automotrices y en la industria de máquinas y herramientas. En 1985 existían aproximadamente 200 empresas con SMF en todo el Mundo. En 1990 esta cifra se había incrementado a poco más de 250 instalaciones en todo el mundo de las cuales aproximadamente la mitad se

encuentran en Europa, y la parte restante se encuentra repartida entre los Estados Unidos y Japón¹. En Latinoamérica no hay datos exactos pues la entrada de esta tecnología ha sido históricamente mucho más lenta que en el mundo desarrollado debido principalmente a restricciones económicas. Aunque estas cifras muestran un desarrollo mas bien lento, se puede decir que en un futuro los números crecerán en forma exponencial, gracias a los avances que tengan las investigaciones que se realizan en todo el mundo.

Los sistemas de manufactura flexible, fueron concebidos principalmente para lograr los siguientes objetivos:

- Producción simultánea de varias piezas.
- Elaborar nuevos productos con el mismo equipo.
- Fabricar pequeños lotes con requerimientos distintos.
- Rápido y fácil cambio de herramientas.
- Nuevos métodos de producción implantados fácilmente sin necesidad de nuevas inversiones.

En tiempos recientes estos sistemas están cobrando más vigencia que nunca. Existen fábricas en donde los brazos mecánicos son los que controlan prácticamente toda la producción. Por ejemplo, en marzo de 1996 el canal 22 de la televisión mexicana transmitió un programa producido por EDUSAT en el cual se presentaron algunos avances en metodologías de producción de algunas fábricas alemanas, en las cuales se han implantado sistemas de manufactura tan automatizados que solamente es necesario que unas cuantas personas trabajen en la planeación de la producción y en las compras de los insumos necesarios, y que otras cuantas vigilen que los robots y el equipo de automatización funcionen adecuadamente. En estas

¹ Goetsch, David L. *Advanced manufacturing Technology*. Delmar Publishers Inc. E.U. 1990, p 266

fábricas la producción es realizada en su totalidad por un SMF en el que participan tanto robots como VGA's y otras máquinas de operación autónoma. Además se plantea que en un futuro las personas podrán trabajar desde su casa y mediante una computadora llevar el control de la producción, la toma de decisiones también se podría realizar en conjunto con otras personas que también estarían en su casa. Todo esto gracias a la automatización y las grandes redes de computadoras.

II.2. Antecedentes de vehículos de guía automática (VGA's)

Un Vehículo de Guía Automática (VGA), es un coche que se encarga de transportar objetos, tales como herramientas, productos y materiales, dentro de un área de trabajo para coadyuvar en el proceso de producción dentro de un establecimiento, como una fábrica. Una definición más formal nos la da N. S. Rajaram², que dice que los VGA son vehículos "guiados por un mecanismo de control que consiste en alguna forma de ruta o guía pegado al piso, por radio, control remoto o por una combinación de éstos y otros mecanismos de señalización". Esta definición cubre casi todas las características de un VGA, aunque otros autores hablan de un sistema en el cual participan, no uno sino varios vehículos coordinados para lograr su propósito, este tipo de sistemas se usa cuando las operaciones de transporte involucran muchos tipos de objetos, en varias áreas de trabajo y con requerimientos de transporte diversos.

² Rajaram, N. S. "Automated Guided Vehicle System" en *Concise International Encyclopaedia of Robotics: Applications and Automation*, Dorf, Richard C. Segunda edición. E. U., 1990. p. 98. John Wiley & Sons, Inc.

La historia de los VGA se ha desarrollado en dos vertientes que gracias al desarrollo de la computación ahora tienden a convertirse en una sola. Por un lado está la historia de los Vehículos de Guía Automática y por el otro la de los Robots Móviles. Aunque nuestra investigación se centra en los VGA, dedicaremos algunas líneas a los Robots Móviles porque como se acaba de mencionar, la línea divisoria entre estas dos tecnologías es cada vez más delgada. Vale la pena mencionar que el verdadero ancestro de los VGA es un vehículo controlado por computadora desarrollado por la Universidad de Stanford para la NASA, con el objeto de investigar el funcionamiento de los vehículos que serían controlados remotamente para explorar la superficie de la luna. Un VGA es en esencia un artefacto controlado en forma remota que sirve para transportar elementos, y que para funcionar hacen uso de motores eléctricos cuya energía es proporcionada por un banco de baterías recargables, en tanto que un Robot Móvil es un artefacto que puede desplazarse dentro de un área y que funciona por largos períodos de tiempo sin intervención humana. Como se ve, aunque en su origen son cosas diferentes, no hay ningún impedimento para desarrollar un solo artefacto que, controlado en forma remota, transporte elementos utilizando motores eléctricos, que se alimente con baterías recargables y que funcione por largos períodos de tiempo sin intervención humana. Como se verá en los capítulos subsecuentes, el vehículo de guía automática que se desarrolló pretende cubrir esta última definición, agregándole un brazo manipulador para la carga y descarga de piezas..

II.3. Objetivos de los VGA's

Un VGA, como ya se dijo, es un coche que trabaja en un área transportando objetos. Algunas investigaciones nos dicen que hay lugares en los cuales la gente se dedica a transportar objetos de diversas clases durante gran parte del día. Sustituir a estas personas por una máquina es factible, permitiendo que la gente se vuelva más productiva y dedique su tiempo a tareas más creativas.

Podríamos decir que los Vehículos de Guía Automática tienen como propósito manipular materiales en forma flexible, para disminuir los costos y aumentar la seguridad del ser humano al reducir el grado de participación de éste en dicha manipulación.

Las principales ventajas de contar con un sistema de VGA's son:

- Variedad de productos a tratar.
- Rápida instalación.
- Fácil modificación de rutas y tareas.
- Reducción del 30 al 40% en los costos de transporte de material.
- Causan un mínimo de daños al ambiente

La principal desventaja es el alto costo de la inversión inicial, aunque conforme aumenta el desarrollo tecnológico se ve que tiende a disminuir. Y cuando se presenta la necesidad de readaptar al sistema, el costo se vuelve muy pequeño.

II.4. Aplicaciones de los VGA's

Las principales aplicaciones de los VGA se encuentran en tareas de manipulación de materiales, piezas de trabajo o cualquier producto o pieza de fabricación en lugares como fábricas, almacenes, en programas espaciales para carga, descarga y transporte de materiales sin un operador humano en el vehículo, y se pudieran aplicar como apoyo a discapacitados. En las fábricas se pueden dedicar a alimentar de material y herramientas a las líneas de producción, a retirar las piezas defectuosas y llevarlas a un depósito. En un almacén se pueden emplear en la descarga de materiales recién llegados y a su distribución al lugar que le corresponda. Incluso se pueden fabricar VGA's de un tamaño adecuado a la necesidad de capacidades de carga de acuerdo al lugar en el que se encuentren. También se pueden emplear en oficinas como "mensajeros", para llevar correspondencia u otros objetos. En centros comerciales se pueden emplear para acomodar mercancía. Y podríamos plantear tantas aplicaciones que se podrían pensar como propias de la ciencia ficción, claro que todo lo que se acaba de describir se podrá realizar sólo en la medida en que el vehículo sea más o menos inteligente, es decir en la capacidad que tenga de percibir las características y condiciones del medio ambiente que le rodea y de interactuar con él.

II.5. Sistemas constitutivos de los VGA's

Los componentes principales de los vehículos de guía automática, son los siguientes:

- El vehículo.
- La instalación en el suelo o mecanismo de guía. Este mecanismo puede ser una pista de material magnético o de un color determinado.
- Reconocimiento de la pista. Puede ser un mecanismo de reconocimiento inductivo, por radio control o reconocimiento óptico. El inductivo es caro y de difícil instalación, por radio no se necesita pista, pero el mecanismo de reconocimiento es un tanto complejo y también es caro, en tanto que el reconocimiento óptico es el más económico y fácil de elaborar.
- El controlador o sistema de información. Este sistema se encarga de controlar al VGA y al sistema de manipulación de carga. Procesa las señales entregadas por los sensores y genera las salidas adecuadas. Normalmente se trata de un microcontrolador o de una computadora que tenga los elementos necesarios para el procesamiento de las señales.
- Sistema de corrección de trayectoria. Es un mecanismo cuya misión es asegurarse de que el vehículo siga la trayectoria preestablecida, en muchas ocasiones se trata de un motor controlador de dirección. Este motor puede ser de pasos o de corriente directa.
- Sistema de alimentación autónoma. Está compuesto por baterías recargables de níquel-cadmio o de plomo-ácido que deberán tener capacidad suficiente para que el vehículo sea autónomo por un período razonable de tiempo mismo que está condicionado por la aplicación a la que se destine el VGA.

- **Sistema de manipulación de carga.** Su objetivo es cargar y descargar al vehículo, puede tratarse de simples barras para montar y desmontar, o un brazo mecánico, dependiendo de la precisión que se requiera para esta tarea. El brazo puede estar montado en el vehículo, como es el caso del presente trabajo, o puede estar instalado en las estaciones de transferencia.
- **Sistema detector de estaciones.** Para hacer una transferencia "inteligente" de piezas, es necesario que el vehículo sepa en qué estación se encuentra, ésto se puede lograr con sensores externos que indiquen mediante un código, la estación.
- **Monitoreo de energía.** Se necesita de un sistema que permita saber en todo momento el estado de cada una de las baterías, para saber si es necesario recargarlas o no.

Todos estos sistemas pueden variar dependiendo del VGA del cual se trate, por ejemplo para nuestro trabajo, la guía será una línea negra con fondo blanco, y el control lo ejercerá un programa de computadora que va a interactuar con una interfaz electrónica que más adelante se describirá.

II.6. Sistemas de navegación

El sistema de navegación sirve al VGA para poder conocer cual es su posición relativa al lugar en el que se encuentra en un momento determinado, con el propósito de poder realizar su misión: la de transportar un objeto (o un conjunto de objetos) de un lugar a otro dentro de ese lugar. A continuación se presentan los mecanismos de navegación más empleados.

II.6.1. Sistemas de navegación basados en láser

En este tipo de navegación se emplea una técnica denominada de triangulación. La técnica que se describe a continuación fue propuesta por Nimrod³ y algunos de sus colaboradores. Como se observa en la figura 2.1b, un espejo transmisor gira a una velocidad angular w haciendo un barrido con un rayo láser en un plano a una velocidad $2w$. La distancia entre el eje del espejo y el fotodetector es la línea B . Un lente para enfocar la luz gira a alrededor del fotodetector a una velocidad $-2w$ y está sincronizado con el espejo de manera que el ángulo α entre la línea base B y el haz reflejado por el espejo sea siempre igual al ángulo entre la línea base y el eje óptico del lente. Cuando un objetivo se coloca en algún lugar sobre el eje de medición, se generan dos señales con el fotodetector para cada rotación del espejo. La primera ocurre cuando $\alpha=0$ y la segunda cuando el haz reflejado por el espejo ilumina el objetivo en su intersección con el eje de medición, entonces la distancia será

$$D = 0.5B \tan \alpha,$$

y el ángulo se obtiene mediante

$$\alpha = 4Tr/Te$$

en donde Tr es el tiempo de retardo entre la primera y la segunda señal y Te es el tiempo necesario para el ciclo de barrido del espejo.

³ Mc. Cloy, D., Harris, D. M. J. *Robótica: una introducción*. EUA. Limusa. p. 262.

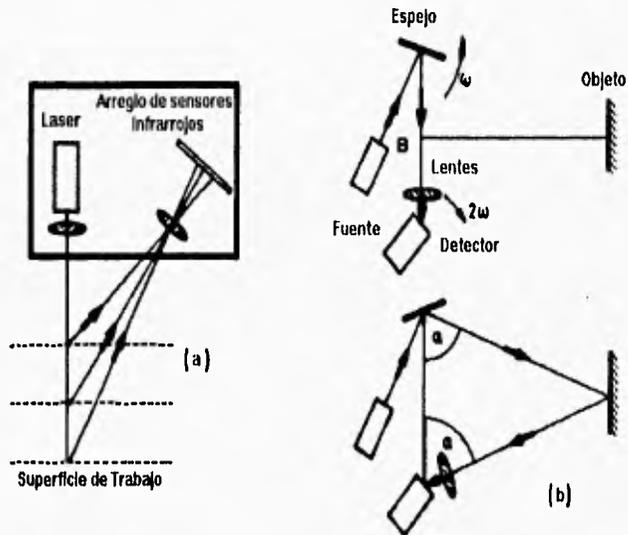


Figura 2.1. Triangulación geométrica: a) la posición del rayo reflejado en los sensores proporciona la medida de la distancia. b) Técnica de Nimrod.⁴

La técnica de triangulación no es exclusiva del láser, también puede ser aplicada utilizando cámaras de video colocadas a ángulos conocidos y teniendo un punto de referencia que puede ser una luz intermitente, este proceso suele ser complejo pues es difícil superponer las imágenes.

Existen otras técnicas entre algunas de ellas está la medición de distancia a partir de medir el tiempo que tarda un pulso del láser en regresar coaxialmente desde una superficie reflectora. Otra técnica es la creada por el National Bureau of Standards⁵ (NBS) de Estados Unidos, que utiliza el

⁴ Mc. Cloy D., op. cit, p. 261.

⁵ Ranky Paul G. "Accuracy" en *Concise International Encyclopedia of Robotics: Applications and Automation*. Dorf, Richard C. Segunda edición. E. U. , 1990. p.10. John Wiley & Sons, Inc.

concepto de una longitud y dos ángulos para determinar la posición tridimensional, este sistema tiene como principal objetivo medir la ejecución en el movimiento de los manipuladores.

Entre las ventajas que se distinguen por el uso del rayo láser tenemos: su propagación a través del aire y otros gases, bajos costos de operación, inmune a campos electromagnéticos, fácil control entre otras. Las desventajas primordiales son: alta inversión, empleo de procesos que requieren de alta tecnología y seguridad cuando se maneja alta potencia en el rayo pues la radiación es extremadamente peligrosa sobre todo a los ojos.

II.6.2. Sistemas de navegación basados en ultrasonido

La guía por ultrasonido se realiza por la emisión de ráfagas de energía ultrasónica en la parte frontal del vehículo, para posteriormente medir la diferencia de tiempo entre la emisión y recepción de la señal reflejada. A esta técnica usualmente se le conoce como "tiempo de vuelo", la frecuencia de los pulsos emitidos puede ser lo suficientemente alta para tener un sentido continuo. Para tener un grado de confiabilidad mayor en la detección de obstáculos y elección de trayectorias, se emplean varios sensores ultrasónicos colocados principalmente en la parte frontal y lateral del vehículo.

Las ventajas que ofrece este tipo de sistema son, bajo costo y relativa sencillez, bajo consumo de potencia.

El sistema de navegación ultrasónico tiene desventajas, ya que depende del tamaño y forma del lugar destino, de la absorción acústica y la distancia del vehículo, estos factores pueden afectar la fuerza de la señal. Además, el ruido ambiental puede entorpecer la señal reflejada y generar información falsa.

Actualmente existen diversas universidades, corporaciones y laboratorios de gobierno en EUA que desarrollan sistemas de ultrasonido para la guía de robots móviles y VGA's.

II.6.3. Navegación por radiocontrol

A través de un sistema de radiofrecuencia se pueden enviar los comandos o instrucciones para realizar el traslado del vehículo y ejecución de ordenes. Este tipo de guía es empleada principalmente en ambientes de alto riesgo y el control se realiza principalmente por un operador humano o bien utilizando la técnica de triangulación anteriormente descrita.

El radiocontrol tiene ventajas considerables en cuanto a otorgarnos control a distancias grandes. Un claro ejemplo es el aeromodelismo. Sin embargo, el uso de este tipo de sistemas requiere de emisores y transmisores cuya construcción es cara, más voluminosa y tiene un mayor consumo de corriente. De forma similar que otros sistemas, el ruido puede causar problemas en la transmisión, sobretodo por fuentes externas de transmisión de radio como lo pueden ser los sistemas de banda civil.

II.6.4. Sistemas ópticos

Los VGA que emplean el sistema de guía óptica tienen su principal sustento en sensores que siguen una línea altamente reflectora colocada sobre el piso . Esta trayectoria puede ser directamente pintada sobre el suelo, o bien, se puede utilizar una cinta especialmente reflejante.

Los sistemas ópticos de guía tienen dos formas principales de uso, las cuales dependen del tipo de sistema mecánico de control, básicamente son el de velocidad diferencial y el de volante. Cuando el VGA cuenta con sistema de velocidad diferencial, se emplean con 2 sensores colocados en cada lado y al frente de cada arreglo de ruedas. Estos sensores detectan cuando existe un cambio en la dirección izquierda o derecha el detector de amplitud balancea entonces las señales que han sido recibidas y realiza los cambios pertinentes. Los sistemas que utilizan el control por volante disponen de una rueda que corre encima de la línea de pintura o cinta que marca la trayectoria en el piso; el detector de fase indica cuando la rueda se encuentra en una posición correcta o si existió una desviación en la trayectoria, éste dato al ser recibido por el control en el VGA mueve la rueda frontal para compensar y mantener al vehículo en fase.

El reconocimiento óptico cuenta con grandes ventajas como son la facilidad en su uso, reducido costo y no requiere de demasiadas complicaciones al intentar un cambio de trayectoria. Entre las desventajas de éste tipo de navegación es que la trayectoria debe estar libre de obstáculos ,alta probabilidad de ser obstruida por suciedad o llegar a sufrir un desgaste por el uso normal.

II.6.5. Guía de alambre subterráneo

La guía de alambre subterráneo o guía inductiva cuenta con aproximadamente 20 años de ser empleada, en este tipo de navegación el VGA sigue una trayectoria dictada por un alambre contenido en el piso donde el vehículo trabajará sin la necesidad de tener una trayectoria indicada en el lugar de trabajo. La instalación del cable se realiza a una profundidad de aproximadamente una pulgada, este arreglo, contendrá la trayectoria que guiará al vehículo a cada una de las diversas estaciones. Para reconocer la información, el VGA posee en su parte inferior sensores inductivos, por medio de éstos puede conocer la ruta y recibir las instrucciones a seguir directamente del control central, mediante el uso de sistemas de modulación, el control central puede enviar instrucciones a distintos vehículos. Una clara desventaja que tiene este tipo de navegación es la dificultad y costos para conseguir una modificación en la trayectoria.

II.7. Estado del arte de los VGA's

Los VGA's han estado en uso por mas de 30 años, aunque a partir de la rápida miniaturización de componentes electrónicos, ha crecido la investigación en esta área y la implementación, un ejemplo concreto de aplicación en la actualidad es el modelo 4020 del Sistema de Manejo Automático de Material y Transporte desarrollado por la Corporación FMS que forma parte de su sistema de manufactura Integrada por computadora para realizar operaciones en un cuarto limpio donde se fabrican

componentes electrónicos, en la figura 2.2 se muestra este modelo (que como se verá en capítulos posteriores es similar al VGA que se presenta en este trabajo). Se trata de un híbrido entre robot y coche bajo el control de una computadora central cuya función primordial es distribuir material desde las estaciones de trabajo a las estaciones de inventario del cuarto limpio y viceversa, con la finalidad de minimizar los desplazamientos de personal dentro del cuarto. Este sistema también cuenta con programas para monitorear el flujo de material y poder llevar un inventario.

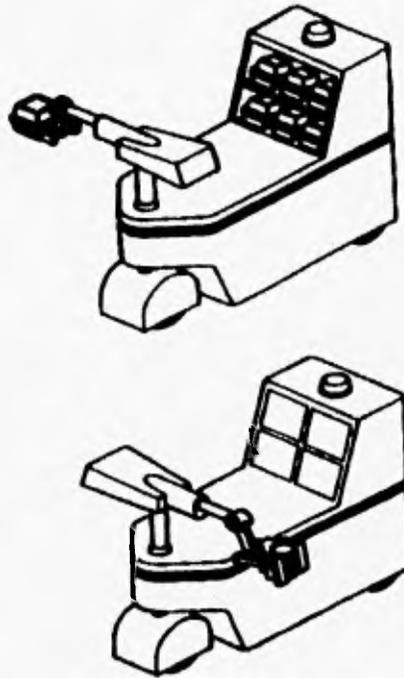


Figura 2.2. Unidad de transporte móvil 4020 de la corporación FMS.⁶

⁶ mostrada por N.S. Rajaram, op. cit, p. 101

En la actualidad se trabaja en la mejoría de los VGA's en los siguientes aspectos:

- Reducción en las tarjetas controladoras dentro de los vehículos.
- Sistemas de comunicación en tiempo real.
- Gulas sin necesidad de cableado o de instalación compleja
- Aplicación de sistemas redundantes para soportar fallas en los sistemas, y tareas a varios niveles.
- Capacidad de mapear el área de trabajo y de optimización automática de rutas.
- Incremento en el uso de microprocesadores y dispositivos lógicos programables para el control de los vehículos y de los manipuladores, cuando los tengan.
- Optimización y jerarquización de tareas.
- Implantación de mecanismos de monitoreo de sistemas completos de VGA's y de componentes individuales.
- Utilización de simuladores de tráfico y de tareas antes de implantar los sistemas.

II.8. Antecedentes de los manipuladores

Los primeros trabajos que condujeron a los robots industriales actuales, se llevaron a cabo después de la segunda guerra mundial. Durante los años finales de la década de los cuarenta, se comenzó con programas de investigación en Oak Ridge y Argonne National Laboratories para el desarrollo de manipuladores mecánicos controlados remotamente para

manejar materiales radioactivos, estos sistemas eran de tipo maestro-esclavo, diseñados para tratar de reproducir los movimientos de la mano y brazos realizados por un ser humano.

El manipulador maestro era guiado por un usuario a través de una secuencia de movimientos, mientras que el manipulador esclavo reproducía a la unidad maestra tan fielmente como le era posible, posteriormente se le añadió la realimentación de la fuerza, de tal forma que el operador podía sentir las fuerzas que se desarrollaban entre el manipulador esclavo y su entorno.

A mediados de los años cincuenta, el acoplamiento mecánico se sustituyó por sistemas eléctricos e hidráulicos en manipuladores tales como el Handyman de General Electric y el Minotaur I, construido por General Mills. En la misma década, George C. Devol desarrolló un dispositivo que él llamó "dispositivo de transferencia programada articulada", un manipulador cuya operación podía ser programada y por lo tanto, cambiada, además podía seguir una secuencia de movimientos determinados por las instrucciones en el programa. Posteriores desarrollos de este concepto, llevaron a Devol y Joseph F. Engelberger a crear el primer robot industrial, la clave de este dispositivo era el uso de una computadora en conjunción con un manipulador para producir una máquina que podía ser "enseñada" para realizar una variedad de tareas de forma automática. Estos robots podían ser reprogramados y cambiar de herramienta a un costo relativamente bajo.

Al principio de la década de los sesenta, se hizo patente que la flexibilidad de estas máquinas se podía mejorar significativamente mediante la implementación de una realimentación sensorial. H. A. Ernest (1962), publicó el desarrollo de una mano mecánica controlada por computadora con sensores táctiles, este dispositivo llamado MH-1, podía "sentir" bloques

y usar ésta información para controlar la mano de manera que apilaba los bloques sin la ayuda de un operador que le alimentara información.

II.9. Objetivos de los manipuladores

Un robot es una máquina programable de uso general que tiene algunas características antropomórficas. Actualmente, la característica humanoide más típica de los robots es la de un brazo móvil. El robot puede desplazar sus componentes a través de una secuencia de movimientos previamente programados con el fin de realizar alguna tarea de utilidad, esta secuencia se repetirá hasta que se re programe para ejecutar otra tarea, generalmente los programas que hacen posible el movimiento están contenidos en una computadora y se cargan en cada robot.

El concepto popular de un robot es que actúa y se parece a un ser humano, este concepto ha sido estimulado por varias novelas y películas de ciencia ficción, la verdad es que los robots no tienen apariencia humana y no se comportan como los seres humanos, más bien se trata de máquinas con un brazo que casi siempre operan desde una posición fija, con grados limitados de movilidad, con capacidades sensitivas y destreza manual.

La definición "oficial" de un robot industrial propuesta por la Robotics Industries Association (RIA) es la siguiente:

Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para desplazar materiales, piezas, herramientas o dispositivos

especiales mediante movimientos variables programados para la ejecución de una diversidad de tareas⁷.

II.10. Aplicaciones de los manipuladores

El hecho de que un robot tenga entre sus características, una gran flexibilidad de programación permite que los robots se utilicen para una diversidad de operaciones industriales, de aquí el nombre de manufactura flexible. Las operaciones que pueden ser ejecutadas por un robot se pueden agrupar en:

- Manipulación de materiales, incluyendo la carga y descarga de materiales, como la alimentación de máquinas de control numérico.
- Aplicaciones de procesos, como la soldadura, la pintura y en general cualquier tarea en la que se le monte al robot una herramienta para realizar algún proceso sobre materiales.
- Montajes, como el ensamble de partes automotrices.
- Inspección, aunque ésta no es aún el área más desarrollada, un robot se puede utilizar para medir si las piezas producto de algún proceso cumplen con características como dimensiones, peso, etc. y seleccionar sólo aquellas que se encuentren dentro de las especificaciones.

⁷ Groover, Mikell P. et al. *Robótica Industrial, Tecnología, programación y aplicaciones*. Primera edición, España 1989. McGraw-Hill, Inc. p. 6.

II.11. Sistemas constitutivos de los manipuladores

II.11.1. Anatomía de los manipuladores

La anatomía del robot se refiere a la forma física de todas las partes que lo componen, tales como el hombro, codo y muñeca de la máquina. El hombro está unido a la base y el resto de los componentes del brazo están unidos al hombro; al final del brazo está la muñeca, ésta parte puede estar constituida por varios componentes que le permitirán orientarse; unida a la muñeca del robot va una mano o efector final que es la herramienta que le permite tomar los objetos. Todos estos componentes en su conjunto, reciben el nombre de *manipulador*.

El manipulador está diseñado para alcanzar una pieza localizada dentro de su *volumen de trabajo*. El volumen de trabajo es el espacio dentro del cual el robot puede manipular su efector final y está determinado por las siguientes características físicas que el mismo puede tener:

- Tamaño de sus componentes.
- Configuración física.
- Limitaciones de los movimientos de sus articulaciones.

Los robots se clasifican en las siguientes cuatro categorías de acuerdo a sus movimientos básicos:

- Coordenadas cartesianas (tres ejes lineales).
- Coordenadas cilíndricas (dos ejes lineales y un eje rotacional).
- Coordenadas esféricas (un eje lineal y dos ejes rotacionales).
- Coordenadas de revolución o articuladas (tres ejes rotacionales).

La configuración de coordenadas cartesianas utiliza dos o tres dispositivos deslizantes perpendiculares para construir los ejes x, y, z. El robot operará dentro de un volumen de trabajo rectangular al desplazar los tres dispositivos deslizantes entre sí.

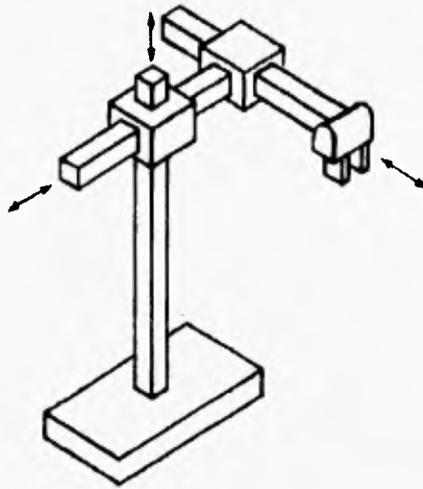


Figura 2.3. Robot de coordenadas cartesianas⁸.

⁸ tomado de Groover, Mikell P., op. cit., p.23

El robot de coordenadas cilíndricas utiliza una columna vertical y un dispositivo de deslizamiento que puede moverse hacia arriba o hacia abajo a lo largo de la columna. El brazo del robot está unido al dispositivo deslizante de modo que puede moverse en sentido radial con respecto a la columna. Haciendo girar la columna, el robot es capaz de conseguir un espacio de trabajo que se aproxima a un cilindro.

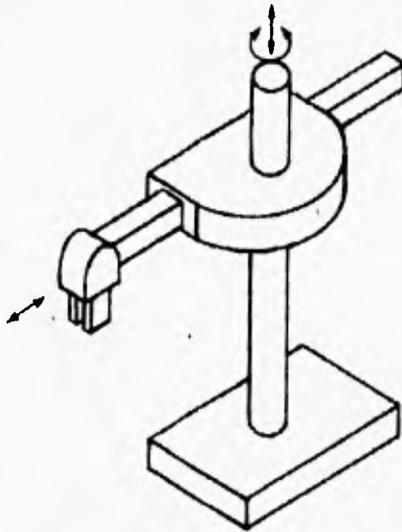


Figura 2.4. Robot de coordenadas cilíndricas⁹.

⁹ tomado de Groover, Mikell P., op. cit., p.23

La configuración polar o esférica, utiliza un brazo telescópico que puede elevarse o bajar alrededor de un pivote horizontal. El pivote está montado sobre una base giratoria. Estas diversas articulaciones le proporciona al robot la capacidad para desplazar su brazo dentro de un espacio de trabajo esférico, de aquí la denominación de "robot de coordenadas esféricas".

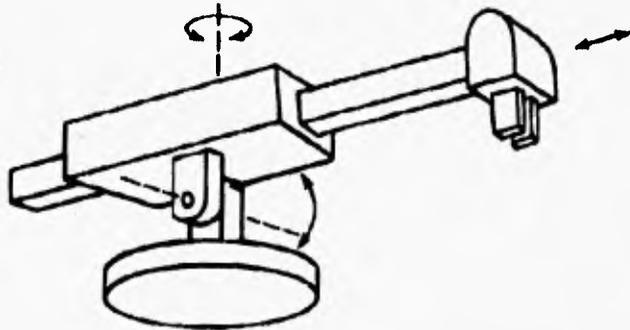


Figura 2.5. Robot de coordenadas esféricas¹⁰.

El robot de brazo articulado tiene una configuración similar a la de un brazo humano, ya que cuenta con un brazo, antebrazo, hombro, codo y muñeca conectados de tal forma que tratan de imitar los movimientos de un brazo humano. Este robot está constituido por dos componentes rectos (brazo y antebrazo), montados sobre un pedestal vertical y están conectados

¹⁰ tomado de Groover, Mikell P., op. cit., p.23

por dos articulaciones giratorias que corresponden al hombro y al codo. El tercer componente (muñeca) está unido al extremo del antebrazo, con lo que se proporcionan varias articulaciones suplementarias.

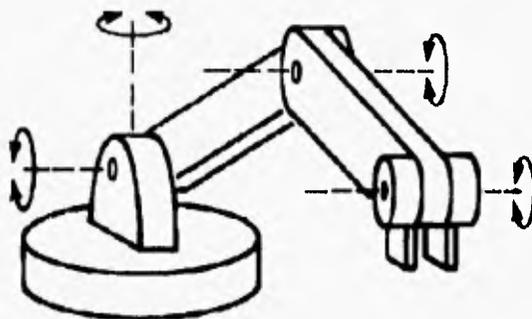


Figura 2.6 Robot de coordenadas articuladas¹¹.

II.11.2. Sensores de posición

El uso de sensores en la robótica es indispensable porque van a ser los que permitan obtener información vital para el buen funcionamiento y control de todo el mecanismo, esta información puede ser del entorno de trabajo o de la posición de alguno de los componentes del manipulador, por lo anterior, los sensores se pueden dividir en dos categorías: de estado

¹¹ tomado de Groover, Mikell P., op. cit., p.23

interno y de estado externo. Los sensores de estado externo como ya se mencionó, son los que tratan de obtener información del entorno de trabajo y los sensores de estado interno son los que van a permitir detectar las variables de posición de las articulaciones para controlar al robot.

Los robots en general, pueden estar equipados con pocos o ningún sensor externo, tales como sistemas de visión, sensores de proximidad y alcance, sensores táctiles, sensores de temperatura, presión y otras variables, pero siempre tendrán al menos un sensor interno.

| SISTEMA | PUNTO DE REFERENCIA | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---------------------|---------------------|--|--|
| potenciómetro | fijo | Pequeño Barato | Incertidumbres mecánicas Medida por contacto |
| ultrasonido | fijo | Medición directa Alto rango de medición en traslación | Caro Procesamiento de datos difícil |
| resolver | ambiguo | Robusto Diseño simple | Alto grado de digitalización de señales Datos ambiguos |
| encoder absoluto | fijo | Alta resolución Nula suma de errores Representación confiable de ángulos | Rango limitado Demasiado caro |
| encoder incremental | ambiguo | Rango ilimitado Pequeño Diseño simple | Suma de errores Necesita de un contador de vueltas Señales de pulso ruidosas |

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de sensores de posición.

El robot que se da a conocer en el presente trabajo, tiene configuración de brazo articulado sin muñeca y el efector final es un

electrolmán. Los sensores internos utilizados para control de posición son potenciómetros por ser de los sensores más económicos y los que se adquirieron tienen la característica de ser lineales. Este manipulador carece de sensores externos dado que su principal tarea es la de tomar objetos sin importar su geometría, y para llevar a cabo esta tarea, no son necesarios dichos sensores.

II.11.3. Actuadores de manipuladores

El actuador es el mecanismo que realiza el movimiento angular de las articulaciones. Existen diversos tipos de actuadores, a continuación se presentan los más utilizados, así como sus características:

- **Neumáticos.** Obtienen su energía de un cilindro de aire comprimido. Estos actuadores son muy rápidos pero difíciles de controlar con precisión, y se usan en robots pequeños y de pocos grados de libertad.
- **Hidráulicos.** Obtienen su energía del movimiento de algún fluido como el aceite, tienen la ventaja de ser rápidos y de tener una gran capacidad de carga, pero son muy voluminosos y son propensos a constantes fugas del aceite.
- **Eléctricos.** Se basan en motores eléctricos que aún sin ser muy rápidos y sin tener una gran capacidad de carga, son mucho más controlables de manera que su repetibilidad y precisión son muy altas, por lo que son los más usados.

II.11.4. Inteligencia de robots

Un robot será "inteligente" en la medida de su capacidad de tomar decisiones para interactuar con el entorno que lo rodea, esta capacidad se debe expresar fundamentalmente en la planificación de sus movimientos y en la interpretación de la información captada por sus sensores.

Uno de los problemas en robótica es la planificación de la secuencia de movimientos que un manipulador debe seguir para resolver alguna tarea previamente especificada y luego controlar al robot cuando ejecuta las órdenes necesarias para lograr conseguir su objetivo. En robótica, planificación significa decidir un curso de acción antes de actuar, y para actuar de la mejor manera, el robot necesita de la tecnología sensorial para poder llevar a cabo con éxito su tarea.

La cantidad y la calidad de los sensores, le permiten al programa que controla al robot tener mas información para poder desplazar de manera eficiente sus componentes en su entorno de trabajo. Por otro lado es importante tener programas que tengan la capacidad de interpretar adecuadamente los datos y para la consecuente toma de decisiones, pues sin dichos programas será impensable decir que se tiene un robot con cierta medida de "inteligencia".

La inteligencia de los robots todavía es tema de investigación, desarrollo y discusión, por lo que aún están por verse muchos logros en el futuro cercano.

II.12. Estado del arte de los manipuladores.

En la década pasada, los manipuladores tuvieron un gran auge en la industria, pero actualmente han perdido su popularidad ya que ahora solo forman parte de sistemas más complejos. Por ejemplo, en Japón existen empresas dedicadas a la producción y arrendamiento de manipuladores a compañías pequeñas¹². La tendencia de la investigación de estos sistemas es aumentar su "inteligencia" a través de sensores cada vez más sofisticados.

Como ejemplo del desarrollo de la robótica en México se tiene el reciente diseño de un manipulador que funcionará en un cuarto limpio, dirigido por el Dr. Marcelo López Parra en el Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Los manipuladores son la mejor herramienta para el manejo de los semiconductores, debido a que operan con gran precisión y tienen la capacidad para funcionar en ambientes con características muy específicas como los cuartos limpios¹³.

¹² Reyes Bejarí, Gina P., et. al. *Diseño y construcción de un robot programable y dirigido a control remoto*. Tesis presentada para obtener el título de Ingeniero en Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. México D.F. 1992. p.p. 50,51

¹³ Romero, Laura. "Se diseña un robot manipulador para la industria de semiconductores". *Gaceta UNAM*. Año 11. Décima época. Número 3006. Abril 1996. p.p. 1, 12-13.

III. DISEÑO DEL VEHÍCULO DE GUÍA AUTOMÁTICA

A continuación se presenta el proceso de diseño del vehículo que, como ya fue mencionado, tiene la función de transportar a lo largo de una ruta predeterminada, las piezas que se encuentren en determinada estación hacia otra estación de acuerdo a un programa de computadora.

III.1. Análisis de necesidades

El objetivo del VGA es el transporte de piezas a través de una ruta predeterminada. Dadas las limitaciones económicas a las que está sometido este proyecto, se llegó a la conclusión de que el mecanismo de navegación debería basarse en un sistema de guía óptica. El vehículo debe ser capaz de seguir una trayectoria, la cual estará marcada por una línea de color negro sobre un piso de color claro. Debe detectar estaciones y poder decidir en cual de ellas detenerse.

En cuanto a la capacidad de carga, deberá ser la suficiente como para soportar 30 kg. además de tener autonomía energética por un período de al menos una hora. Todo lo anterior debe consumir el mínimo de recursos tanto electrónicos como económicos posibles.

III.2. Modelado matemático

No es necesario un modelo matemático para poder hacer que el VGA se desplace a una posición determinada en su área de trabajo. Este problema se soluciona con la inclusión de un código binario para indicar las estaciones, se sabe que éste no es el proceso más efectivo, pero si el suficiente para nuestro propósito.

Tampoco está por demás mencionar que la ley que rige el movimiento de cualquier cuerpo es la relación que a continuación se presenta:

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \cdot \text{aceleración}$$

Como se pretende exclusivamente que el coche tenga un perfil de aceleración adecuada, la fuerza que debe proporcionar el motor de impulso debe ser proporcional a la masa máxima del vehículo más el peso de los componentes electrónicos, el manipulador y la carga. En forma ideal se espera que la magnitud de la aceleración sea constante, pero en realidad la masa del vehículo es variable, pero estas variaciones son pequeñas y hasta cierto punto aleatorias. Por lo que se necesita un motor de impulso que

proporcione una fuerza mayor a la masa máxima esperada que tenga el vehículo al estar cargado.

III.3. Diseño del sistema mecánico

El sistema mecánico fue desarrollado en el Instituto Tecnológico de Morelia y consta de un coche de tipo triciclo, con un motor de impulso que mueve a las ruedas traseras y al frente un motor que controla dirección.

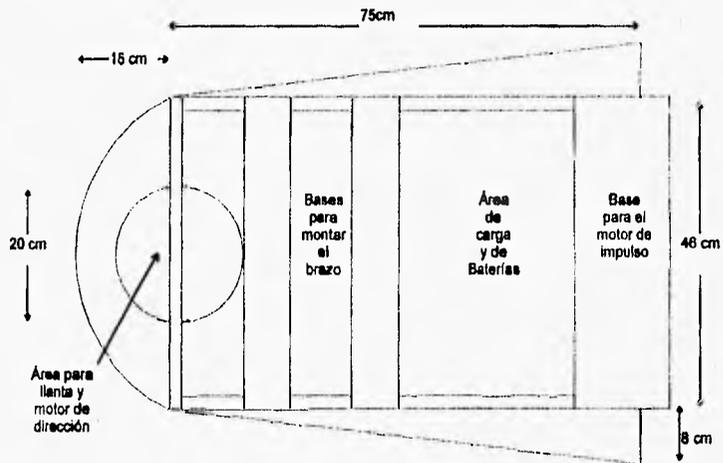


Figura 3.1. Vista superior de la base del vehículo (a escala).

La base del vehículo es de madera y puede soportar un peso máximo de 70 Kg. Los dos motores están montados sobre esta base así como los

circuitos electrónicos que controlan el sistema completo y las baterías que proporcionan la energía. La figura 3.1 muestra la vista superior de la base sin motores ni ruedas, se puede observar el área para carga, para baterías, las bases en las cuales se coloca el robot así como los motores de impulso y de dirección.

Las ruedas traseras están conectadas entre sí mediante un mecanismo diferencial. Sus dimensiones son de 15 cm, de diámetro por 5 cm. de ancho. Se puede observar en la figura 3.2 el conjunto de cuatro engranes que permiten que al dar una vuelta, la rueda más cercana al eje de rotación gire con menor velocidad que la rueda externa y evitar la fricción que se produciría si el eje fuera sólido. También se observa el engrane mediante el cual se conecta el mecanismo al motor de impulso que está en la parte trasera del vehículo.

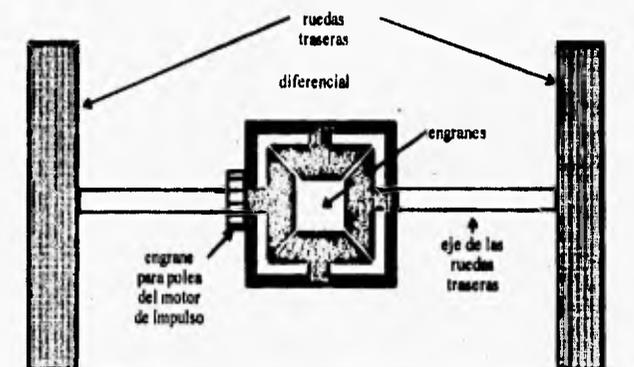


Figura 3.2. Mecanismo diferencial en las ruedas traseras del vehículo.

El motor de impulso (o de arranque) gira a 4000 revoluciones por minuto (RPM) sin carga, y proporciona la fuerza suficiente para mover al coche junto con su carga. Esta velocidad es muy elevada por lo que se le puso un reductor de velocidad que presenta una relación de 40:1 que permite aprovechar la potencia máxima sin hacer que el coche camine a velocidades demasiado grandes. De esta manera, la velocidad angular de salida del conjunto motor reductor es de 100 RPM, sin carga. Considerando que las ruedas traseras tienen un diámetro de 15 cm., entonces tendrán un perímetro de 47.124 cm., por lo que la velocidad ideal del coche debe ser de aproximadamente 47.124 m /min. o de 78.5 cm /seg., pero si se toma en cuenta la carga que tiene éste vehículo, la velocidad se ve reducida a alrededor de 50 cm/seg. En la figura 3.3 se muestra el conjunto motor-reductor y la forma en que está conectado a las ruedas traseras del vehículo.

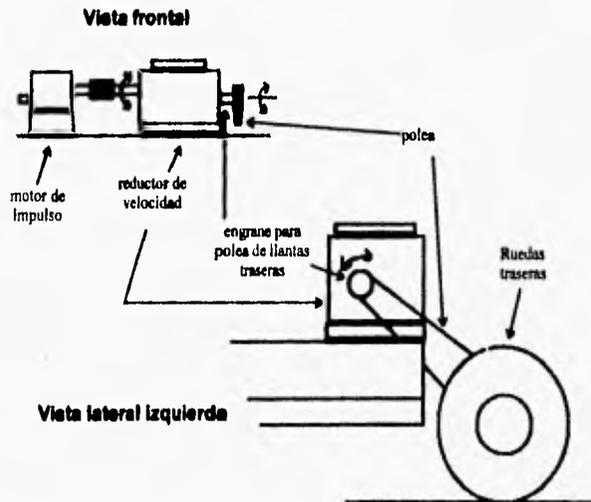


Figura 3.3 Vistas frontal y lateral del mecanismo de impulso del vehículo

El motor de dirección está unido al eje que mueve a la llanta delantera y hace la función de volante del vehículo. Este motor se alimenta con 24 V de corriente continua y gira a 30 RPM cuando no tiene carga, la velocidad se ajustará reduciendo el voltaje de alimentación para evitar que los giros sean demasiado grandes cuando se realice alguna corrección de trayectoria. Las dimensiones de la llanta delantera son de 13 cm. de diámetro y 5 cm. de ancho. En la figura 3.4 se observa la conexión del mecanismo.

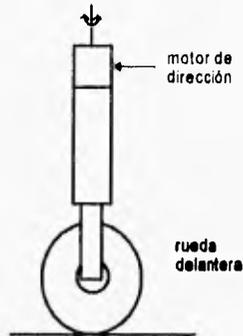


Figura 3.4 Motor de dirección del VGA.

III.4. Diseño del sistema electrónico

Como ya se vio, el vehículo cuenta con dos motores, uno que le da la fuerza necesaria para moverse hacia adelante y otro que funciona como volante, mediante el cual se ajusta la dirección del movimiento. El sistema

electrónico tiene dos funciones principales: comunicar al coche con la computadora, y controlar el movimiento de los motores.

En cuanto a la comunicación con la computadora, el sistema le tiene que informar a la máquina en todo momento el estado de los sensores y de acuerdo a esta lectura, la computadora conoce el momento en el que se llega a una estación o si el coche se ha salido de la guía, para decidir que acciones tomar.

Por otro lado, el sistema electrónico debe tener la capacidad de controlar la dirección del movimiento del motor delantero para que el coche siempre permanezca sobre la guía. Para hacer el reconocimiento de la guía antes mencionada, tenemos tres sensores que son capaces de "ver", distinguiendo los tonos claros de los oscuros. En la figura 3.5 se presenta el diagrama de bloques de este sistema.

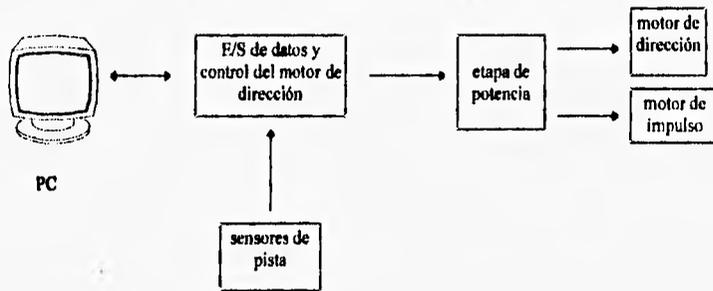


Figura 3.5 Diagrama de bloques del Sistema Electrónico del VGA.

III.4.1. Diseño del sistema de navegación

El sistema de navegación se encarga de garantizar que el vehículo se desplace sobre la guía, y está conformado por los sensores ópticos y la lógica de movimiento de los motores del vehículo. El control de estos motores se realiza en forma distribuida, ya que el circuito electrónico controla directamente al motor de dirección, mientras el motor de arranque es controlado por el sistema de cómputo. Aunque mas adelante se hablará exclusivamente del sistema de cómputo, en esta sección describimos la lógica del motor de arranque, pues en el sentido estricto forma parte del sistema de navegación.

El mecanismo de sensado está formado por una fuente emisora de luz y tres fotorresistencias, que se instalaron en una caja oscura para evitar posibles interferencias debidas a fuentes externas de luz.

La caja se encuentra dividida en 4 secciones como se muestra en la figura 3.6. En la parte frontal se encuentra la fuente luminosa, la parte posterior se divide en tres secciones y en cada sección está localizado un sensor.

La separación de la sección central es importante, pues de acuerdo a ésta distancia tendrá que ser el ancho de la línea central de la pista. En nuestro caso la separación de la división central es de 2 cm. Las paredes que separan entre sí a las fotorresistencias, y a su vez las aíslan de la fuente luminosa son oscuras para evitar las interferencias de una sección a otra.

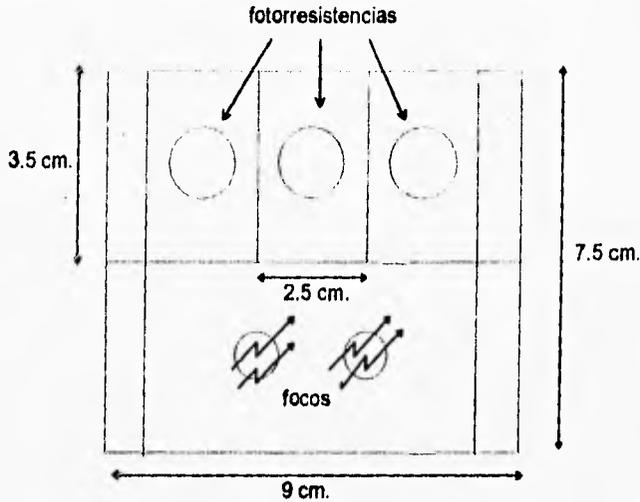


Figura 3.6. Distribución física de los sensores y fuente emisora de luz

El objetivo de las fotorresistencias es entregar un voltaje proporcional a la cantidad de luz que reciben. La fuente de luz está constituida por dos focos de 6.3V colocados en serie, los cuales proporcionan una cantidad de luz suficiente para reflejarla sobre la pista y ser captada por los sensores.

Cada una de las fotorresistencias se conecta a la entrada no inversora de un circuito comparador de niveles de voltaje como el que se muestra en la figura 3.7. El circuito integrado que empleamos para realizar la comparación de niveles de voltaje es el LM339, que es un comparador cuádruple con salidas de colector abierto, por esta razón es necesario conectar en cada una de ellas una resistencia de pull-up con valor de $1\text{ k}\Omega$. Cada fotorresistencia se alimenta con 5 Volts y su salida se conecta a la entrada no inversora del amplificador operacional y a una resistencia R_i , que a su vez está conectada

a tierra, con la finalidad de formar un divisor de voltaje en la entrada del comparador. Como se puede ver este voltaje dependerá directamente de la cantidad de luz recibida por la fotorresistencia.

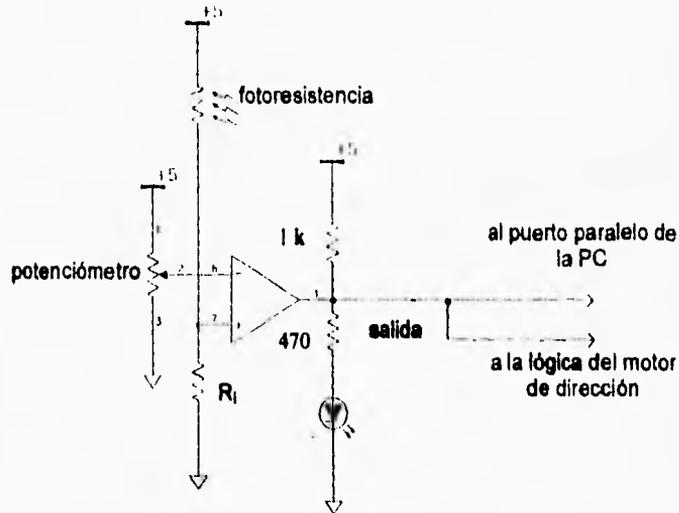


Figura 3.7. Sensor de guía.

Este arreglo permite realizar la comparación del voltaje proporcionado por la fotorresistencia con el voltaje presente en la entrada inversora del operacional (este voltaje de referencia es entregado por el potenciómetro), de manera que cuando la fotorresistencia "ve" un tono claro, el operacional entrega un "1" lógico, y cuando "ve" un tono oscuro, entrega un "0" lógico.

Para definir el valor óptimo de las resistencias R_i se realizó una prueba con la intención de encontrar el valor que presentan las fotorresistencias cuando están colocadas en la posición que tendrán en

forma definitiva (con la caja elevada 2 cm. por encima del suelo). Los experimentos se realizaron midiendo las tres fotorresistencias alternando tonos claros y oscuros en el piso, y los resultados se muestran en la tabla 3.1.

| Prueba | Sensor Izquierdo | | Sensor central | | Sensor Derecho | |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | Claro | Obscuro | Claro | Obscuro | Claro | Obscuro |
| 1 | 22 k Ω | 149 k Ω | 8 k Ω | 134 k Ω | 9 k Ω | 84 k Ω |
| 2 | 24 k Ω | 147 k Ω | 9 k Ω | 120 k Ω | 9 k Ω | 150 k Ω |
| 3 | 28 k Ω | 130 k Ω | 8.7 k Ω | 170 k Ω | 9 k Ω | 60 k Ω |
| 4 | 28.8 k Ω | 112 k Ω | 9 k Ω | 180 k Ω | 10 k Ω | 47 k Ω |
| | | | | | | |
| Media | 25.7 kΩ | 134.5 kΩ | 8.7 kΩ | 151 kΩ | 9.2 kΩ | 85 kΩ |

Tabla 3.1 Resistencia Promedio de Sensores.

De los datos obtenidos, podemos observar que el valor más elevado para una lectura de tono claro es de 28.8 k Ω y el valor más bajo para un tono oscuro es de 47 k Ω . Además, por conveniencia, necesitamos que el voltaje de umbral entre claro y oscuro esté aproximadamente situado a 2.5 V, es decir, la mitad del voltaje de alimentación. para esto deberíamos usar una resistencia de 37.9 k Ω (valor promedio entre 28.8 k Ω y 47 k Ω), pero el valor comercial más cercano es de 33 k Ω , por lo que se decidió que las resistencias R_i tuvieran el valor de 33 k Ω .

Como el voltaje de referencia en el comparador se conecta a la entrada inversora, cuando la tensión del divisor de voltaje entre la resistencia de 33 k Ω y la fotorresistencia es mayor al voltaje de referencia fijado por el

potenciómetro, la salida del comparador alcanzará su voltaje de saturación positivo (que representa al "1" lógico), pero cuando el voltaje del divisor es menor al de referencia, la salida será un nivel bajo (que representa al "0" lógico). El valor de los potenciómetros no es relevante, debido a que solamente son utilizados como un divisor de voltaje variable que sirve para ajustar el circuito al instalar el vehículo sobre la pista, por lo cual elegimos un valor de 10 k Ω en forma arbitraria.

Para facilitar la calibración del circuito se conectaron adicionalmente a la salida de cada comparador un led con su correspondiente resistencia de 330 Ω , éste led se encenderá cuando el sensor correspondiente "vea" un tono claro y se apagará cuando "vea" un tono oscuro. Para lograr tener un circuito totalmente calibrado será necesario realizar pruebas de tonos en cada sensor (en la instalación en la cual operará el vehículo) y ajustar los potenciómetros asociados a cada sensor hasta observar en los leds una respuesta adecuada.

Como se mencionó anteriormente tendremos tres salidas binarias las cuales forman ocho posibles combinaciones, cada una de las cuales corresponde a una acción que debe realizar el coche en determinado momento, por ejemplo corregir su trayectoria o detenerse. Un nivel de voltaje alto nos indica un sensado de un tono claro y un nivel de voltaje bajo nos indica una lectura de un tono oscuro. De acuerdo a lo anterior y a las características de nuestra pista formamos la tabla 3.2 que muestra la acción del motor de dirección en función de lo que "ven" las fotorresistencias. E_2 , E_1 y E_0 corresponden al nivel lógico de salida de los comparadores, E_2 al sensor izquierdo, E_1 al central y E_0 al derecho, Hab es la salida que controla el encendido del motor de dirección (cuando vale 1 el motor se enciende y cuando vale 0 el motor se apaga) y Dir es la salida que nos indica el sentido

en el que se mueve el motor de dirección (0 indica movimiento a la derecha y 1 indica movimiento a la izquierda).

| E ₂ | E ₁ | E ₀ | Hab | Dir | Descripción |
|----------------|----------------|----------------|-----|-----|---------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | * | No corrección |
| 0 | 0 | 1 | 0 | * | No corrección |
| 0 | 1 | 0 | 0 | * | No corrección |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | Corrección a la izquierda |
| 1 | 0 | 0 | 0 | * | No corrección |
| 1 | 0 | 1 | 0 | * | No corrección |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | Corrección a la derecha |
| 1 | 1 | 1 | 0 | * | No corrección |

Tabla 3.2. Lógica del motor de dirección del VGA.

La salida Dir solamente tiene efecto en el motor cuando la salida Hab tiene un nivel alto de voltaje, de ahí que en otro caso tenga el valor conocido como "no importa" (representado por un "*"). Notamos en la tabla que esta salida es igual a la entrada del sensor E₀, por lo que no hay que diseñar ningún circuito.

La salida Hab fue implementada con un multiplexor 8:1 (ocho entradas, una salida y tres líneas de control). El nivel de voltaje en cada entrada D_i lo tomamos directamente de la tabla (es igual a la salida Hab correspondiente a la combinación de entradas "i"). El circuito integrado elegido fue el 74151 y su diagrama de conexiones se muestra en la figura 3.8.

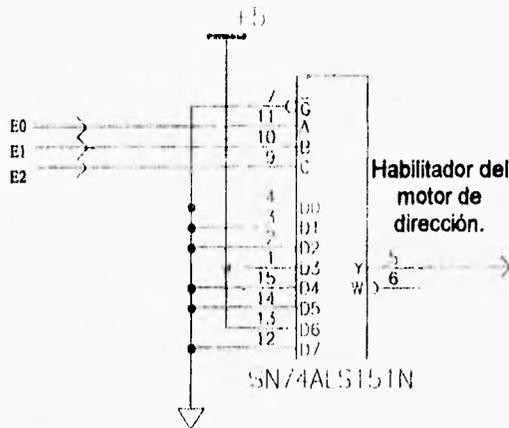


Figura 3.8. Diagrama del habilitador del motor de dirección

Los valores obtenidos de las lecturas de los sensores son alimentados a la computadora mediante un cable y ésta realiza el control del motor de arranque de acuerdo a la lógica establecida por la tabla 3.3. La etapa electrónica recibe de la computadora un nivel de voltaje alto cuando es necesario que se mueva el motor de arranque y lo entrega directamente a la etapa de potencia del mismo motor para lograr que el movimiento se produzca.

Es oportuno mencionar que en el presente trabajo no es necesario que el motor de arranque tenga dos direcciones, pues es suficiente que actúe solamente en sentido frontal para poder seguir la guía, por lo cual no es necesario tener una salida de dirección.

| E ₂ | E ₁ | E ₀ | Hab | Descripción |
|----------------|----------------|----------------|-----|-----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | Alto en estación 'A' |
| 0 | 0 | 1 | 1 | Alto en estación 'B' |
| 0 | 1 | 0 | 0 | Alto en estación 'C' |
| 0 | 1 | 1 | 0 | Avance con corrección |
| 1 | 0 | 0 | 1 | Alto en estación 'D' |
| 1 | 0 | 1 | 1 | Avance |
| 1 | 1 | 0 | 0 | Avance con corrección |
| 1 | 1 | 1 | 0 | Alto por error |

Tabla 3.3. Lógica de activación del motor de arranque

En la figura 3.9. observamos el circuito completo de la lógica del VGA, incluyendo el puerto DB25 hembra (en la figura se representa como DB25F) así como el conector para las fotorresistencias que se localiza en la parte superior derecha. Como en la caja donde se encuentran los sensores y los focos, se colocó un cable amarillo para el sensor derecho, uno azul para el central y uno verde para el izquierdo, éstos se representan en el conector como AM, AZ y VE respectivamente, además se indica la alimentación de 12 Volts para los focos y la de 5 Volts para las fotorresistencias. En el puerto DB25 se observan los pines que se emplearon para la interfaz con la computadora, a éstos nos referiremos mas adelante.

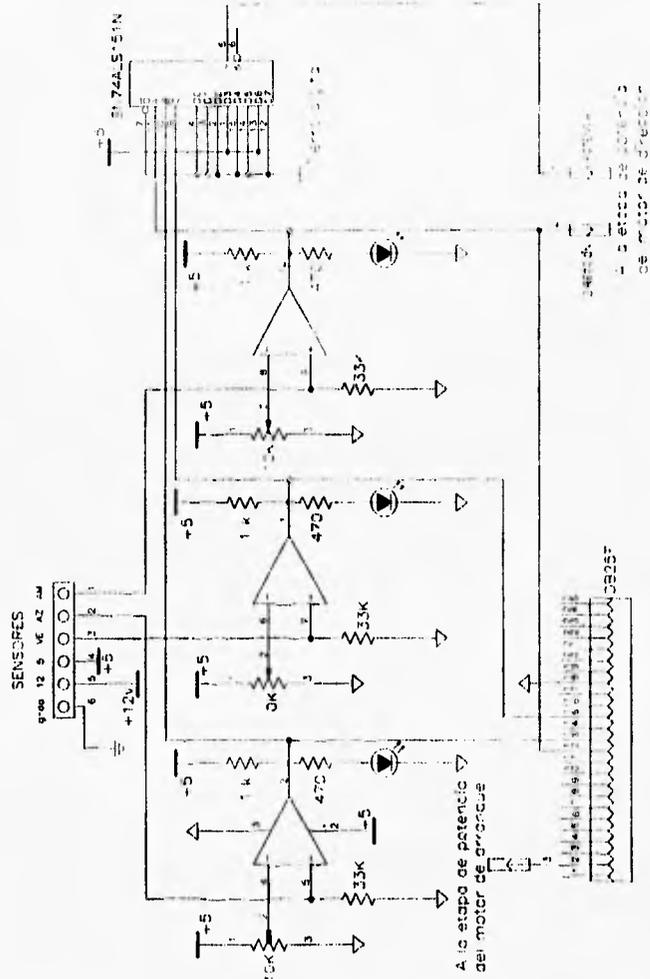


Figura 3.9. Diagrama electrónico de la lógica del VGA.

III.4.2. Etapa de potencia del vehículo

Los motores son dispositivos que consumen una cantidad de corriente muy elevada en comparación con la que proporcionan los circuitos lógicos, además de que su voltaje de operación también es diferente. Por esta razón es necesario tener una etapa de potencia cuya finalidad es proporcionar el voltaje y la corriente necesarias para los motores, permitiendo así que los niveles de voltaje lógicos se conviertan en el movimiento correspondiente.

En las salidas lógicas se colocaron optoacopladores para proteger los circuitos lógicos aislándolos de la etapa de potencia. Los optoacopladores los utilizamos para activar o desactivar relevadores, que actúan como interruptores. Si la etapa lógica tiene como salida un "1", el optoacoplador permite el flujo de corriente en la bobina del relevador, produciendo un campo magnético que cambia la posición de uno o más interruptores, dependiendo del tipo de relevador. Los polos del relevador son los interruptores que presenta, mientras que los tiros son las entradas a las cuales pueden estar conectadas cada uno de los interruptores.

Se utilizaron dos tipos de relevadores: de un polo un tiro (que constan de un solo interruptor normalmente abierto) y de dos polos dos tiros (que son un par de interruptores de dos tiros activados por la misma bobina). Es importante mencionar que se utilizaron relevadores porque soportan la corriente que les demandan los motores que empleamos y porque no necesitamos cambiar las posiciones de los interruptores a alta frecuencia.

En la figura 3.10 se observa la etapa de potencia del motor de arranque o impulso, se puede observar que el optoacoplador empleado es el

4n27 y solo se usa un relevador de un polo y un tiro que conecta o desconecta al motor de su alimentación pues éste solo se mueve en una dirección. También se observa que la entrada del optoacoplador se toma directamente del puerto de la PC.

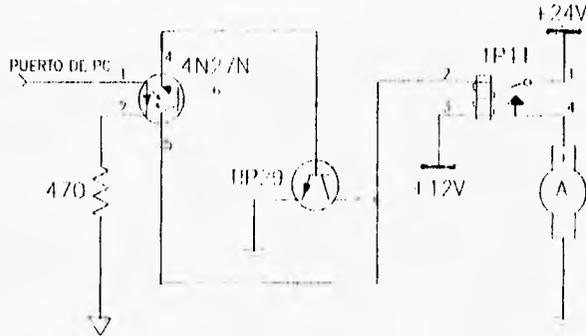


Figura 3.10. Etapa de potencia del motor de arranque o impulso.

En la figura 3.11 se muestra el diagrama de la etapa de potencia del motor de dirección, en el cual se usa un relevador de dos polos, cada uno con dos tiros que intercambian la polaridad del motor para lograr movimientos en una u otra dirección. La alimentación del motor está controlada por el relevador de un polo un tiro. Aquí se puede ver que el voltaje de alimentación debe ser variable para poder ajustar la velocidad del motor de manera que el coche resuelva adecuadamente los giros que tenga que hacer al seguir la guía del piso.

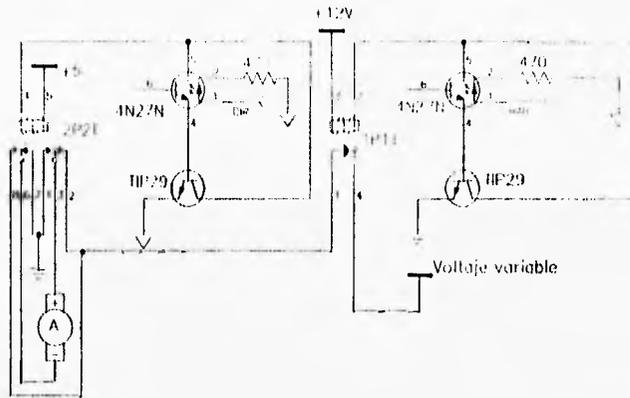


Figura 3.11. Etapa de potencia del motor de dirección.

III.4.3. Diseño del sistema de alimentación autónoma

El vehículo debe de contar con total autonomía de energía. Para esto se es necesario utilizar una fuente de potencia capaz de proporcionar los niveles de voltaje que necesitamos para alimentar los circuitos lógicos (que son de 5 V), las etapas de potencia (que utilizan 12 V, 24 V y un voltaje variable) y la PC (que requiere de 127 V de corriente alterna), lo debe hacer durante un periodo de tiempo razonable y debe ser recargable.

La fuente de potencia está formada por tres baterías de plomo marca Power Sonic modelo PS-12330, estas baterías entregan 12 V y 33 A por

Hora y son recargables. Se eligieron baterías de plomo porque son las más económicas entre las recargables y su ciclo de vida es de aproximadamente 6 u 8 años . Con éstas se alimenta tanto la etapa de potencia de los motores del vehículo y del manipulador como la fuente de energía de la computadora. En la figura 3.12. se muestra el diagrama del circuito de alimentación empleado para obtener los voltajes necesarios de las baterías.

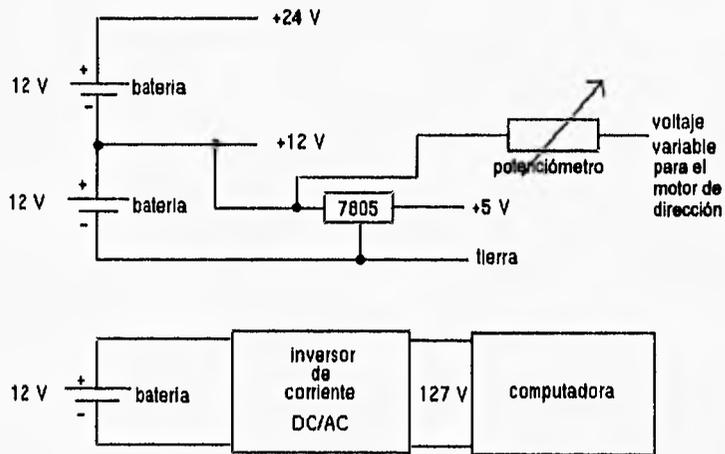


Figura 3.12. Sistema de Alimentación Autónoma.

Como se muestra en la figura anterior, la alimentación de 5V se consigue utilizando el circuito 7805 que es un regulador de voltaje a 5V que soporta cargas de corriente de 1 A, suficientes para alimentar la lógica del vehículo.

El motor de dirección recibe su alimentación de un potenciómetro conectado a 12V., mismo que se utiliza para ajustar la velocidad de los giros

del coche al seguir la guía. También se puede ver que se usa un inversor para obtener los 127 V. de corriente alterna, que alimentan a la computadora personal. Este inversor es de marca Statpower y entrega 127 V de corriente alterna a un máximo de 125 W, que son suficientes para alimentar a una PC, con su monitor y teclado.

En el proceso de carga de las baterías se utilizan tres transformadores que se conectan a una alimentación de 110 V de corriente alterna y cuentan con conectores que se unen a ambos polos de la batería, con esta conexión se consigue un flujo de corriente hacia las celdas interiores de la fuente generando un reacción química que finalmente recarga las baterías. Los generadores poseen dos indicadores luminosos el primero indica que la batería está siendo cargada y el segundo se enciende cuando el proceso de carga ha concluido. Por las características de la batería, el voltaje en sus terminales debe ser siempre mayor al 90 % del nominal (es decir 10.8 V), si éste es menor es necesario recargarla.

III.4.4. Interfaz con la computadora.

El vehículo se puede controlar desde cualquier computadora personal compatible con IBM, que tenga un puerto paralelo con conector DB25. El puerto paralelo que se usará es el conocido como Puerto de Impresora.

Cuando la PC se enciende se detectan cualesquiera adaptadores de impresión existentes y se les asigna un puerto lógico a cada uno de ellos, a saber LPT1, LPT2 o LPT3. Cada adaptador de impresión utiliza tres

direcciones para cada puerto de entrada/salida, una para el dato de salida (dirección base), otra para recibir señales de estado de la impresora (dirección base +1) y la tercera para protocolos (dirección base +2).

En las computadoras que tienen el conector de impresora en una tarjeta de vídeo monocromática o CGA, la dirección base asociada es la 3BC, en otros casos es la dirección 378 o 278 (todas estas direcciones están expresadas como números hexadecimales), que regularmente representan a LPT1 y LPT2 respectivamente.

Para nuestros fines solo necesitamos la dirección de entrada de datos y la de salida. La dirección de entrada nos sirve para conocer el estado de los sensores externos de la computadora, mientras que la dirección de salida nos sirve para darle instrucciones a la tarjeta de control. Los bits de estas direcciones están asociados a los pines del conector DB25 de acuerdo a la tabla 3.4:

Los demás pines no se utilizan para la aplicación que se le da al puerto en este trabajo, cabe hacer notar que el bit 7 de entrada asociado al pin 11 del conector DB25 está invertido, por lo que al usarlo se debe interpretar como una negación de la entrada, o en su defecto se debe negar antes de introducirlo en la computadora.

| pin | función | bit | dirección asociada |
|---------|---------|---------------|--------------------|
| 2 | salida | 0 | base |
| 3 | salida | 1 | base |
| 4 | salida | 2 | base |
| 5 | salida | 3 | base |
| 6 | salida | 4 | base |
| 7 | salida | 5 | base |
| 8 | salida | 6 | base |
| 9 | salida | 7 | base |
| 15 | entrada | 3 | base + 1 |
| 13 | entrada | 4 | base + 1 |
| 12 | entrada | 5 | base + 1 |
| 10 | entrada | 6 | base + 1 |
| 11 | entrada | 7 (invertido) | base + 1 |
| 18 a 25 | tierra | | |

Tabla 3.4 Pines utilizados del puerto paralelo.

Para el caso del coche se emplean los pines 15, 13 y 12 como los E_0 , E_1 y E_2 de los sensores y el pin 2 como habilitador del motor de arranque. Más adelante, en el diseño del sistema de cómputo, se tratará con detalle el manejo de éstas señales para lograr que el coche se mueva adecuadamente.

Por otro lado hay que mencionar que aquí se utilizará a LPT1 como puerto para realizar el sistema de cómputo del coche, pero en la etapa de integración de los sistemas se empleará a LPT2, para dar cabida al controlador del coche y al del manipulador en la misma computadora.

III.5. Diseño del sistema de cómputo

Como el sistema que controla al VGA es solamente uno de los componentes del programa completo, se realizará una función que pueda ser llamada desde cualquier lugar, los objetivos de esta función serán:

- Hacer que el coche se desplace a través de la pista a una estación específica que será indicada como parámetro de la función.
- Controlar por modulación de ancho de pulsos la velocidad de arranque y frenado para evitar movimientos bruscos.

La función codificada se puede consultar en el apéndice C.

III.5.1. Algoritmo del sistema de control del VGA

leer del puerto la posición actual de los sensores;
si la posición actual no es la deseada y es distinta de error;
 arrancar el motor de arranque;
 mientras no encuentre la estación deseada y no esté en error
 mantener el movimiento;
 detener el motor de arranque;
si se detectó error, termina y regresa código de error.

Al hacer la lectura de la posición actual se considera la lógica establecida en las tablas 3.2 y 3.3 en las que se especifica el significado de

cada combinación de los sensores y la acción correspondiente del motor de arranque y del motor de dirección del vehículo. Las salidas E_2 , E_1 y E_0 asociadas a la lectura de cada uno de los sensores, entran a la computadora a través de los pines 12, 13 y 15 del puerto paralelo respectivamente, que corresponden a los bits 3, 4 y 5 de la palabra leída, por lo que es necesario hacer un corrimiento de bits a la derecha y aplicarle una máscara para eliminar los 5 bits que no serán utilizados en el proceso. Si la palabra es igual a cero, significa que el coche está en la estación "A", si es uno, se encuentra en la estación "B", si es dos, se encuentra en la estación "C", si es cuatro, se encuentra en la estación "D" y en caso de que sea igual a siete, está fuera de la pista.

Para realizar el esquema de aceleración y frenado del vehículo, se empleó la técnica de modulación por ancho de pulsos. Esta técnica permite variar el tiempo en el cual un motor está en movimiento en un intervalo determinado, esta variación produce como consecuencia una variación de la velocidad.

Aplicando pulsos periódicos de alimentación al motor de longitud variable, el motor se moverá a una velocidad directamente proporcional a la duración de los pulsos altos. Esto permite tener un control de velocidad por un algoritmo que controle la duración del pulso de alimentación al motor que se desee. Como en el vehículo nos interesa controlar la velocidad al arrancar, es necesario partir de un pulso alto de corta duración e ir incrementándolo hasta llegar a una velocidad máxima, mientras que al frenar, se hace el proceso inverso, es decir, iniciar con un pulso alto de larga duración que se va acortando hasta detenerse. También es posible hacer que el motor siga un perfil de velocidad dado por una ecuación matemática, ya que el proceso de variación de la velocidad se reduce a la variación de la

longitud de un pulso periódico, que puede ser el resultado de una función de tiempo.

El habilitador de movimiento del motor de arranque está conectado al pin 2 del conector DB25, que es el bit 0 de la dirección de salida de datos del puerto de impresión. Para realizar la modulación por ancho de pulsos, le enviamos al coche los pulsos a través de este pin. En la figura 3.13, se muestra como la duración del pulso periódico se ve reflejada en la velocidad del motor.

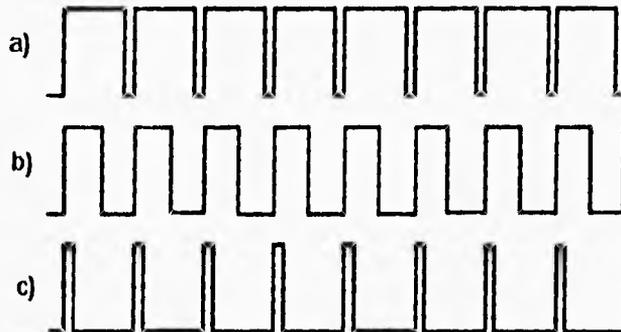


Figura 3.13 Técnica de modulación por ancho de pulsos: a) El pulso alto tiene una mayor duración (velocidad alta). b) El tiempo de pulso alto es igual al tiempo de pulso bajo (velocidad media). c) El pulso alto tiene una mínima duración (velocidad baja).

IV. DISEÑO DEL MANIPULADOR

El manipulador vehículo de guía automática es la parte de nuestro sistema que permite transportar piezas de un sitio a otro dentro de la instalación, por otro lado es necesario un mecanismo de carga y descarga de piezas. Este mecanismo es un manipulador, cuyo diseño se presenta a continuación.

IV.1. Análisis de necesidades

Se requiere un brazo robot para trasladar piezas de un punto conocido de alguna de las estaciones del sistema a un almacén situado en la parte superior del vehículo y viceversa.

Este brazo es de configuración articulada de tres grados de libertad, porque son suficientes para la tarea que va a realizar y si tuviera menos sería prácticamente imposible el manejo eficiente de las piezas.

Nuestro sistema cuenta con un subsistema mecánico, un electrónico y un programa que coordina la operación de todas las partes del brazo mecánico.

El subsistema mecánico debe tener la capacidad de manejar pequeñas piezas metálicas. El subsistema electrónico deberá ser capaz de informar a la computadora la posición de cada uno de los motores del brazo y de mover los motores en la dirección en que la computadora se los pida. El programa de computadora, permitirá introducir una posición objetivo para calcular los ángulos a los que debe moverse cada motor y hará el movimiento en conjunto con el sistema electrónico. Para tal fin, el programa debe saber la posición en la que se encuentran en determinado momento los motores y, de acuerdo a esta posición, determinar la acción a realizar.

IV.2. Modelado matemático

El modelo matemático de nuestro brazo mecánico es indispensable para poder realizar el control por computadora del mismo. Como se verá en la sección correspondiente a la elaboración del sistema de cómputo que controla al manipulador, las ecuaciones que surjan del modelado serán empleadas para lograr que el manipulador se ubique en una posición determinada dentro de su volumen de trabajo o para conocer la ubicación del extremo del mismo a partir de las posiciones angulares de sus articulaciones con respecto a un eje de referencia conocido.

IV.2.1. Cinemática directa

Para realizar el modelado matemático por cinemática directa se utilizó la técnica de Denavit - Hartenberg¹ que permite encontrar un conjunto de expresiones para conocer la posición actual del extremo del brazo en el espacio de tres dimensiones en función de la posición angular de las articulaciones que lo conforman y de las características del brazo (como la longitud de sus eslabones y su organización física).

El primer paso es encontrar los parámetros de coordenadas de todos los elementos que conforman nuestro brazo mecánico. Para conocer estos parámetros es necesario ubicar los ejes de referencia dentro del brazo que nos interesa. Aquí vale la pena mencionar que aunque nuestro brazo es de tres grados de libertad, no tiene solo tres articulaciones, sino cuatro, al igual que tiene cuatro eslabones, pero el cuarto eslabón junto con la cuarta articulación no tienen ningún motor que los controlen, sino que están libres, de manera que el eslabón permanece siempre vertical y la articulación presenta un ángulo que garantizará la misma posición. Este cuarto eslabón tiene en su extremo el órgano terminal del brazo, que es un electroimán. Por todas estas razones el modelado matemático se realiza considerando exclusivamente tres articulaciones y tres eslabones.

En la figura 4.1 se muestra una representación de los parámetros necesarios para realizar el modelo matemático del brazo y en la tabla 4.1 tenemos su representación que empleamos para llegar a las matrices de transformación de sistemas de coordenadas y lograr obtener una expresión

¹ Juárez Campos, Ignacio *Diseño y construcción de un manipulador de 5 grados de libertad*, Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en México D.F. 1996, pp. 10-16.

que nos permita conocer la posición del extremo del brazo si se conocen las posiciones angulares de las articulaciones.

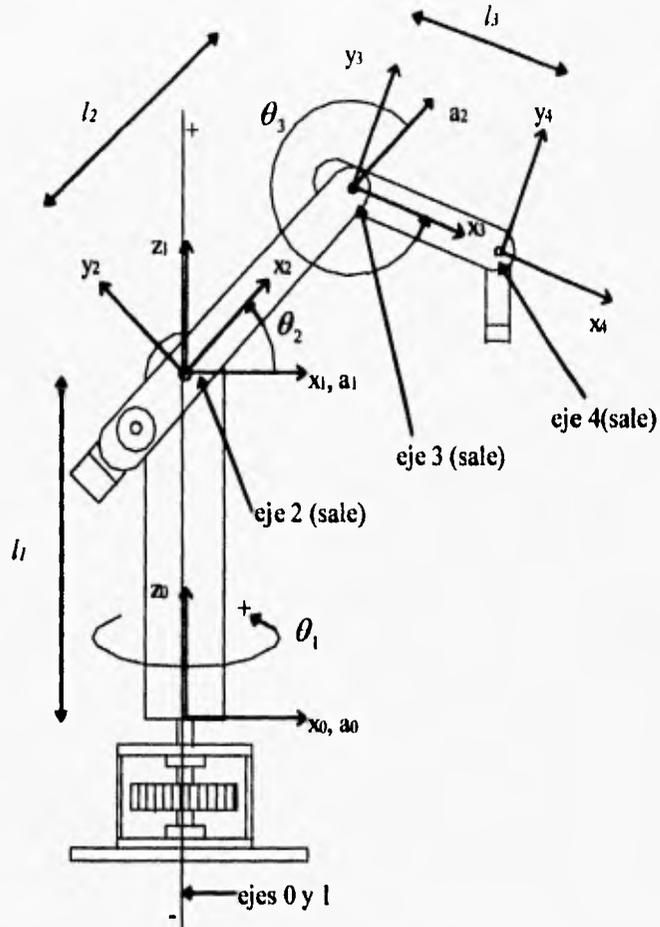


Figura 4.1. Parámetros de coordenadas en notación de Denavit - Hartenberg, para el modelado matemático del manipulador.

| i | a_{i-1} | α_{i-1} | d_i | θ_i | l_i |
|-----|-----------|----------------|-------|---------------------------------------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | l_1 | $0^\circ = < \theta_1 = < 360^\circ$ | 410 mm |
| 2 | 0 | 90 | 0 | $-80^\circ = < \theta_2 = < 90^\circ$ | 300 mm |
| 3 | l_2 | 0 | 0 | $-170^\circ = < \theta_3 = < 0^\circ$ | 200 mm |
| 4 | l_3 | 0 | 0 | | |

Tabla 4.1 Parámetros de coordenadas de los elementos

El siguiente paso es obtener las matrices de transformación que nos darán a conocer las coordenadas de cada una de las articulaciones con respecto al sistema de coordenadas de la base.

Tenemos que la matriz que nos permite hacer una transformación de un sistema de referencia a otro es:

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & | & {}^A P_{ORIG(B)} \\ \hline 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Teniendo estas matrices podremos saber las coordenadas de cualquier punto con respecto al sistema de coordenadas A si conocemos su posición con respecto al sistema de coordenadas B auxiliándonos de la siguiente ecuación:

$${}^A P = {}^A T_B \cdot {}^B P \quad \text{Ecuación 4.2}$$

De acuerdo a la forma general de la matriz de transformación dada por el método de Denavit - Hartenberg, tenemos que la matriz de transformación del sistema de coordenadas 1 con respecto al sistema de coordenadas 0 es la siguiente:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\text{sen } \theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen } \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

De manera similar obtenemos las matrices de transformación para encontrar las relaciones entre los sistemas de coordenadas 2 con respecto al 1 (1T_2), 3 con respecto al 2 (2T_3) y 4 con respecto al 3 (3T_4).

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\text{sen } \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \text{sen } \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\text{sen } \theta_3 & 0 & l_2 \\ \text{sen } \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Con las anteriores matrices podemos obtener la matriz de transformación 0_4T que relación al sistema de coordenadas 4 (o extremo) con el sistema 0 (u origen) utilizando la siguiente relación:

$${}^0_nT = \prod_{i=n}^{i=m-1} {}^i_{i+1}T \quad \text{con } n < m \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Efectuando el producto de matrices de acuerdo a la ecuación anterior, obtenemos la matriz mediante la que se puede conocer la posición del extremo de nuestro brazo en función de la posición angular de cada una de las articulaciones con respecto a los ejes formados por los eslabones. A continuación se presenta el producto de matrices que da lugar a nuestro modelo matemático.

$${}^0_1T {}^1_2T = {}^0_2T = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 & -c\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 c\theta_2 & -s\theta_1 s\theta_2 & -c\theta_1 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

$${}^0_2T {}^2_3T = {}^0_3T = \begin{bmatrix} c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3) & s\theta_1 & l_2 c\theta_1 c\theta_2 \\ s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3) & -c\theta_1 & l_2 s\theta_1 c\theta_2 \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_1 + l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3) & s\theta_1 & l_2 c\theta_1 c\theta_2 + l_1 c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) \\ s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) & -s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_3) & -c\theta_1 & l_2 s\theta_1 c\theta_2 + l_1 s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_3) \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_1 + l_2 s\theta_2 + l_1 s(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

IV.2.2. Cinemática inversa

Con las ecuaciones 4.10 y 4.2, tenemos un modelo que nos permite encontrar la posición en el espacio de tres dimensiones del extremo del brazo, en función de la posición angular de las articulaciones con respecto a los ejes formados por los eslabones. Ésto nos ayuda, mas no es suficiente porque en ocasiones es necesario conocer los ángulos a los que deben estar las articulaciones para lograr alcanzar un punto específico en el espacio, para tal motivo empleamos un método geométrico que se presenta a continuación.

El método se basa en utilizar las relaciones que existen entre la posición del extremo del brazo y los ángulos que presentan las articulaciones, aquí se recurre a los diferentes sistemas de coordenadas y a las matrices de transformación obtenidas con la representación de Denavit - Hartenberg. Además se utilizan los puntos O y H mismos que se definen a continuación.

$$O = \begin{bmatrix} {}^0O_x \\ {}^0O_y \\ {}^0O_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

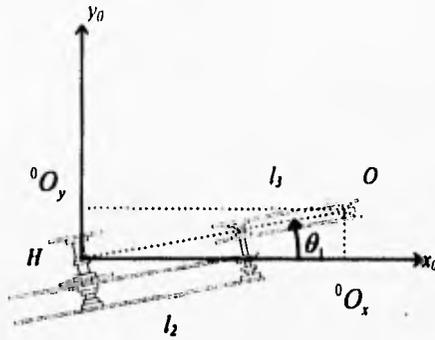


Figura 4.2 Posición del punto extremo del brazo (O) en función del ángulo que presenta la articulación de la base (θ_1).

De la figura 4.2 observamos que

$$\tan\theta_1 = \frac{{}^0O_y}{{}^0O_x}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{{}^0O_y}{{}^0O_x}\right) \quad \text{para } {}^0O_x > 0$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{{}^0O_y}{{}^0O_x}\right) + 180^\circ \quad \text{para } {}^0O_x < 0$$

$$\text{si } {}^0O_x = 0 \text{ y } {}^0O_y \geq 0 \quad \text{entonces } \theta_1 = 90^\circ$$

$$\text{si } {}^0O_x = 0 \text{ y } {}^0O_y < 0 \quad \text{entonces } \theta_1 = -90^\circ$$

Ecuación 4.11

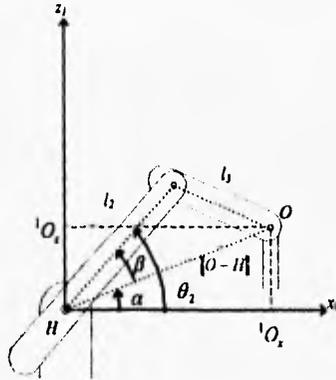


Figura 4.3 Posición del extremo del brazo (O) en relación al ángulo que presenta la articulación del hombro (θ_2).

En la figura 4.3 se observa la relación entre el ángulo θ_2 y la posición del extremo del brazo, de esta figura obtenemos las siguientes relaciones:

$$O-H = \begin{bmatrix} {}^0O_x \\ {}^0O_y \\ {}^0O_z - l_1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

$$\|O-H\| = \sqrt{{}^0O_x^2 + {}^0O_y^2 + ({}^0O_z - l_1)^2} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Por ley de cosenos:

$$l_2^2 = l_1^2 + \|O-H\|^2 - 2l_1\|O-H\|\cos\beta$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 - \|O-H\|^2}{-2l_2\|O-H\|} \right) \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Por otro lado:

$$\tan \alpha = \frac{{}^1O_z}{{}^1O_x}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{{}^1O_z}{{}^1O_x} \right) \quad \text{para } {}^1O_x > 0$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{{}^1O_z}{{}^1O_x} \right) + 180^\circ \quad \text{para } {}^1O_x < 0$$

$$\text{si } {}^1O_x = 0 \text{ y } {}^1O_z \geq 0 \quad \text{entonces } \alpha = 90^\circ$$

$$\text{si } {}^1O_x = 0 \text{ y } {}^1O_z < 0 \quad \text{entonces } \alpha = -90^\circ \quad \text{Ecuación 4.15}$$

De la ecuación 4.2 se puede obtener el vector de posición del punto extremo del brazo con respecto al origen de coordenadas (sistema 0):

$${}^0O = {}^0T^1O = \begin{bmatrix} {}^0O_x \\ {}^0O_y \\ {}^0O_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.16}$$

y de aquí encontramos el mismo vector, pero con respecto al sistema 1:

$${}^1O = {}^1T^0O = \begin{bmatrix} {}^1O_x \\ {}^1O_y \\ {}^1O_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

para poder resolver esta expresión es necesario encontrar 0_1T que es la matriz inversa de 1_0T :

$${}^0_1T = ({}^1_0T)^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^0R^T & -{}^0R^T P_{ORG(1)} & & \\ \hline 0 & & & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & -l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Ecuación 4.18

sustituyendo la ecuación 4.18 en la ecuación 4.17:

$${}^1_0O = \begin{bmatrix} {}^1O_x \\ {}^1O_y \\ {}^1O_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0O_x \cos \theta_1 + {}^0O_y \sin \theta_1 \\ -{}^0O_x \sin \theta_1 + {}^0O_y \cos \theta_1 \\ {}^0O_z - l_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 4.19

Con lo que finalmente tenemos todos los elementos para poder encontrar el ángulo θ_2 con la siguiente expresión:

$$\theta_2 = \beta + \alpha$$

Ecuación 4.20

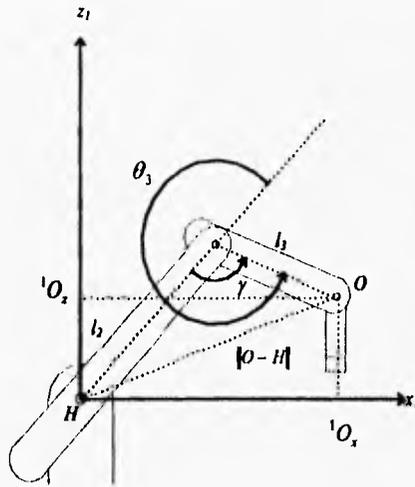


Figura 4.4 Relación entre la posición del extremo del brazo (O) y el ángulo que presenta la articulación del codo (θ_3).

En la figura 4.4 tenemos la relación entre el ángulo θ_3 y la posición del brazo, de esta figura obtenemos lo siguiente:

$$\theta_3 = 180^\circ + \gamma \quad \cdot \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Por la ley de cosenos:

$$\|O-H\|^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos \gamma$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{\|O-H\|^2 - l_2^2 - l_3^2}{-2l_2l_3} \right) \quad \text{Ecuación 4.22}$$

De la misma figura observamos que para que la posición analizada esté dentro del volumen de trabajo del brazo es necesario que se cumpla la siguiente ecuación:

$$l_2 + l_3 \geq \|O-H\| \quad \text{Ecuación 4.23}$$

La ecuación 4.23 es una restricción necesaria para que las posición analizada sea alcanzable por el brazo, aunque adicionalmente es necesario considerar las limitaciones físicas de las articulaciones que están representadas en la tabla 4.1.

Hasta aquí tenemos el modelo matemático del brazo, mismo que utilizaremos en la elaboración del sistema de cómputo que lo controla, al que nos referiremos mas adelante.

IV.3. Diseño del sistema mecánico

Como se observa en la figura 4.5, el movimiento de cada una de las articulaciones se realiza por medio de engranes, los cuales se encuentran enlazados a los motores mediante bandas. La posición específica de los potenciómetros nos permite una lectura confiable de la posición angular de cada miembro.

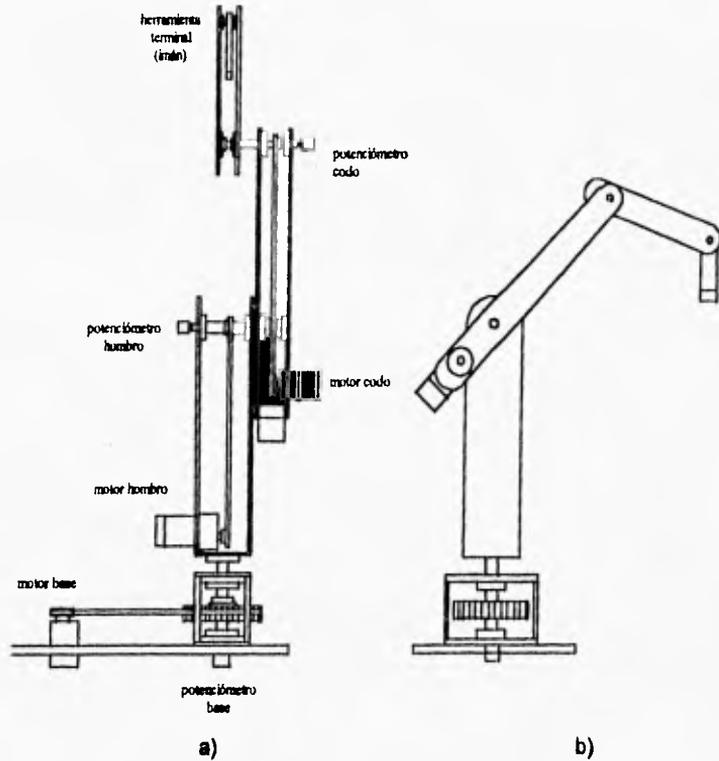


Figura 4.5. Estructura del manipulador: a) vista frontal; b) vista lateral.

En la figura 4.5 podemos observar la estructura mecánica del manipulador. El material utilizado para su construcción es aluminio, que por ser ligero, permite que el manipulador tenga una mayor capacidad de carga.

En la base se localiza un motor de corriente directa, que mueve una banda, la cual está conectada a un engrane que realiza el movimiento del manipulador a derecha e izquierda.

El motor del hombro es un motor de pasos que cuenta con un reductor de velocidad para compensar su escasa resolución (solo 200 pasos por revolución). El motor se encuentra en una posición cercana a la base, para hacer que el centro de gravedad del brazo esté más abajo y reducir el efecto de la inercia que sería mayor si el motor se encontrara más arriba. Se utiliza una polea para transmitir el movimiento a la articulación.

En la figura 4.5a se puede ver que la posición del segundo eslabón presenta un desplazamiento con respecto al primero, pero este desplazamiento es compensado en el tercer eslabón, de tal forma que el brazo cumple con el modelado matemático realizado.

En el segundo eslabón tenemos un motor de corriente directa que mueve a la articulación del codo, este motor se encuentra en las cercanías de la segunda articulación para que, en conjunto con el contrapeso, se reduzca el momento de inercia que se produciría si estuviera conectado directamente en la articulación del hombro, esto mejora los movimientos y la capacidad de carga del brazo.

La herramienta terminal que se le instaló al brazo es un electroimán que es capaz de soportar objetos con peso de hasta 250 gr. cuando se le alimenta a 12 V.

Los motores de DC, se mueven a una velocidad de 15 RPM, cuando están alimentados con 24 Volts. El motor de pasos se mueve a una velocidad que depende de la frecuencia de los pasos, cada uno de los cuales provoca

un incremento (o decremento) de 1.8° . El reductor tiene una relación de 20:1, por lo que el conjunto motor-reductor se mueve a 0.09° por paso, o 4000 pasos por revolución, lo cual incrementa notablemente la resolución del motor, y por ende la del brazo, aunque su velocidad se reduce. En la figura 4.5 también se ve que en cada articulación se ubica un potenciómetro, que sirve para realizar la medición de la posición angular de las articulaciones y realimentarla al controlador.

El brazo tiene una capacidad de carga tal que es capaz de levantar cualquier objeto que soporte el electroimán, es decir, que tenga un peso de hasta 250 gr.

IV.4. Diseño del sistema electrónico

El sistema electrónico del brazo es la interfaz entre el sistema de control principal (Software) y los motores. Para lograr este objetivo, contamos con los motores y el electroimán mencionados.

Para el diseño de nuestro sistema se consideró que el sistema debe contar con un conjunto de entradas y salidas con las siguientes características:

- Una entrada para seleccionar acción, que puede ser control de movimientos de motores o lectura de posiciones angulares de las articulaciones.
- Una entrada de control de dirección para cada motor.

- Una entrada de control de movimiento activo para cada motor.
- Una entrada de control de activación para el electroimán.
- Una entrada para muestreo de posición del motor seleccionado.
- Dos entradas para seleccionar el motor cuya posición se quiere conocer.
- Una entrada para lectura de posición del motor seleccionado.
- Una entrada para seleccionar parte alta o baja de la palabra que representa a la posición leída.
- Tres entradas de sensor posición (una por cada sensor).
- 4 salidas de potencia para el motor de pasos.
- 2 salidas de potencia para el motor de corriente directa de la base.
- 2 salidas de potencia para el motor de corriente directa del codo.
- 2 salidas de potencia para el electroimán.
- 5 salidas digitales que representan la posición del motor seleccionado (El total de salidas debe ser de 10 bits, por esta razón, se deben enviar en dos partes que se eligen con la entrada de selección en parte alta o baja).

En la figura 4.6 se observa el diagrama de bloques propuesto para el sistema electrónico. Se utilizan ocho entradas y cinco salidas, para poder emplear el puerto de impresora de la computadora. La lógica del motor de pasos debe servir para poder controlarlo desde la computadora de la misma manera que los motores de corriente directa. Los multiplexores del convertidor Analógico Digital (A/D) son para poder introducir la palabra de 10 bits del convertidor a la computadora. El registro de 8 bits es para poder mantener la última acción realizada en los motores al pedirle datos al convertidor A/D.

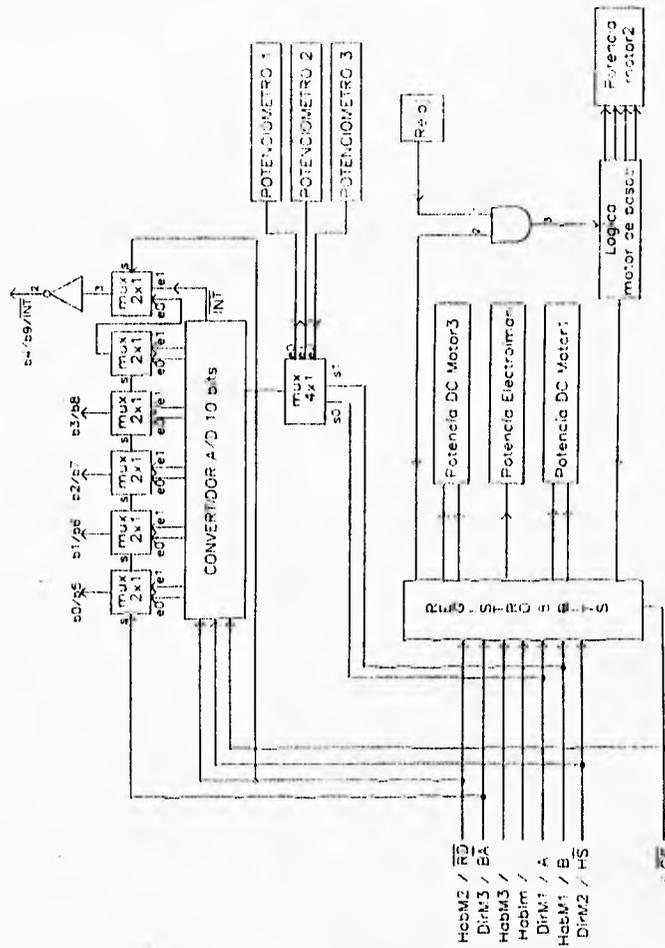


Figura 4.6. Diagrama de bloques del sistema electrónico del manipulador.

IV.4.1. Lógica de los motores

Esta etapa sirve para interpretar las señales que provienen de la computadora. Está formada por un registro de 8 bits que se carga cuando la señal \sim (CS) del diagrama de bloques es un "1" lógico. Para cada motor se recibe una señal digital de dirección y una de habilitación de movimiento, a la salida contamos con dos líneas para cada motor de corriente directa (DC) y cuatro para el motor de pasos.

Ambos motores de DC tienen un funcionamiento idéntico, reciben dos líneas de entrada: DIR y HAB. La primera funciona como selección de dirección (0 hacia adelante, 1 hacia atrás), y la segunda funciona como selección de movimiento (0 no se mueve, 1 se mueve).

Las salidas son Q1 y Q2, que valen exactamente lo mismo que DIR y HAB, respectivamente, por lo que no es necesario implantar ningún circuito lógico de control, estas entradas directamente se alimentan a la parte de potencia para los motores de DC que se describe en la sección siguiente del texto.

| HAB | DIR | Q1 | Q2 | ACCIÓN DEL MOTOR |
|-----|-----|----|----|------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | detenido |
| 0 | 1 | 0 | 1 | detenido |
| 1 | 0 | 1 | 0 | mueve_adelante |
| 1 | 1 | 1 | 1 | mueve_atrás |

Tabla 4.2 Estados de los motores de corriente directa.

Para el motor de pasos, se necesitan cuatro salidas y dos entradas. Las entradas son DIR y HAB y funcionan de la misma manera que en los motores de corriente directa. Las salidas son Q1, Q2, Q3, Q4, éstas salidas son las que indican si el motor debe moverse y el sentido de movimiento. Los motores de pasos por su naturaleza necesitan que sus entradas cambien de acuerdo a una secuencia predeterminada, si no existe éste cambio, no hay movimiento. La tabla siguiente muestra la secuencia necesaria para que el movimiento se produzca:

| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
|---|----|----|----|----|
| ↑ | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 0 | 1 | 1 | 0 |
| ↓ | | | | |

Tabla 4.3 Secuencia para movimiento del motor de pasos

Si la secuencia mostrada se sigue de arriba hacia abajo, el movimiento se producirá hacia adelante y si se sigue de abajo hacia arriba, el movimiento se producirá hacia atrás. Cada vez que hay un cambio adecuado en estas salidas, se producirá un movimiento en determinado sentido, una revolución del motor se divide en un número constante de pequeños movimientos denominados pasos, que en el caso del motor con el que disponemos el valor para cada paso equivale a 1.8° . Por otro lado, como se observa en la tabla 4.3, Q1 es la negación de Q2 y Q4 es la negación de Q3.

La velocidad de estos motores depende de la velocidad con la que se siga la secuencia y, como se dejó antes, del número de pasos por revolución (en nuestro caso es de 4000 pasos por revolución). Se utilizó un circuito oscilador para fijar la velocidad de movimiento de los motores. A continuación se muestra la tabla de estados de nuestro circuito de lógica para el motor de pasos:

| DIR | Estado Presente | | Estado Siguiete | |
|-----|-----------------|------|-----------------|--------|
| | Q2 n | Q3 n | Q2 n+1 | Q3 n+1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |

Tabla 4.4. Estado presente y siguiete del motor de pasos.

Como se observa en la tabla anterior, no se muestra la entrada HAB, pues como se vio en el esquema de entradas y salidas (figura 4.6), esta entrada se combina con el oscilador mencionado anteriormente a través de una compuerta AND que tiene la función de interruptor para el reloj del circuito secuencial, logrando con esto permitir o no el paso de un estado a otro. Se decidió implementar un circuito con Flip-Flops JK para llevar la secuencia adecuada mostrada en la tabla anterior. La tabla de transición de los Flip-Flops JK se muestra a continuación:

| Qn | Qn+1 | J | K |
|----|------|---|---|
| 0 | 0 | 0 | * |
| 0 | 1 | 1 | * |
| 1 | 0 | * | 1 |
| 1 | 1 | * | 0 |

Tabla 4.5 Estados siguietes de lógica para el Flip-Flop JK

Utilizando esta tabla se generan los mapas de Karnaugh para la operación adecuada de esta etapa como se ve a continuación.

| E\Q2Q3 | | | | 00 | 01 | 11 | 10 | E\Q2Q3 | | | | 00 | 01 | 11 | 10 |
|--------|--|---|---|----|----|----|----|--------|--|---|---|----|----|----|----|
| 0 | | 1 | * | * | 0 | 1 | * | 0 | | 0 | 1 | * | * | 0 | 1 |
| 1 | | 0 | * | * | 1 | 0 | * | 1 | | 1 | 0 | * | * | 1 | 0 |

Flip-Flop 2

Flip-Flop 3

Tabla 4.6. Mapas de Karnaugh para obtener las funciones de entradas para los Flip-Flops.

Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$Q_1 = \bar{Q}_2$$

$$Q_3 = \bar{Q}_4$$

$$J_0 = E \oplus Q_1$$

$$K_0 = E \oplus Q_2$$

$$J_1 = E \oplus Q_3$$

$$K_1 = E \oplus Q_4$$

El circuito que se implementó se muestra en la figura 4.7. Cabe hacer notar que tanto en éste circuito como en el resto de los circuitos lógicos del sistema electrónico del manipulador se emplearon dispositivos de la tecnología CMOS, debido a que consumen poca corriente y son prácticamente inmunes al ruido.

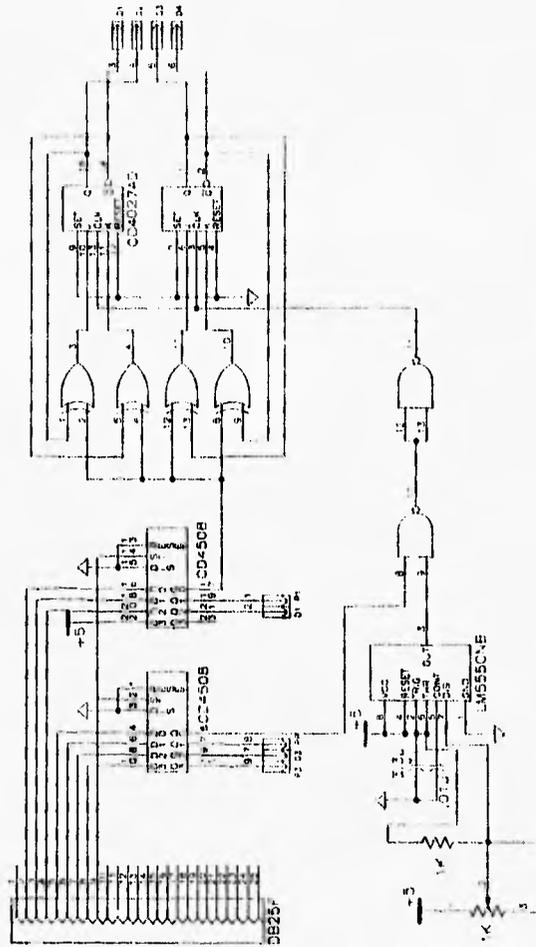


Figura 4.7. Diagrama electrónico para el motor de pasos.

IV.4.2. Potencia de los motores

El propósito de ésta etapa es proporcionar la intensidad de corriente y el voltaje que necesita cada uno de los motores para funcionar adecuadamente. Para los motores de corriente directa y para la operación del electroimán se utilizaron arreglos de relevadores de un polo un tiro y de dos polos dos tiros. El circuito para los motores de DC es muy similar al empleado en el motor de dirección del vehículo y se muestra a continuación:

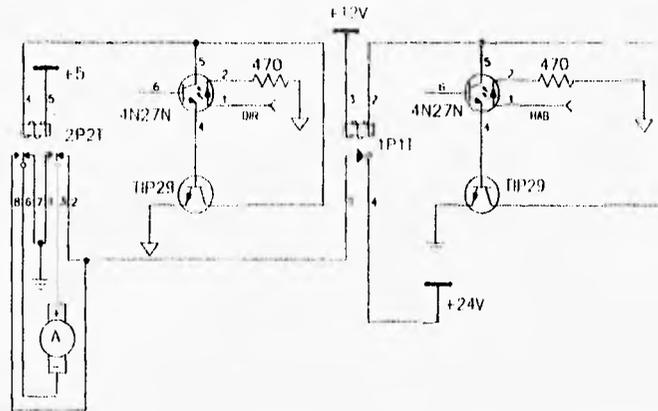


Figura 4.8 Diagrama de conexiones para la etapa de potencia de los motores de DC del manipulador.

Para la etapa de potencia del motor de pasos se emplearon transistores TIP29 en configuración Darlington para cada fase en lugar de utilizar relevadores, dado que se necesitaba manejar alta frecuencia por el reductor de velocidad que tiene el motor. En la figura 4.9 se muestra la forma

en que fueron conectados dichos transistores, a la entrada de cada transistor se le puso un optoacoplador que aísla la etapa lógica de la etapa de potencia. A cada transistor, cuyo emisor está conectado a tierra, se le puso un disipador de potencia lo suficientemente grande como para que soportaran el calor generado a la hora de alimentar las bobinas que demandan más de un Ampere.

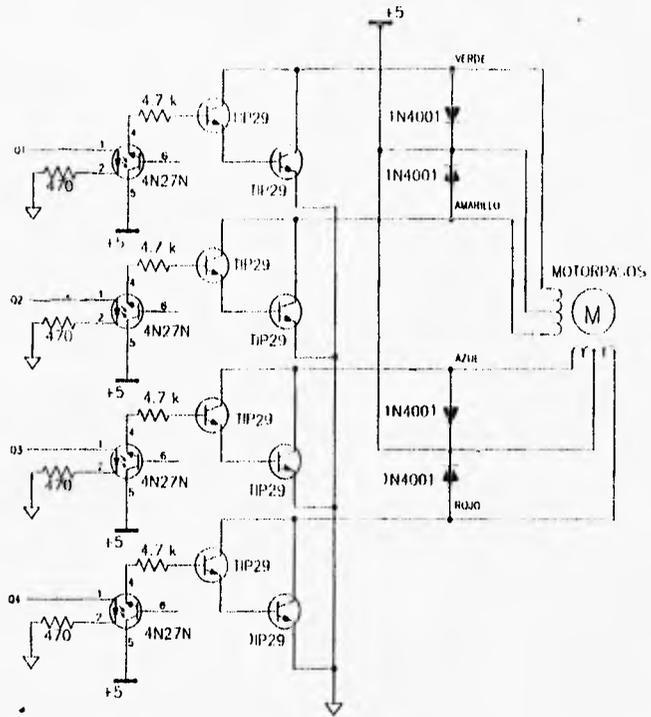


Figura 4.9. Diagrama de conexiones para la etapa de potencia del motor de pasos del manipulador.

IV.4.3. Adquisición de datos

Para conocer la posición en la que se encuentran los motores se utilizaron sensores que nos entregan una señal analógica, la cual tiene que ser transformada a niveles digitales que entienda la computadora. El módulo de adquisición de datos se compone de un convertidor analógico-digital de 10 bits, así como otros elementos para tener un control de conversión.

En un principio se eligió el convertidor ADC10064 pues contaba con cuatro entradas analógicas, pero nos fue imposible encontrarlo en el mercado nacional, por lo que se eligió el ADC10062 a pesar de contar solamente con dos entradas analógicas. Esta deficiencia fue cubierta por un multiplexor analógico de 4 entradas, el circuito integrado MC4529.

Las características generales del convertidor A/D ADC10062 de National, son las siguientes:

- Convertidor de 10 bits de precisión de aproximaciones sucesivas.
- Alimentación de 5 Volts
- 2 entradas analógicas con impedancia de 500 Ω
- Capacidad de muestreo y reten
- Salidas en paralelo
- Velocidad de conversión de 600 ns típica y de 900 ns máxima.
- Baja disipación de energía 235 mW máximo.
- Error máximo de ± 1 bit menos significativo.

Este chip cuenta con una entrada de selección de chip $-(CS)$ que cuando está en voltaje bajo, habilita a las entradas de control de entrada

~(RD) y a la entrada de control de muestreo y reten (~S/H), y cuando está en voltaje alto, las salidas del ADC10062 permanecen en alta impedancia. Cuando ~(RD) está habilitado y ~(CS) en nivel bajo, se pueden ver el valor convertido en las salidas del convertidor. Cuando (~S/H) se encuentra en nivel de voltaje bajo y ~(CS) también, se toma una muestra de la entrada analógica y cuando (~S/H) se encuentra en voltaje alto, se retiene en la salida el último valor muestreado. Existe además la salida de interrupción ~(INT) que presenta un nivel de voltaje bajo cuando la conversión de los datos ha concluido y regresa al nivel alto cuando ~(RD) cambia su nivel de bajo a alto.

Como el puerto paralelo de la computadora sólo dispone de 5 entradas, se necesitó multiplexar las salidas del convertidor para obtener la palabra digital en dos partes. Primero se multiplexa y envía la parte alta de la palabra y posteriormente la parte baja. Para realizar este procedimiento, se le pide al convertidor A/D que realice una conversión y se espera a que se genere la señal ~(INT), en ese momento se le manda al circuito una señal que llamamos (~A/B), cuando el nivel de voltaje se encuentra en bajo, el puerto recibe la parte alta de la palabra, cuando el nivel es alto, se lee la parte baja de la misma. La unión de las dos partes se realiza vía software.

En la figura 4.6 se ven todas las señales que anteriormente fueron descritas y en la figura 4.10 se muestra el diagrama de conexiones de los circuitos utilizados para la adquisición de los datos.

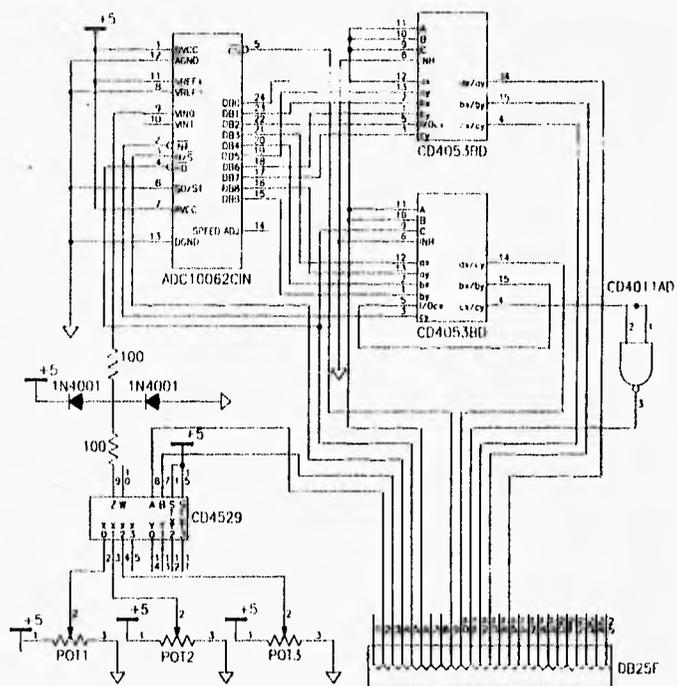


Figura 4.10 Diagrama electrónico de adquisición de los datos.

IV.4.4. Sensores de posición

Para medir la posición de las articulaciones se emplearon potenciómetros (en la figura 4.10 son POT1, POT2 y POT3), los cuales entregan un voltaje directamente proporcional a la posición angular de cada uno de los motores. De acuerdo a las características de operación del convertidor ADC10082, para lograr una lectura con una precisión alta, es necesario emplear potenciómetros cuyo valor resistivo no exceda los 500 Ω .

IV.4.5. Interfaz con la computadora

El sistema electrónico cuenta con una entrada para conector DB25 hembra, cuya función es la de ser la interfaz entre el brazo mecánico y la computadora, esta interfaz se puede conectar al puerto de impresora de cualquier PC. Las funciones de la interfaz serán:

- Ordenar a los motores o al órgano terminal efectuar alguna acción.
- Solicitar a los sensores la posición angular de cualesquiera de las articulaciones del brazo.

Para hacer lo anterior es necesario enviar la palabra adecuada al puerto de la PC, de acuerdo a los criterios expresados en la sección III.4.4. Los pines de entrada y salida utilizados se muestran en las tablas 4.7 y 4.8.

| pin | bit | $\sim(\text{CS})=0$ | función | $\sim(\text{CS})=1$ | función |
|-----|-----|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|
| 2 | 0 | A | selección de motor | DIR1 | dirección motor de la base |
| 3 | 1 | B | | HAB1 | hab. del motor de la base |
| 4 | 2 | $(\sim\text{S/H})$ | muestreo | DIR2 | dirección motor del hombro |
| 5 | 3 | $\sim(\text{RD})$ | lectura | HAB2 | hab. del motor del hombro |
| 6 | 4 | $(\sim\text{A/B})$ | parte alta/baja | DIR3 | dirección motor del codo |
| 7 | 5 | * | * | HAB3 | hab. del motor del codo |
| 8 | 6 | * | * | HAB H | hab. de la herramienta |
| 9 | 7 | 0 | activa A/D | 1 | carga registro para motores |

Tabla 4.7. Bits que recibe el sistema electrónico del manipulador de la PC.

| pin | bit | $\sim(\text{RD})=0$ $(\sim\text{A/B})=0$ | Función | $(\sim\text{A/B})=1$ | Función | $\sim(\text{RD})=1$ | Función |
|-----|-----|---|-------------|----------------------|-------------|---------------------|------------|
| 15 | 3 | b0 | lectura de | b5 | lectura de | * | señal de |
| 13 | 4 | b1 | la parte | b6 | la parte | * | fin de la |
| 12 | 5 | b2 | baja de la | b7 | alta de la | * | conversión |
| 10 | 6 | b3 | palabra del | b8 | palabra del | * | si es 1, |
| 11 | 7 | b4 | convertidor | b9 | convertidor | (INT) | finalizó |

Tabla 4.8. Bits que entrega el sistema electrónico del manipulador a la PC.

IV.5. Diseño del sistema de cómputo

El programa que controla al manipulador se pensó para ser escrito en lenguaje C debido a que es el lenguaje con el que más familiarizados estamos y por ser portable. Debe cumplir con el siguiente objetivo:

- capacidad de cambiar la posición actual del brazo a una posición deseada por el usuario a través de un camino óptimo.

En las próximas secciones se explica el proceso seguido para la realización de dicho programa.

IV.5.1. Algoritmo del programa de control del manipulador

El algoritmo principal se define de la siguiente manera:

Si la posición destino está dentro del volumen de trabajo

Mueve el brazo al cuadrante destino

Mueve el brazo en trayectoria recta a la posición destino

En otro caso Error, la posición no es alcanzable

A continuación se explicará la forma de hacer la lectura de la posición del manipulador, las acciones que se efectúan para activar los motores y el procedimiento realizado para mover al manipulador a través de una línea recta.

IV.5.2. Lectura de posición.

Para realizar la lectura de cada sensor de posición de los motores se empleó el convertidor A/D ya descrito, siguiendo la secuencia que se describe a continuación:

1. Activa el convertidor (manda al puerto el código binario 000011Mm).
2. Pide inicio de conversión (manda al puerto 000010Mm).
3. Regresa al estado anterior (manda al puerto 000011Mm).
4. Lee del puerto hasta que el bit mas significativo = 0 , es decir espera que INT esté en bajo.
5. Pide la parte baja de la palabra (manda al puerto 000001Mm) y la lee.
6. Realiza corrimiento de tres bits a la derecha para colocar los bits leídos en la posición adecuada.
7. Pide la parte alta de la palabra (manda al puerto 000101Mm) y la lee.
8. Realiza corrimiento de 2 bits hacia la izquierda.
9. Une la parte alta con la parte baja de la palabra leída.

El resultado se multiplica por 360 grados y se divide entre el número de niveles del convertidor A/D y el resultado es la posición actual del motor correspondiente a la parte de la palabra definida como Mm. Lo anterior se muestra en la tabla 4.9.

| Mm | No. motor | Ubicación |
|----|-----------|-----------|
| 00 | 1 | Base |
| 01 | 2 | Hombro |
| 10 | 3 | Codo |

Tabla 4.9. Relación existente entre el número de motor y la parte de palabra que los representa.

IV.5.3. Movimiento de los motores

El movimiento de los motores se realiza enviando las señales HAB y DIR a cada uno de los mismos. La siguiente tabla nos muestra la forma de la palabra usada en el movimiento de las articulaciones:

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ~(CS) | HAB H | HAB 3 | DIR 3 | HAB 2 | DIR 2 | HAB 1 | DIR 1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Tabla 4.10. Descripción de la palabra de salida de la PC para el control del manipulador.

Como se observa, el bit más significativo corresponde a la señal ~(CS), esta señal nos permite elegir la acción de movimiento de motores o lectura de posición de las articulaciones. Para el movimiento del motor 1 disponemos de los dos bits menos significativos, donde se encuentran las señales HAB (habilitador) y DIR (dirección). Para los motores 2 y 3 tenemos una configuración similar. La activación de la herramienta está dada por la

señal HAB H. En la siguiente tabla se muestran las máscaras de bits utilizadas y las acciones correspondientes a cada una de éstas.

| bit 7 | bit 6 | bit 5 | bit 4 | bit 3 | bit 2 | bit 1 | bit 0 | Acción |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|
| 1 | * | 0 | * | 0 | * | 0 | * | Detiene los motores |
| 1 | * | * | * | * | * | 1 | 0 | Mueve motor1 a la izquierda |
| 1 | * | * | * | * | * | 1 | 1 | Mueve motor1 a la derecha |
| 1 | * | * | * | 1 | 0 | * | * | Mueve motor2 a la izquierda |
| 1 | * | * | * | 1 | 1 | * | * | Mueve motor2 a la derecha |
| 1 | * | 1 | 0 | * | * | * | * | Mueve motor3 a la izquierda |
| 1 | * | 1 | 1 | * | * | * | * | Mueve motor3 a la derecha |
| 1 | 1 | * | * | * | * | * | * | Activa Herramienta |
| 0 | * | * | * | * | * | * | * | Activa convertidor A/D |

Tabla 4.11. Máscaras de bits empleadas en el sistema de cómputo.

De acuerdo a la tabla anterior podemos realizar los movimientos de cada una de las articulaciones empleando operaciones lógicas OR y AND entre las máscaras. Así por ejemplo, si deseáramos mover el motor 1 hacia la izquierda, el motor 2 a la derecha, detener el motor 3 y activar la pinza realizaríamos la operación lógica OR siguiente:

10000000 OR 00000010 OR 00001100 OR 00000000 OR 01000000

y obtendríamos la secuencia de bits 11001110, esta palabra es la que se envía al puerto para obtener los movimientos que elegimos anteriormente.

IV.5.4. Movimiento sobre una recta.

Para realizar el movimiento de una posición espacial inicial a una posición destino, se empleó la siguiente metodología:

- Antes de iniciar el movimiento se verifica matemáticamente que la posición destino esté dentro del alcance del manipulador, es decir, que los ángulos para cada motor estén dentro del rango de movilidad permitida, además se verifica que la distancia al punto destino no sea mayor a la longitud del brazo extendido.
- Si la posición final es alcanzable, se rota la base hasta el cuadrante destino. Esta acción se efectúa para evitar movimientos irrealizables en los eslabones, además nos otorga una posición más cercana al punto destino implicando con ello reducir el número de movimientos totales desde el origen.
- Una vez efectuada la rotación, se actualiza la posición origen y se busca una trayectoria rectilínea de movimiento, para ello, es necesario utilizar las ecuaciones paramétricas de la recta que se definen de la siguiente manera:

$$\frac{x_1 - x_0}{a} = \frac{y_1 - y_0}{b} = \frac{z_1 - z_0}{c} = t$$

$\vec{u} = (a, b, c)$

donde:

a, b, c son las componentes de un vector unitario paralelo a la trayectoria.

x_0, y_0, z_0 son las coordenadas origen

x_1, y_1, z_1 son las coordenadas destino

t es el parámetro de segmentación de la recta.

Entonces, es necesario calcular la distancia entre el nuevo origen y el punto destino, mediante el módulo de la recta. La siguiente etapa es un proceso iterativo en el cual se calculan, con ayuda del parámetro t , puntos equidistantes de la recta que nos indican la posición siguiente, dentro de la misma, a la cual debe moverse el manipulador, posteriormente se calculan las coordenadas y los ángulos necesarios para mover el brazo hasta ese punto, este procedimiento se realiza hasta llegar a las coordenadas destino.

Para realizar todos los cálculos, dentro del programa se utilizan las ecuaciones generadas en el modelo matemático del manipulador, visto al principio de este capítulo.

V. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se presenta la forma en que llegamos a conjuntar los sistemas y subsistemas que se detallaron en capítulos anteriores para lograr el objetivo final, el cual es el funcionamiento del manipulador y el VGA para que ambos, a su vez, formen un sistema único que sea capaz de manipular piezas.

En primer lugar se implementó el sistema electrónico del manipulador utilizando la técnica de wire-wrap (alambre enrollado) y el del vehículo se realizó en tabletas para proyectos, pero nos dimos cuenta de que surgen muchos problemas por los falsos contactos constantes, por lo cual se diseñaron circuitos impresos auxiliándonos del programa Tango. Esto representó un gasto adicional, pero el sistema funciona mucho mejor y es más fácil de modificar. En el apéndice B se muestra la lista de circuitos y los diagramas de los impresos realizados.

Este proyecto tiene una característica que lo hace fácil de utilizar: la modularidad de sus sistemas. Gracias a esto, el vehículo funciona en forma totalmente independiente del manipulador, por lo que se pueden usar en conjunto o por separado sin ningún problema, además de que si en algún

momento llegara a fallar alguna de las partes, será muy fácil detectar el problema sin afectar al resto de los componentes.

V.1. Integración de los elementos estructurales, de actuación y transmisión mecánicos

En capítulos anteriores, se habló de los sistemas mecánicos tanto del manipulador como del vehículo y se dijo en su momento que tanto el diseño como la construcción e implementación de los sistemas se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico de Morelia. Pero podemos describir el material de los elementos que conforman a las partes mecánicas de los sistemas principales.

Para el hombro, codo y base del manipulador se emplearon piezas de aluminio. Debido a las restricciones económicas se buscaron motores usados para el movimiento de las articulaciones. Las bandas que transmiten el movimiento tanto en el brazo como en el vehículo son automotrices.

Todos los engranes, excepto el de la base del manipulador fueron fabricados especialmente para este trabajo. El engrane de la base del manipulador es de acero.

Al unir los elementos del manipulador se tuvo especial cuidado en que se ajustaran de la manera más firme, porque en este caso es muy importante que el dispositivo mecánico refleje lo más fielmente posible al

modelo matemático y la firmeza con que se conecten los elementos aumenta la precisión.

Por otra parte, el vehículo está hecho de madera y tiene una estructura de aluminio para aumentar su capacidad de carga, los ejes que sostienen a las ruedas son de aluminio tubular y los engranes del sistema diferencial son de acero.

V.2. Implementación e integración del sistema de navegación

En este subsistema se utilizaron fotorresistencias y emisores de luz, los cuales se montaron en una caja de plástico de color negro, como se dijo en el capítulo III. Esta caja se colocó debajo de la parte frontal del vehículo con vista hacia la pista y a un centímetro de ella, de manera que los sensores están a tres centímetros de la misma y a quince centímetros del eje de la llanta delantera. La pista cuenta con dos colores: blanco y negro. La guía para el vehículo es una línea negra de dos centímetros de ancho y va colocada encima de una superficie blanca.

El material con el que se fabrique la guía no altera el funcionamiento del sistema de navegación. Para hacer las pruebas, se utilizó una cinta de aislar negra sobrepuesta sobre un piso claro, ya que de otra manera sería necesario colocar una pista de color claro con la línea guía de color negro en la parte central.

Cabe mencionar que la pista debe formar un circuito cerrado, porque de lo contrario, no sería posible llegar más de una vez a cada estación ya que, como se mencionó en su momento, el vehículo no cuenta con reversa. Dentro del circuito, la distancia entre las estaciones puede ser tan grande o tan pequeña como sea necesario, con la única condición de que haya cuando menos tres metros de separación entre las mismas, para que el vehículo tenga el suficiente tiempo para arrancar y frenar adecuadamente.

V.3. Implementación e integración del sistema de transferencia de piezas

En el capítulo cuatro se habló del diseño y de los componentes del manipulador. Falta por describir la forma en la que se colocan las piezas sobre el vehículo y en las estaciones, y la herramienta terminal.

Las estaciones se encuentran a un lado de un segmento de pista recto no menor a tres metros para que el vehículo se coloque lo más paralelamente posible a la estación, por lo mismo, las estaciones están a 30 cm. de la guía y paralelas a ésta. La altura de las estaciones es de 60 cm. para lograr el máximo alcance del manipulador. Cada estación cuenta con código asociado a ella, del cual ya se habló en el capítulo tres.

Tanto en el coche como en las estaciones (de una a cuatro estaciones), se ubica una charola donde estarán almacenadas las piezas, para el coche la charola tiene las siguientes dimensiones: 25 cm. por cada

lado y 5 cm. de profundidad. Para el almacén de cada estación, la charola tiene una extensión de 15 cm. de ancho por 30 cm. de largo.

La herramienta terminal es un electroimán, que puede levantar piezas de hasta 250 gr. La superficie del electroimán es de 2 cm. por 2 cm. por lo cual las piezas que se transporten deben tener en su parte superior un cuadrado metálico de al menos 2 cm. por 2 cm .

V.4. Integración total del vehículo de navegación autónoma

Para hacer la integración de los subsistemas se deben respetar todas las especificaciones descritas en las secciones anteriores. Como se trata de un sistema flexible no se puede definir una sola forma de integrarlo, ya que ésta dependerá de las necesidades o del uso que se le quiera dar.

Se desarrolló un programa que coordina a todos los subsistemas. Este programa solamente sirve para mostrar la forma en que puede operar el sistema, por lo que es susceptible a mejoras, mismas que no son el principal objetivo de este trabajo. En principio este programa hace lo siguiente:

- Toma una pieza de una estación.
- Carga la pieza en la charola del vehículo.
- Desplaza el vehículo a otra estación.
- Descarga la pieza en la charola de la estación.

Este programa y todas sus funciones fueron escritas para un compilador de Lenguaje C, y aunque utilizamos el compilador de Borland Turbo C versión 2.0, se puede utilizar cualquier otro compilador compatible con el estándar de ANSI. La razón de haber utilizado este lenguaje es porque es de uso común y de fácil portabilidad, ya que el programa funcionará independientemente de la arquitectura donde sea compilado, además puede compilarse en cualquier sistema operativo tal como UNIX, haciendo un mínimo de modificaciones.

Para poder operar el sistema con la misma tarjeta de computadora es necesario contar con dos puertos de impresora, uno para el sistema de navegación y otro para el sistema de transferencia de piezas. Para nuestras pruebas se utilizó el puerto LPT1 para el manipulador, quedando el puerto LPT2 para uso exclusivo del vehículo. Para poder llevar a cabo este proceso es necesario especificar el puerto en las funciones del programa de control del sistema.

En el apéndice C se muestran las funciones con las que opera el programa, y en el disquete anexo se encuentra el código fuente del programa de prueba y el ejecutable. Es importante mencionar que para utilizar este programa es necesario tener una computadora con dos puertos de impresora que deben ser LPT1 y LPT2, además de que deben estar conectadas las tarjetas de control del manipulador y del vehículo.

VI. PRUEBAS DE CAMPO

En el presente capítulo se describen las pruebas hechas a cada uno de los subsistemas que componen al proyecto.

Cabe mencionar que el proceso de pruebas fue realizándose conforme se terminaba cada diseño. Estas pruebas sirvieron para realimentar el proceso de diseño y los resultados finales fueron mencionados ya en su momento.

Los circuitos electrónicos fueron probados auxiliándonos de tabletas de prototipos (proto-board) y fuentes de alimentación distintas a las baterías (las cuales alimentan al sistema terminado). Lo anterior causó serios problemas en las pruebas de las etapas de potencia porque no daban la corriente que el circuito necesitaba, además que los dispositivos que al inicio fueron utilizados no eran los óptimo.

Los programas de computadora fueron probados ingresándoles datos desde el teclado y una vez que estuvieron integradas y probadas las partes electrónicas que permiten la comunicación con los dispositivos físicos, se

hicieron las conexiones entre dichos dispositivos y la computadora y los programas se probaron para ya realizar movimientos tanto del manipulador como del vehículo.

Todas las partes fueron probadas por separado. En primer lugar la parte electrónica del manipulador, es decir, la etapa de potencia y el circuito lógico. En segundo lugar la etapa de potencia del vehículo y el circuito controlador de dirección. Finalmente, se integraron los sistemas (el manipulador y el VGA), para conocer el comportamiento del sistema completo y evaluar de esta manera, si el objetivo inicial se cumplió.

VI.1. Detección y corrección de fallas

Las fallas más comunes se presentaron en las etapas de potencia de ambos sistemas, ya que los dispositivos que utilizamos no soportaban la corriente demandada por los motores. Primero probamos con circuitos MOSFET y el principal inconveniente fue que entregaban voltajes inferiores al necesario para el óptimo movimiento de los motores. Los circuitos MOSFET fueron sustituidos por transistores TBJ en configuración Darlington, para darle potencia al motor de pasos del manipulador, y por arreglos de relevadores para los demás motores.

Otra falla que nos consumió gran cantidad de tiempo fue el control del motor de pasos. Se probó cada parte del sistema hasta que se descubrió que una de los cables de una de las fases no estaba conectado debidamente e

Impedía que tuviera un funcionamiento correcto. Bastó con conectar adecuadamente los cables y soldarlos, para resolver el problema.

Por otra parte, los potenciómetros que al principio se utilizaron en la adquisición de datos no eran los adecuados (eran de 50 k Ω), pues la impedancia de entrada del convertidor analógico-digital es de 500 Ω , por lo que teníamos una precisión muy baja. Se sustituyeron los potenciómetros por otros de 500 Ω , con lo cual se ajustó la impedancia de entrada del convertidor A/D se obtuvo una excelente resolución.

Un problema importante fue el sistema mecánico, pues tenía fallas en la tensión de las bandas, necesitaba ser ajustado para darle firmeza. El sistema mecánico fue ajustado, en todas sus partes.

Como ya fue mencionado al inicio de este capítulo, las fuentes de voltaje nos causaron una gran pérdida de tiempo debido a la insuficiente potencia que entregaban. En el momento en que se contó con las baterías, se volvieron a hacer pruebas y se logró un desempeño eficiente de los motores.

Al tener los circuitos impresos se realizó una prueba final del programa descrito en el capítulo V, y después de calibrar los sensores, éste funcionó adecuadamente.

VI.2. Optimización

Se realizó una minimización de los circuitos de control, de manera que se dejaron de utilizar multiplexores y circuitos H para el control de los motores de corriente directa, y en lugar de estos se utilizaron directamente las salidas de la computadora para controlar su movimiento y la dirección del mismo.

Se calibraron los sensores de pista para que tuvieran una adecuada detección de tonos claros y oscuros. En el caso de los potenciómetros que funcionan como sensores de posición angular de las articulaciones fueron calibrados de manera que su posición coincidiera con el origen de los ángulos correspondientes.

Se ajustó el voltaje de alimentación del motor de dirección para que el vehículo gire a una velocidad adecuada y evitar que pierda la pista. Con este mismo propósito fue ajustada la modulación por ancho de pulsos en el programa que controla al vehículo.

VII. RESULTADOS CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue cubierto en su totalidad, ya que el vehículo de navegación autónoma logró, durante las pruebas realizadas, hacer la transferencia de algunas piezas desde una estación a otra. Por lo anterior podemos afirmar que el proyecto es funcional, aunque presenta limitaciones que pueden ser superadas en trabajos posteriores.

Las limitaciones detectadas en el funcionamiento del vehículo son:

- La necesidad de viajar a velocidades relativamente bajas debido a que de lo contrario perdería la guía y por ende dejaría de funcionar.
- El alcance del brazo es muy reducido, debido a la longitud de sus eslabones, por lo cual es incapaz de alcanzar piezas lejanas.
- El mecanismo de control del desplazamiento del vehículo sobre la guía no tiene ningún mecanismo que garantice que el vehículo siempre llegue a las estaciones en la misma posición y orientación, por lo cual la precisión lograda en el brazo se ve minimizada por errores considerables en el vehículo, aunque a pesar de las razones anteriores el sistema es funcional.

Las principales ventajas de nuestro vehículo son:

- El diseño se realizó pensando en tener un sistema modular, de manera que es muy sencillo hacerle modificaciones.
- El brazo es desmontable e independiente del vehículo, por lo que estos pueden funcionar en forma separada sin menoscabo de sus funciones.
- Los programas se pueden modificar fácilmente, lo que significa que el sistema es reprogramable para realizar tareas de naturaleza variada.

Este es el primer paso en el desarrollo de un proyecto de mayor magnitud en el que se pueden agregar, en trabajos posteriores, los siguientes aspectos:

- La programación (que por el momento es suficiente para el propósito de este trabajo), en la cual se puede desarrollar un compilador para facilitar la reprogramación de tareas al igual que se puede introducir un sistema "Inteligente" para hacer mas flexible al vehículo.
- El aumento de sensores, ya que es factible agregarle un sistema de localización más eficiente como sonar y/o visión, la visión le sería útil al manipulador para poder obtener piezas en posiciones razonablemente cambiantes dentro de las estaciones de trabajo.
- La herramienta terminal. Se le puede introducir al manipulador un mecanismo que permita cambiar la herramienta terminal, todo esto entre otras mejoras.

El análisis de viabilidad no deja de ser importante, pero no lo abordamos debido a que requeriría de un esfuerzo adicional que escapa a nuestro propósito inicial, aunque se puede que se tuvieron que realizar gastos por aproximadamente \$15,000.0, lo cual da una somera idea del

costo de fabricación de nuestro proyecto y permite sacar una conclusión inicial acerca de la viabilidad del mismo. Por lo que respecta al impacto social, también escapa a nuestro objetivo, por lo que tampoco realizamos ninguna clase de análisis del mismo.

Finalmente podemos afirmar que a pesar del atraso tecnológico en que el país vive sumido, es posible el desarrollo de tecnología, aunque para esto se necesita de una fuerte inversión. Pero si la industria mexicana volteara hacia las universidades del país, encontraría muchas de las soluciones que necesita para resolver los problemas que en sus procesos de producción pudieran surgir, a menor costo y con la misma calidad que ofrecen las industrias extranjeras.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Bernal Uruchurto, Francisco. et. al. *Diseño y construcción de un VGA*. Tesis presentada para obtener el título de Ingeniero en Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. México D.F. 1993

Boylestad, Robert. Nashelsky, Louis. *Electrónica: Teoría de circuitos*. México. Prentice-Hall, cuarta edición, 1989

Fu, K. S., et.al. *Robótica: Control, detección, visión e inteligencia*. Madrid, España. McGraw-Hill, Inc. Primera edición, 1988.

Goetsch, David L. *Advanced manufacturing Technology*. Delmar Publishers Inc. E.U 1990

Groover, Mikell P., et. al. *Robótica industrial: tecnología, programación y aplicaciones*. Madrid, España. McGraw-Hill, Inc. Primera edición. 1989.

Juárez Campos, Ignacio *Diseño y construcción de un manipulador de 5 grados de libertad*. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 1996

Mc. Cloy, D., Harris, D. M. J. *Robótica: una introducción*. EUA. s.f. Limusa.

Rajaram, N. S. "Automated Guided Vehicle System" *Concise International Encyclopaedia of Robotics: Applications and Automation*. Dorf, Richard C. Segunda edición. E. U. , 1990. John Wiley & Sons, Inc.

Ranky Paul G. "Accuracy" *Concise International Encyclopaedia of Robotics: Applications and Automation*. Dorf, Richard C. Segunda edición. E. U. , 1990. John Wiley & Sons, Inc.

Reyes Bejari, Gina P., et. al. *Diseño y construcción de un robot programable y dirigible a control remoto* Tesis presentada para obtener el título de Ingeniero en Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. México D.F. 1992

Romero, Laura. "Se diseña un robot manipulador para la industria de semiconductores". *Gaceta UNAM*. Año 11. Décima época. Número 3006. Abril 1996.

APÉNDICE A: DATOS TÉCNICOS

A.1. Vehículo

| | |
|-------------------------|--|
| Capacidad de carga | 50 kg. |
| Peso sin carga | 65 kg. |
| Dimensiones | 62cm. de ancho, 90cm. de largo, 30cm. de alto |
| Velocidad promedio | 50cm/seg. |
| Tipo de guía | línea oscura en el piso de 2cm. |
| Detección de estaciones | código binario en el piso |
| Estaciones | 60cm. de alto x 30cm. de frente, a 30cm. de la guía |
| Ruedas traseras | 5cm. de ancho x 15cm. de diámetro |
| Ruedas delanteras | 5cm. de ancho x 13cm. de diámetro |
| Charola | 25cm. de lado, 5cm. de profundidad |
| Reconocimiento de guía | óptico (fotoresistencias de 8 a 170 K Ω) |
| Radio mínimo de curvas | 1m. |

| | |
|---|---|
| Sistema de corrección de trayectoria | volante delantero combinado con diferencial |
| Motor-reductor de impulso | corriente directa, con velocidad de salida de 100 RPM sin carga, alimentado a 24 V. |
| Motor de dirección | corriente directa, con velocidad de salida de 30 RPM sin carga, alimentado a 24 V. |
| Dirección del movimiento | siempre hacia adelante |

A.2. Sistema manipulador de carga

| | |
|------------------------------------|--|
| Capacidad de carga | 250 gr. |
| Clasificación | brazo articulado de tres grados de libertad |
| Dimensión de eslabones | 1º.- 41cm., 2º.- 30cm., 3º.- 20cm. |
| Mecanismo de transmisión | banda/polea |
| Peso | 11 kg. |
| Motor de la base | corriente directa, con velocidad de salida de 15 RPM, alimentado a 24 V |
| Motor del hombro | motor-reductor de pasos, con resolución de .09º por paso, o 4000 pasos por revolución. |
| Motor del codo | corriente directa, con velocidad de salida de 15 RPM, alimentado a 24 V |
| Mecanismo de realimentación | 3 potenciómetros de 500Ω cada uno. |
| Volúmen de trabajo | esférico de 1m. de diámetro |
| Herramienta terminal | electroimán, con capacidad de carga de 250 gr., alimentado a 12 V. |

A.3. Energía

| | |
|------------------------------------|---|
| Tipo | Eléctrica |
| Sistema de alimentación autónoma | baterías recargables de plomo-ácido de 12V, 33A/hr. |
| Tiempo de descarga de las baterías | 1 hr. a máxima demanda, 4 hr. en operación normal |
| Consumo | 7 A. a carga máxima y 500 mA. en consumo mínimo. |
| Voltajes entregados | +5 V., +12 V. y +24V.. |

APÉNDICE B: CIRCUITOS IMPRESOS

En este apéndice se muestran los diagramas necesarios para hacer los circuitos impresos de nuestro sistema, así como las listas de materiales correspondientes.

B.1. Control del vehículo

A continuación se muestran los diagramas de los circuitos impresos del Vehículo de Guía Automática y la lista de componentes utilizados en su control.

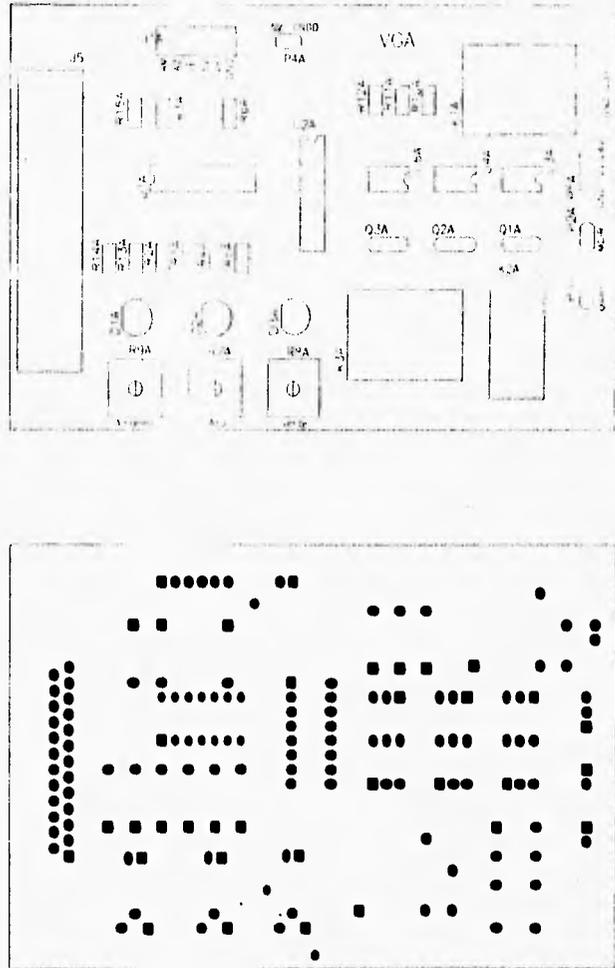


Figura B.1. Máscaras de componentes y de soldadura del impreso del VGA.

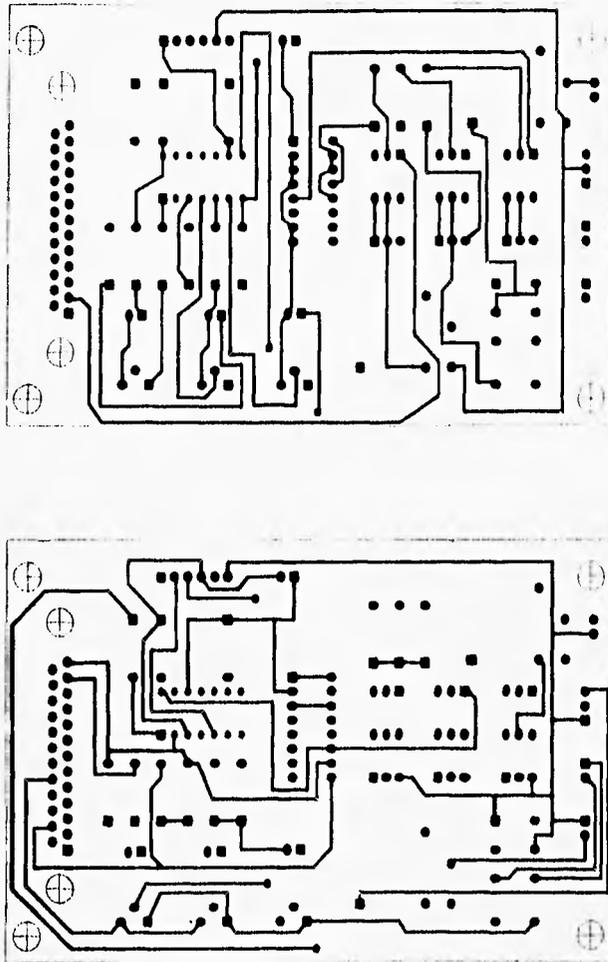


Figura B.2. Caras inferior y superior del circuito Impreso del VGA.

Lista de materiales:

| Cant. | Tipo | Valor | Referencia en el circuito impreso |
|-------|---------------|-------|-----------------------------------|
| 1 | DB25 Hembra | | J5 |
| 1 | JMP6 | | J1A |
| 3 | LED | rojo | D1A,D2A,D3A |
| 1 | LM339 | | U1A |
| 3 | Potenciómetro | 10K | R7A,R8A,R9A |
| 3 | Resistencia | 33K | R4A,R5A,R6A |
| 6 | Resistencia | 470 | R10A,R11A,R12A,R13A,R14A,R15A |
| 3 | Resistencia | 1K | R1A,R2A,R3A |
| 1 | 74ALS151 | | U2A |
| 3 | 4N27N | | U3A,U4A,U5A |
| 4 | JMP2 | | P2A,P3A,P4A,PA |
| 1 | JMP3 | | P5A |
| 2 | RELE1P1T | 1P1T | K1A,K3A |
| 1 | RELE2P2T | 2P2T | K2A |
| 3 | TIP29 | Val | Q1A,Q2A,Q3A |

B.2. Control del manipulador

A continuación se muestran los circuitos impresos para el control del manipulador y su lista de componentes.

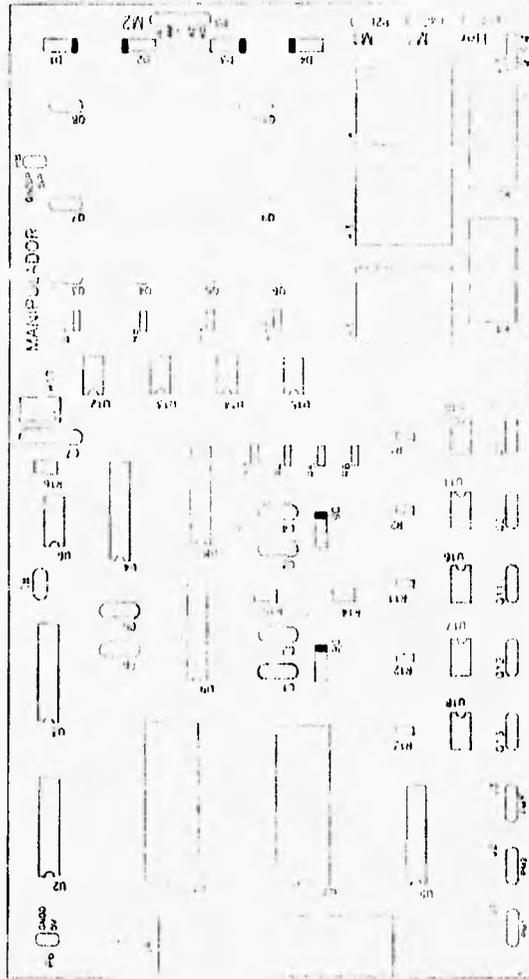


Figura B.3. Máscara de componentes del circuito impreso del manipulador.

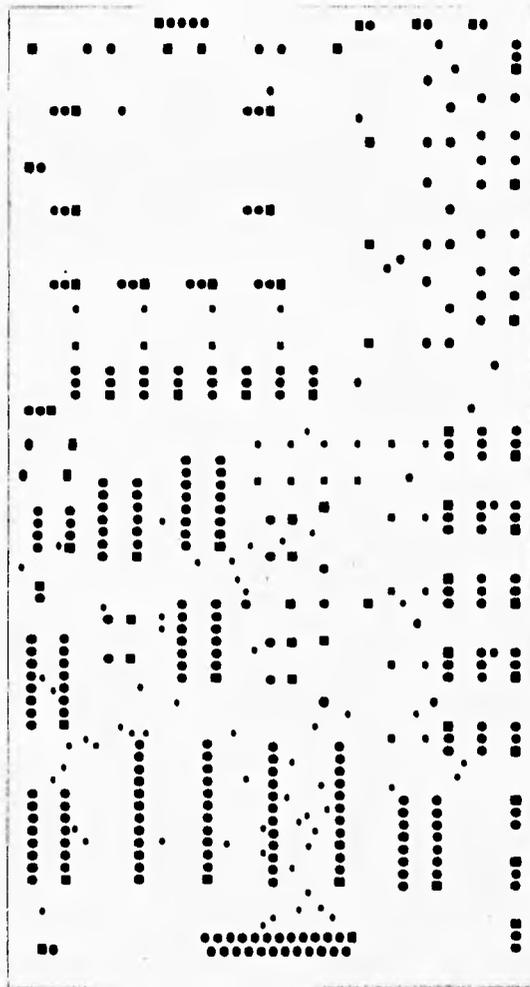


Figura B.4. Máscara de soldadura del circuito impreso del manipulador.

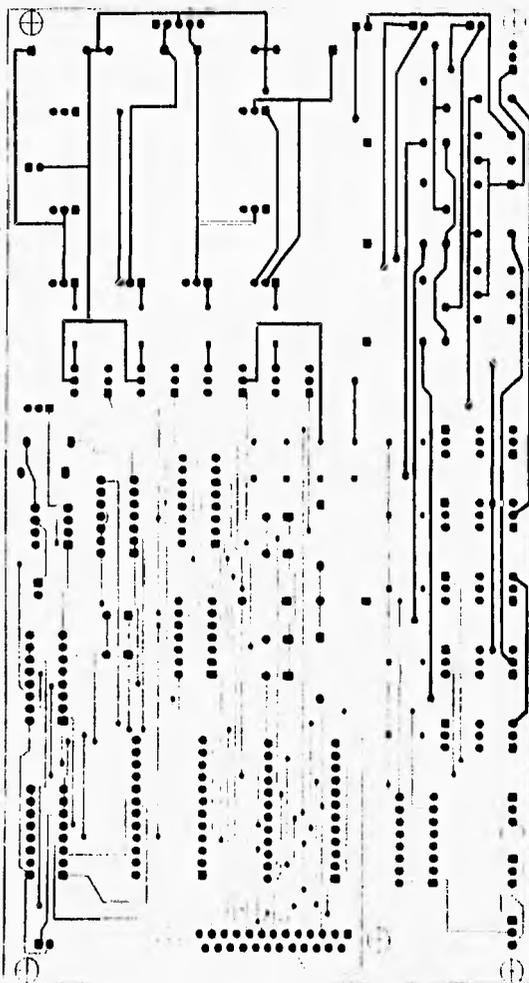


Figura B.5. Máscara de la cara inferior para el Impreso del manipulador.

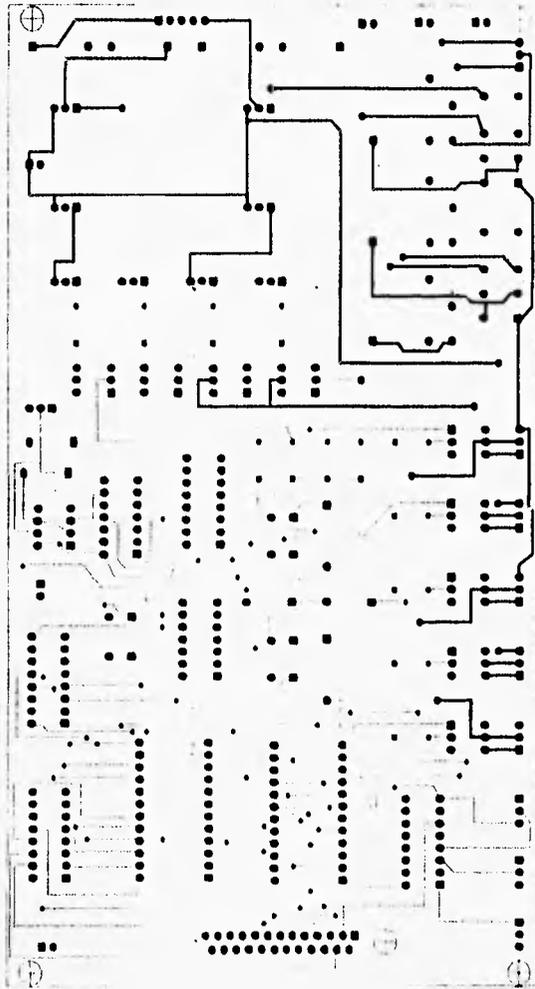


Figura B.6. Máscara para la cara superior del impreso del manipulador.

Lista de materiales:

| Cant. | Tipo | Valor | Referenciaenimpreso |
|-------|-----------------|-------|-------------------------------------|
| 6 | Diodo 1n4001 | | D1,D2,D3,D4,D5,D6 |
| 1 | ADC10062CIN | | U1 |
| 1 | Capacitor | .01u | C7 |
| 2 | Capacitor | .1u | C3,C5 |
| 2 | Capacitor | 10u | C4,C6 |
| 2 | Capacitor | 10uF | C1,C2 |
| 1 | CD4011AD | | U4 |
| 1 | CD4027AD | | U8 |
| 2 | CD4053BD | | U2,U3 |
| 1 | CD4070BD | | U9 |
| 1 | CD4508 | | U7 |
| 1 | CD4529 | | U5 |
| 1 | DB25F | | J4 |
| 6 | Jumper 2 | | J5,P2,P4,P5,P6,P8 |
| 4 | Jumper 3 | | J1,J2,J3,P7 |
| 1 | LM555CNB | | U8 |
| 1 | Cap. polarizado | 3.3u | C8 |
| 1 | Potenciómetro | 10K | R17 |
| 2 | Resistencia | 100 | R14,R15 |
| 1 | Resistencia | 1K | R16 |
| 9 | 4N27N | | U10,U11,U12,U13,U14,U15,U16,U17,U18 |
| 3 | Relevador | 1P1T | K1,K3,K5 |
| 2 | Relevador | 2P2T | K2,K4 |
| 9 | Resistencia | 330 | R1,R2,R3,R4,R5,R6,R11,R12,R13 |
| 4 | Resistencia | 4K7 | R7,R8,R9,R10 |
| 13 | TIP29 | | Q1 - Q13 |

APÉNDICE C: PROGRAMAS EN LENGUAJE C

En éste apéndice se muestran dos programas que se utilizaron para probar las funciones que controlan al manipulador y al VGA, junto con las funciones correspondientes. Se usa un tipo de letra diferente para resaltar el hecho de que estos son dos archivos que se pueden compilar en lenguaje C.

C.1. Vehículo

```
#include <stdio.h>
#include <dos.h>

#define PUERTO_SALIDA_COCHE 0x378
#define PUERTO_ENTRADA_COCHE 0x379
#define PULSO_ALTO 0xFF
#define PULSO_BAJO 0x00
#define PERIODO_MODULACION 100 /*periodo de modulación PWM*/
```

```

#define PULSOS_MAXIMOS      100  /* ancho del pulso alto a máxima
                                velocidad */

void mueve_estacion(char);
char lee_sensores(void);
void arranca_coche(void);
void frena_coche(void);
void continua_movimiento(void);

void main(void)
{
    clrscr();
    mueve_estacion('B');
}

void mueve_estacion(char estacion)
{
    char valor_leido;
    int i=100;

    valor_leido = lee_sensores(); /* lectura de sensores de pista */
    if (valor_leido != estacion) /* si el coche no está en la estación ... */
    {
        arranca_coche();        /* lo arranca, ... */
        while ((valor_leido=lee_sensores()) != estacion) && (valor_leido != 'e')
            continua_movimiento(); /* ... lo mueve hasta llegar a la estación ... */
        frena_coche();          /* ... y lo frena */
    }
}

char lee_sensores(void) /* función que lee del puerto el código de sensores */
{
    char palabra;

    palabra = inportb(PUERTO_ENTRADA_COCHE); /* lectura del puerto */
    palabra = palabra>>3; /* corrimiento a la derecha y enmascaramiento */
    palabra = palabra&7; /* para extraer la parte útil de la palabra */
    switch(palabra)
    {
        case 0: return('A'); /* estación A */
        case 1: return('B'); /* estación B */
        case 2: return('C'); /* estación C */
        case 3: return('i'); /* corrección a la izquierda */
        case 4: return('D'); /* estación D */
    }
}

```

```
    case 5: return('a');      /* avance sin corrección */
    case 6: return('d');      /* corrección a la derecha */
    default: return('e');     /* error en otro caso (7) */
}
}

void arranca_coche(void)
{
    int retardo_alto = 0;     /* tiempo de pulso alto inicial */
    int retardo_bajo = PERIODO_MODULACION; /* tiempo de pulso bajo inicial */

    while(retardo_alto <= PULSOS_MAXIMOS)
    {
        outportb(PUERTO_SALIDA_COCHE, PULSO_ALTO);
        printf("%d, %d; ", retardo_alto, retardo_bajo);
        delay(retardo_alto++);
        outportb(PUERTO_SALIDA_COCHE, PULSO_BAJO);
        delay(retardo_bajo--);
    }
}

void continua_movimiento(void)
{
    outportb(PUERTO_SALIDA_COCHE, PULSO_ALTO);
    delay(PULSOS_MAXIMOS);
    outportb(PUERTO_SALIDA_COCHE, PULSO_BAJO);
    delay(PERIODO_MODULACION - PULSOS_MAXIMOS);
}

void frena_coche(void)
{
    int retardo_alto = PULSOS_MAXIMOS; /* tiempo de pulso alto */
    int retardo_bajo = PERIODO_MODULACION - PULSOS_MAXIMOS;
    /* tiempo de pulso bajo */

    while(retardo_alto >= 0)
    {
        outportb(PUERTO_SALIDA_COCHE, PULSO_ALTO);
        printf("%d, %d; ", retardo_alto, retardo_bajo);
        delay(retardo_alto--);
        outportb(PUERTO_SALIDA_COCHE, PULSO_BAJO);
        delay(retardo_bajo++);
    }
}
```

C.2. Sistema manipulador de carga

```

#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>

#define l1 410.0 /* Longitud del eslabón de la base */
#define l2 300.0 /* Longitud del eslabón del antebrazo */
#define l3 200.0 /* Longitud del eslabón del brazo */

#define rad (2*3.1416/360)
#define INC 1.0

#define LINF1 0 /* Límites de ángulos para el motor 1 */
#define LSUP1 300
#define LINF2 -80 /* Límites de ángulos para el motor 2 */
#define LSUP2 270
#define LINF3 -80 /* Límites de ángulos para el motor 3 */
#define LSUP3 270

/***** constantes para la salida al puerto paralelo del robot *****/
#define NIVEL_CONV 1024 /* Número de niveles para 360 grados */
#define A_NIVEL 2.474666667 /* Número de niveles (A/D) por grado */
#define TOL 10 /* Tolerancia de acercamiento en niveles */
#define MASCARA 128 /* 10000000 */
#define MASCMD 3 /* 00000111 */
#define MASCMI 2 /* 00000110 */
#define MASCMI 0 /* 00000000 */
#define MASCMD 12 /* 00001100 */
#define MASCMI 8 /* 00001000 */
#define MASCMD 0 /* 00000000 */
#define MASCMD 48 /* 00110000 */
#define MASCMI 32 /* 00100000 */
#define MASCMD 0 /* 00000000 */
#define MASCPIZAA 64 /* 01000000 */
#define MASCPIZAC 0 /* 00000000 */
#define MDESACT 0 /* 00000000 */

int portent = 0x379; /* puerto paralelo (entrada)*/
int portsal = 0x378; /* puerto paralelo (salida) */

```

```

void  calcangs(float, float, float, float*, float*, float*);
void  mueve_brazo_recta(float, float, float);
void  mueve_brazo_directo(float, float, float);
int   alcanzable(float, float, float);
void  lee_pos_brazo(float*, float*, float*);
unsigned lee_puerto(int);
void  recta(float, float, float, float, float, float);
void  funcs(float, float, float, float*, float*, float*);

/*****
 *      ESTRUCTURA PRINCIPAL DEL PROGRAMA      *
 *****/
void main(void)
{
    mueve_brazo_recta(10,10,10);
}

void mueve_brazo_recta(float x1, float y1, float z1)
/* función que mueve el brazo a una posición x,y,z */
{
    float x, y, z; /*valores de la posición actual del robot*/
    int dentro; /*variable que informa si la posición destino está dentro
                del volumen de trabajo*/

    dentro = alcanzable(x1,y1,z1); /*averigua si la posición es alcanzable*/
    if(dentro)
    {
        lee_pos_brazo(&x,&y,&z); /*lee la posición actual */
        mueve_brazo_directo(x1,y1,z); /*se mueve al cuadrante destino*/
        x=x1;
        y=y1; /*actualiza los valores de la posición actual del robot*/
        recta(x,y,z, x1,y1,z1); /*hace la recta*/
    }
    else
        printf("Posición inalcanzable");
}

```

```

int alcanzable( float x, float y, float z)
/* averigua si la posición x, y, z est dentro del volumen de trabajo del robot*/
{
    float teta1, teta2, teta3, oh;

    calcangs(x,y,z, &teta1, &teta2, &teta3);
    if
    ((teta1>=LINF1)&&(teta1<=LSUP1)&&(teta2>=LINF2)&&(teta2<=LSUP2)&&(teta3>=LINF3)&&(teta3<=LSUP3))
    {
        oh = sqrt(x*x + y*y + pow((z-11),2));
        if(((12+13) >= oh)
            return (1); /*posición alcanzable*/
        else
            return (0); /*posición inalcanzable*/
    }
    else
        return (0); /*posición inalcanzable*/
}

```

```

void recta(float xin,float yin,float zin, float xfin,float yfin,float zfin)
/* función que hace que el robot se mueva a través de una línea recta
desde el punto xin,yin,zin al punto xfin,yfin,zfin */

```

```

float modulo, a, b, c, t;
float objx, objy, objz; /*coordenadas del siguiente punto a alcanzar en la recta*/
int dentro;

```

```

modulo=pow((xfin-xin),2)+pow((yfin-yin),2)+pow((zfin-zin),2);
modulo=sqrt(modulo); /*  $\sqrt{(x1-x0)^2+(y1-y0)^2+(z1-z0)^2}$  tamaño de la recta*/
if (modulo!=0)
{
    a=(xfin-xin)/modulo;
    b=(yfin-yin)/modulo;
    c=(zfin-zin)/modulo;
    t=INC;
}
else
{
    printf(" !! El robot se encuentra en esa posición !! ");
    t=modulo+1;
}

```

```

objx=xin+t*a; /* Primer segmento */
objy=yin+t*b; /* de */
objz=zin+t*c; /* recta */
dentro = alcanzable(objx, objy, objz);

while ((t<=modulo)&&(dentro)) /* si todavía no acaba con la recta */
{
    mueve_brazo_directo (objx, objy, objz);

    t+=INC;
    objx=xin+t*a; /* Siguiete segmento */
    objy=yin+t*b; /* de */
    objz=zin+t*c; /* recta */
    dentro = alcanzable(objx, objy, objz);
}
}

/*****
* Función que calcula los angulos é1,é2 y é3 en radianes
*****/

void calcangs(float x, float y, float z, float *tgr1, float *tgr2, float *tgr3)
/* función que recibe una posición x,y,z y calcula los ángulos en los que debe
estar cada motor para que el robot alcance la posición deseada */

float beta,objh,ox1,oz1,gamma,t1,t2,t3;

objh = sqrt(x*x + y*y + pow((z-1),2));
if (x==0)
    if (y>=0)
        t1=M_PI_2;
    else
        t1=-(M_PI_2);
else
    if (x>0)
        t1=atan(y/x);
    else
        t1=atan(y/x)+M_PI;
ox1=x*cos(t1)+y*sin(t1);
oz1=z-1;
beta=acos((13*13-12*12-pow(objh,2))/(-2*12*objh));
if (ox1==0)

```

```

if (oz1 >= 0)
    t2 = beta + M_PI_2;
else
    t2 = beta - M_PI_2;
else
    if (ox1 > 0)
        t2 = beta + atan(oz1/ox1);
    else
        t2 = beta + atan(oz1/ox1) + M_PI;
gamma = acos((pow(objh,2) - l2*l2 - l3*l3) / (-2*l2*l3));
t3 = gamma + M_PI;

*tgr1 = t1 * 180 * M_PI; /* instrucciones que convierten */
*tgr2 = t2 * 180 * M_PI; /* los ángulos calculados de */
*tgr3 = t3 * 180 * M_PI; /* radianes a grados */
}

void mueve_brazo_directo (float x, float y, float z)
{

    unsigned actual1, actual2, actual3, pos1, pos2, pos3, salida;
    unsigned m1, m2, m3, mp;
    int sentido1, sentido2, sentido3;

    float p1, p2, p3; /* posiciones destino en grados */

    calcangs(x,y,z, &p1,&p2,&p3);

    pos1 = p1 * A_NIVEL;
    pos2 = p2 * A_NIVEL;
    pos3 = p3 * A_NIVEL;
    clrscr();
    do
    {
        actual1 = lee_puerto(1); /* lee la posición actual del motor 1 */
        actual2 = lee_puerto(2); /* lee la posición actual del motor 2 */
        actual3 = lee_puerto(3); /* lee la posición actual del motor 3 */

        gotoxy(1,10);
        printf("M1 en %d, M2 en %d, M3 en %d ", actual1, actual2, actual3);
        sentido1 = -(pos1 - actual1); /* obtiene la dirección del mov. */
        sentido2 = -(pos2 - actual2); /* obtiene la dirección del mov. */
        sentido3 = -(pos3 - actual3); /* obtiene la dirección del mov. */

```

```
if (abs(sentido1) > TOL)
{
    if (sentido1 > 0)
        m1 = MASCMI1D;
    else
        m1 = MASCMI1;
}
else
    m1 = MASCMI1P;

if (abs(sentido2) > TOL)
{
    if (sentido2 > 0)
        m2 = MASCMI2D;
    else
        m2 = MASCMI2;
}
else
    m2 = MASCMI2P;

if (abs(sentido3) > TOL)
{
    if (sentido3 > 0)
        m3 = MASCMI3D;
    else
        m3 = MASCMI3;
}
else
    m3 = MASCMI3P;

mp = MASCPINZAA;
salida = MASCARA|m1|m2|m3|mp;
delay(10);
outportb(portsal, salida); /* Manda al puerto los movimientos */
delay(10);
} while (!(m3==MASCMI3P) && (m2==MASCMI2P) && (m1==MASCMI1P));
}
```

```

unsigned lee_puerto(int motor)
{
    unsigned entrada,A,B,C;
    char cc;

    outportb(portsal, (12+motor-1)); /*activa el convertidor cs=0, rd=1, sh=1 */
                                     /* (000011**) */
    delay(10);
    outportb(portsal, (8+motor-1)); /*pide inicio de conversion sh=0*/
                                     /* (000010**) */

    delay(10);
    outportb(portsal, (12+motor-1)); /*regresa al estado anterior*/
                                     /* (000011**) */
    delay(10);

    do
    {
        entrada= inportb(portent) & 0x80; /*espera que INT este en bajo*/
    }while (entrada != 0);

    outportb(portsal, (4+motor-1)); /*pide la parte baja rd=0, a/b=0*/
                                     /* (000001**) */
    delay(10);
    A= 0xF8 & inportb(portent); /*lee parte baja*/
    A= A>>3;

    outportb(portsal, (20+motor-1)); /*pide los datos parte alta a/b=1*/
                                     /* (000101**) */
    delay(10);
    B= 0xF8 & inportb(portent); /*lee la parte alta*/
    B= B<<2;
    C= A | B;
    return(C);
}

void lee_pos_brazo(float *x, float *y, float *z)
/* función que averigua donde está el brazo */
{
    int actual1, actual2, actual3;
    float grad1, grad2, grad3, tmpx, tmpy, tmpz;

    actual1=lee_puerto(1); /* lee la posición actual del motor 1 */
    actual2=lee_puerto(2); /* lee la posición actual del motor 2 */
}

```

```
actual3=lee_puerto(3); /* lee la posición actual del motor 3 */

grad1 = (actual1 * 360)/ NIVEL_CONV; /*convierte niveles a grados*/
grad2 = (actual2 * 360)/ NIVEL_CONV; /*convierte niveles a grados*/
grad3 = (actual3 * 360)/ NIVEL_CONV; /*convierte niveles a grados*/

funcs (grad1, grad2, grad3, &tmpx, &tmpy, &tmpz);
*x = tmpx;
*y = tmpy;
*z = tmpz;
}

/*****
* función que calcula x, y, z en función de los ángulos de los motores
*****/

void funcs(float angl, float ang2, float ang3, float *x, float *y, float *z)
{
*x=|3*cos(rad*ang1)*cos(rad*(ang2+ang3))+12*cos(rad*ang1)*cos(rad*ang2);
*y=|3*sin(rad*ang1)*cos(rad*(ang2+ang3))+12*sin(rad*ang1)*cos(rad*ang2);
*z=|3*sin(rad*(ang2+ang3))+11+12*sin(rad*ang2);
}
```